

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

FACULTE DU TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE



N°d'ordre : 2018/SysTLC 10/87

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE
FILIERE : TELECOMMUNICATIONS
OPTION : SYS TLC

**Mémoire présentée en vue d'obtention
Du diplôme de Master Académique**

Par : FILALI Meryem

THEME

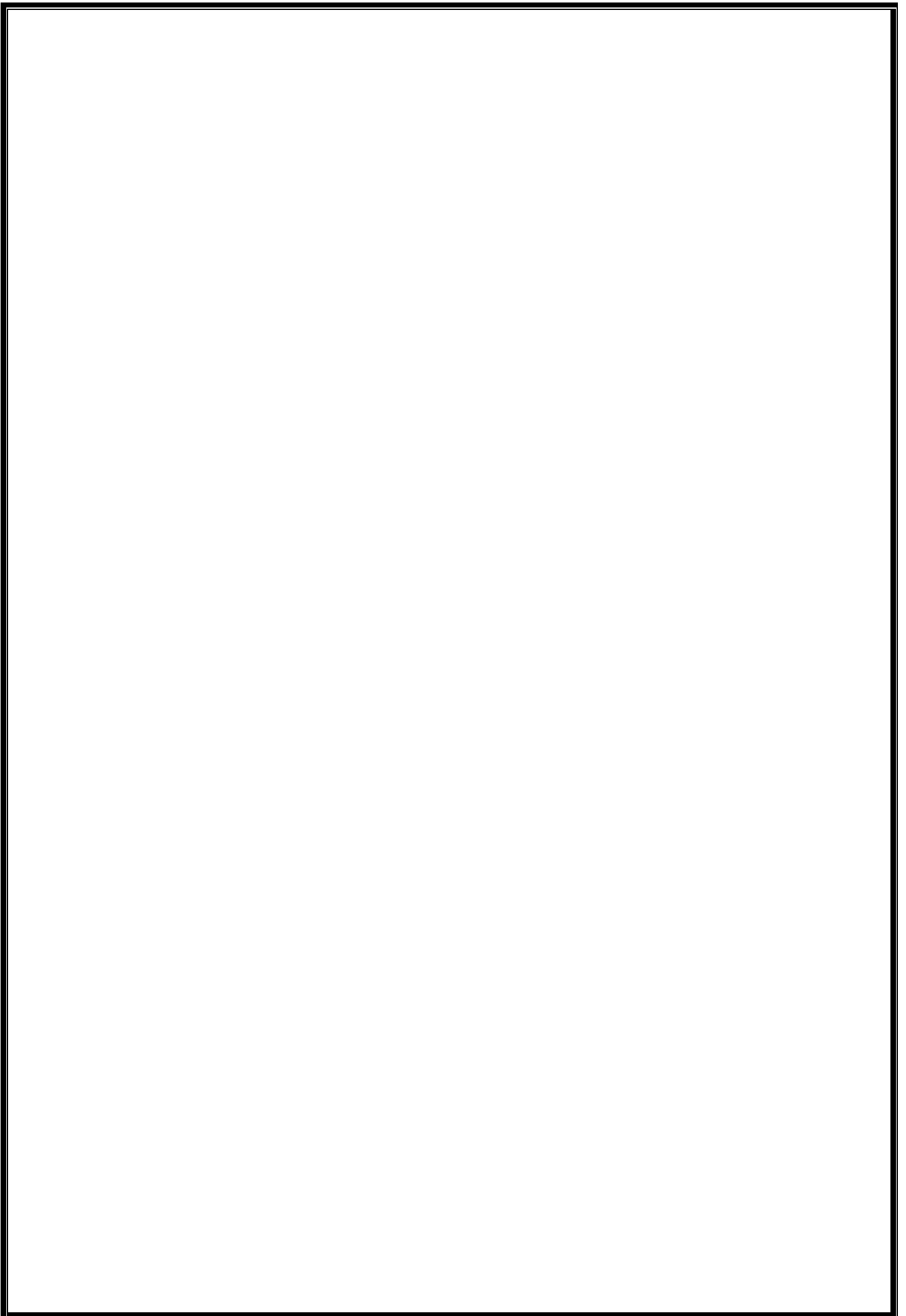
**Etude et Conception d'un démultiplexeur 8
canaux à cristaux photoniques bidimensionnels**

Soutenu publiquement le: 17 / 06 / 2018

Devant le jury composé de:

KHEDROUCH Djamel	Président	Docteur	Univ. M'sila
HOCINI Abdesselam	Rapporteur	Professeur	Univ. M'sila
KHAHLOUCHE Ahmed	Examineur	Docteur	Univ. M'sila

Année universitaire: 2017 / 2018



Remerciements

Je remercie tout d'abord dieu pour m'avoir aidé à terminer
cette mémoire

Je remercie mes parents pour leur soutien continu, leur
esprit motivateur et tous les sacrifices qu'ils ont faits afin
que je puisse réaliser ce projet.

Je tiens à remercier l'ensemble des enseignements qui ont
contribué de près ou de loin à notre formation

Je remercie mon encadreur : le prof. **Abdesselam
HOCINI** pour sa précieuse contribution et sa patience
qu'il a fait preuve durant toute la période de préparation
de cette mémoire. Qu'il trouve ici ma bonne gratitude
envers lui

Je tiens à remercier aussi **Riad MOKHTARI** et
Mouhssin MAACHE pour l'aide et l'effort qu'ils ont
déployé pour m'aider à terminer le sujet de cette mémoire.

Je remercie aussi tous les étudiants de la faculté
d'électronique en générale et les étudiants en master 2 en
particulier.

Table des matières

CHAPITRE I : Généralité sur les cristaux photoniques

Introduction générale.....	1
I .1. Introduction.....	3
I .2. Généralités sur les cristaux photoniques	3
I .2.1. Historique sur les cristaux photoniques	3
I.2.2. Définition	4
I .2.3. Les cristaux photoniques naturels.....	4
I. 2.4. Analogie électron- photon	5
I.4. Les types des cristaux photoniques	6
I .4.1. Les cristaux photoniques unidimensionnels	6
I.4.2. Les cristaux photoniques bidimensionnels	7
I.4.3. Différentes familles de cristaux photoniques bidimensionnelles	8
I.4.4. Les cristaux photoniques tridimensionnels	8
I.5. Caractéristiques géométriques et physiques d'un cristal photonique	9
I.5.1. Le contraste d'indice D_n	9
I.5.2. Les périodes.....	9
I.5.3. Le facteur de remplissage f	10
I.6. Les types de défauts en cristaux photonique.....	10
I.6.1. Les défauts ponctuels	10
I.6.2. Les défauts étendus.....	11
I .7. Cristal photonique 2D - Diagramme de bandes.....	12
I.8. Les applications des cristaux photoniques	13

Chapitre II : Guide et cavité

II.1.Introduction	18
II.2. Les cavités en cristaux photoniques	18
II.2.1.Définition.....	18
II.2.2. Les différents types de cavités	19
II.2.3. Cavité hexagonale.....	19
II.2.4. Cavité carré.....	20
II.2.5.Cavité triangulaire	21
II.2.6. Cavité rectangulaire.....	21
II.3. Guides d'ondes dans les cristaux photoniques	22
II .3.1. Guide à cristal photonique	22
II .3.2. Les cristaux photoniques 2D en géométrie guide d'onde	23
II.4. Différents types des guides d'ondes	24
II.4.1. Guide d'onde linéique	24
II.4.2. Guide d'onde courbée	26
II.5. Principe de test des guides à cristaux photoniques	27
II.5.1. Couplage cavité / guide dans un cristal photonique 2D.....	28
II.6.1. Filtres	30
II. 6. 2. Un démultiplexeur pour les longueurs d'ondes 1,31 μm et 1,55 μm	30
II.7. Conclusion.....	31

Chapitre III : Méthodes numériques et outils de simulation

III.1.Introduction	32
III.2. Présentation du logiciel Rsoft CAD	32
III.2.1. Environnement de CAD	32
III.2.2. Le simulateur « BandSOLVE».....	32
III.2.3. Le simulateur Full WAVE.....	33
III.3. Les étapes de simulation.....	34
III.3.1. Créer un nouveau circuit	35
III.3.2. Générer la structure de réseau	36
III.3.3. Régler les paramètres globales	37
III.3.4. Définition des variables	38
III.3.5. Vérifier la structure.....	39

III.3.6. création d'un guide d'onde droit	39
III.3.7. Réglage des paramètres de simulation.....	40
III.3.8. Lecture des résultats.....	41
III.4. Diagramme des bandes	42
III.6. Conclusion	43

Chapitre IV : Résultat et interprétation

IV.1. Introduction	44
IV.2. Etude de cavités à Cristaux Photoniques 2D	44
IV.2.1. Cavités hexagonales	44
IV.2.2. Etude de la cavité H ₁ pour un défaut lacunaire	45
IV.3. Etude de la cavité H ₁ pour un défaut de substitution	46
IV.3.1. Variation du rayon de la maille centrale (r)	46
IV.4.2. Variation de l'indice de réfraction de la maille centrale	47
IV.4. Etudes des guides à cristaux photoniques.....	50
IV.5. Etude d'un démultiplexeur à cristal photonique	50
IV.6. Conclusion	56
Conclusion générale	57

Liste des figures

Chapitre I : Généralité sur les cristaux photoniques

Figure I.1 : Représentation schématique de cristaux photoniques unidimensionnels (1D), Bidimensionnel (2D) et tridimensionnel (3D)4

Figure I.2 : une vue microscopique d'une structure de cristal photonique naturel : (a) opale, (b) papillons, (c) plume.....5

Figure 1.3 : Analogie entre les ondes d'électrons dans un potentiel périodique et les ondes lumineuses dans un environnement diélectrique variable périodiquement.....6

Figure 1.4 : Structure périodique 1D7

Figure I.5 : Structures bidimensionnelles : (a) connectée, (b) déconnectée8

Figure I.6 : Décomposition du champ électromagnétique suivant ses deux polarisations TE et TM8

Figure I.7 : Structure 2D : (a) Structure carrée, (b) triangulaire9

Figure I.8 : Structure hexagonal 2D : (a) Nitrure de Bore, (b) graphite9

Figure I.9 : Représentation de structure yablonovite10

Figure I.10 : Différentes structures 3D : structure cubique (1), le tas de bois (2), la structure multicouches (3), les opales ou opales inversées (4) et la Yablonovite (5)11

Figure I.11 : Les périodes d'un cristal photonique unidimensionnel12

Figure I.12 : (a) Réseau triangulaire avec sa première zone de Brillouin, (b) Réseau carré avec sa première zone de Brillouin13

Figure I.13 : Diagramme de bande d'un BIP 2D13

Figure I.14 : Défauts ponctuels : (a) Défaut lacunaire, (b) et (c) Défauts de substitutions14

Figure I.15 : Exemple de guide W1 a cristal photonique14

Chapitre II : Guide et cavité

Figure II.1 : Quelques exemples des types de cavités à défauts ponctuels16

Figure II.2 : Représentation fréquentielle de l'intensité Lorentzienne d'un mode dans la cavité centré à la fréquence ω_0 17

Figure II.3 : Exemples de cavités de types H_n : (a) cavité H_0 , (b) cavité H_1 , (c)cavité H_4 19

Figure II.4 : Signatures spectrales de cavités hexagonales19

Figure II.5 : Exemples de cavités de types L_n : (a) cavité L_3 , (b) cavité L_5 , (c)cavité L_7 20

Figure II.6 : Exemple de cavité carrée dans un cristal photonique a réseau carré20

Figure II.7 : (a) Exemple de cavité triangulaire dans un cristal photonique triangulaire avec un paramètre de maille 600nm, (b) Spectre de photoluminescence d'une cavité triangulaire dans un cristal photonique triangulaire de trous d'air (Paramètre de maille $a = 600\text{nm}$, rayon $r = 200\text{nm}$) plongé dans une matrice diélectrique ($\epsilon=8.12$)21

Figure II.8 : Guide crée dans un cristal photonique bidimensionnel de réseau triangulaire en omettant quelques lignes de trous. (a) Propagation et schémas du profil de l'intensité dans le cas où le guidage se fait par BIP, (b) Propagation et schémas du profil de l'intensité dans le cas où le guidage est réfractif22

Figure II.9 : Représentation réelle d'un guide d'onde de largeur W à base d'un CP2D23

Figure II.10 : Exemple de guides d'ondes dans un cristal photonique hexagonal. (a) guide obtenu par retrait d'une rangée de motifs dans la direction ΓM , (b) guide obtenu par retrait d'une rangée de motifs dans la direction Γk 23

Figure II.11 : Virage réalisé dans un cristal photonique bidimensionnel24

Figure II.12 : Cartographie du champ électrique lorsque une onde électromagnétique se propage dans un guide d'onde faisant un virage à 90° dans un cristal photonique24

Figure II 13 : Dispositif associant guide et cavité d'un même cristal photonique bidimensionnel25

Figure II.14 : schéma d'un démultiplexeurs a cristaux photoniques	26
Figure II. 15 : Résultats de la simulation FDTD d'un démultiplexeur en longueur d'onde : (a) longueur d'onde $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$, (b) longueur d'onde $\lambda = 1,31 \mu\text{m}$	26
Figure II.116 : schéma d'un démultiplexeurs	27
Figure II.17 : Simulation d'un démultiplexeur en longueur d'onde 1530, 1550, 1570 et 1590 nm, respectivement	28

Chapitre III : Méthodes numériques et outils de simulation

Figure III.1 : La fenêtre de programme de R Soft CAD montrant la barre de menus au-dessus, les barres des outils supérieurs à gauche, et la ligne d'état au fond	30
Figure III.2 : La fenêtre de démarrage	31
Figure III.3 : Nouvelle fenêtre pour réaliser un nouveau composant ou nouveau circuit	32
Figure III.4 : (a) Arrangements de disposition de la rangée XZ, (b) Disposition de rangée dans la fenêtre de CAD	33
Figure III.5 : Fenêtre des paramètres globaux du circuit	33
Figure III.6 : l'éditeur du Tableau de symboles	34
Figure III.7 : Profil d'indice de la structure à cristaux photoniques 2D	34
Figure III.8 : La fenêtre de paramètres de simulation de BandSOLVE	35
Figure III.9 : La fenêtre de paramètres de simulation de Full WAVE	35
Figure III.10 : guide d'onde droit W1.....	36
Figure III.11 : cavité d'onde droite S1	37
Figure III.12 : Diagramme des bandes pour les modes TE et TM	38

Chapitre IV : Résultat et interprétation

Figure IV.1 : la band interdit photonique d'un CP2D à réseau carré de paramètre de maille $a=546\text{nm}$ constitué des tiges de rayon $r=0.185a$ silicium en polarisation TE.39

Figure IV.2 : Structure de cavité S140

Figure IV.3 : Variation de la longueur d'onde de résonance et facteur de qualité en fonction de la variation du rayon de la tige centrale42

Figure IV.4 : spectre de transmission des Canaux en fonction de la variation du rayon de la tige centrale43

Figure IV.5 : Propagation de la lumière à l'intérieur du guide.44

Figure IV.6 : Structure d'un démultiplexeur a deux canaux pour un défaut substitutionnel de $\lambda_1=1.5097$ et $\lambda_3=1.5163$ 44

Figure IV.7 : Structure d'un démultiplexeur a quatre canal pour un défaut substitutionnel pour $\lambda_1=1.5097$, $\lambda_3=1.5163$, $\lambda_5=1.5232$ et $\lambda_7=1.5304$ 45

Figure IV.8 : Structure d'un démultiplexeur a six canaux pour un défaut substitutionnel pour $\lambda_1=1.5097$, $\lambda_3=1.5163$, $\lambda_4=1.5193$, $\lambda_5=1.5232$, $\lambda_6=1.5267$ et $\lambda_8=1.5338$ 46

Figure IV.9 : Structure d'un démultiplexeur a huit canaux pour un défaut substitutionnel pour : $\lambda_1=1.5097$, $\lambda_2=1.5124$, $\lambda_3=1.5163$, $\lambda_4=1.5193$, $\lambda_5=1.5232$, $\lambda_6=1.5267$, $\lambda_7=1.5304$ et $\lambda_8=1.5338$46

Figure IV.10 : La propagation de la lumière dans un démultiplexeur a deux canaux pour : $\lambda_1=1.5097$ et $\lambda_3=1.5163$ 47

Figure IV.11 : La propagation de la lumière dans un démultiplexeur a quatre canaux pour : $\lambda_1=1.5097$, $\lambda_3=1.5163$, $\lambda_5=1.5232$, $\lambda_7=1.5304$ 48

Figure IV.12 : La propagation de la lumière dans un démultiplexeur a six canaux pour : $\lambda_1=1.5097$, $\lambda_3=1.5163$, $\lambda_4=1.5193$, $\lambda_5=1.5232$, $\lambda_6=1.5267$ et $\lambda_8=1.5338$ 49

Figure IV.13 : La propagation de la lumière dans un démultiplexeur a huit canaux pour : $\lambda_1=1.5097$, $\lambda_2=1.5124$, $\lambda_3=1.5163$, $\lambda_4=1.5193$, $\lambda_5=1.5232$, $\lambda_6=1.5267$, $\lambda_7=1.5304$ et $\lambda_8=1.5338$ 50

Introduction générale

Depuis quelques années, les recherches se sont orientées vers le comportement des photons au lieu des électrons dans le but de contrôler la propagation de la lumière et donc d'offrir la possibilité d'empêcher ou de permettre, dans certaines plages de fréquences et dans une ou plusieurs directions. La recherche des scientifiques comme, Yablonovitch [1] et John [2] (1987) a abouti à la réalisation et caractérisation d'une nouvelle génération de matériaux : les cristaux photoniques.

Les cristaux photoniques (CPs) sont des matériaux nanostructurés dans lesquels on a créé une alternance périodique des indices de réfraction [3]. Suivant le type de structuration, on distingue des CPs unidimensionnels (1D), bidimensionnels (2D) ou tridimensionnels (3D). La réalisation des cristaux photoniques unidimensionnels et bidimensionnels est relativement ancienne, celle des réseaux tridimensionnels est plus récente [4]. Cependant, Les chercheurs ont porté leur attention principale sur les CPs-2D, du fait de leur fabrication la plus facile et leur coût moindre par rapport aux structures 3D. A l'image des électrons dans les semi-conducteurs, les photons y sont répartis en bandes de transmission séparées par des bandes d'énergies interdites. Cette analogie permet d'envisager l'utilisation des cristaux photoniques comme matériaux de base pour la réalisation de composants pour l'optique intégrée. La plupart des recherches mettent à profit la bande interdite photonique mais les propriétés originales des bandes de transmission peuvent être aussi utilisées[2-4].

Connus depuis longtemps, les CPs font toujours l'objet de nombreuses études et développements en vue d'applications pratiques importantes, parmi lesquelles on peut citer la construction de miroirs à très haute réflectivité, très utiles pour l'amélioration de l'émission de lumière par les lasers, la construction de guides d'ondes à faible perte permettant de canaliser la lumière dans les dispositifs optoélectroniques utilisés en télécommunications, le piégeage de la lumière dans les cellules solaires, et récemment, la conception miniaturisée des capteurs de grande sensibilité [3].

L'application des cristaux photoniques en tant que démultiplexeur constitue un domaine de recherche très prometteur en raison de leur extrême miniaturisation, leur meilleur confinement de la lumière et leur intégration possible.

Le démultiplexeur à cristaux photoniques représente un élément fondamental pour les chaînes de la télécommunication optique. Pour cela, Nous étudions la propagation des ondes dans les structures à base de couplage guide à cristaux photoniques et cavité dans le but de réaliser des

démultiplexeurs à l'aide de logiciel FullWAVE et leur rôle dans le confinement de la lumière pour les composantes optiques.

Le présent manuscrit est structuré en quatre chapitres répartis comme suit :

Dans le premier chapitre, nous commencerons par des notions générales sur les cristaux photoniques. Après un bref rappel sur le phénomène d'ouverture de bandes interdites et les différents types de cristaux photoniques, nous focaliserons notre étude sur les cristaux bidimensionnels (CPs-2D). Nous continuerons par une présentation des principaux défauts qui existent au niveaux des cristaux photoniques. Enfin, Nous terminerons ce chapitre par quelques applications des cristaux photoniques dans les domaines des optiques, microondes et télécommunications.

Le deuxième chapitre comporte une représentation de base lies aux principes de guidage et les différents types de guides à cristaux photoniques et de cavités à base de CPs-2D ainsi que l'influence des paramètres géométriques sur les microcavités seront décrits. Dans la dernière section du chapitre, nous présenterons quelques classes de démultiplexeur à cristaux photoniques (cavités couplées au guide d'onde).

Dans le troisième chapitre, nous allons voir les outils numériques nécessaires à l'étude des cristaux photoniques. Nous avons utilisé les logiciels de simulation BandSOLVE et FullWAVE basés sur la méthode des ondes planes (PWE) la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD) respectivement, ces deux méthodes reposent sur la résolution des équations de Maxwell.

Dans le dernier chapitre de cette mémoire, nous commençons en premier lieu à l'étude de cavitéS1 à cristaux photoniques (résonance, transmission, facteur de qualité) en fonction de rayon r de tige centrale. Puis après l'étude de cavité S1, notre intérêt est porté sur une étude numérique des guides d'ondes à cristaux photoniques. Dans la dernière partie du chapitre, nous tenterons d'améliorer la transmission et la propagation de la lumière dans une structure proposée de démultiplexeur à base du couplage guide-cavité.

Enfin, nous terminerons notre travail par une conclusion général.

I.1 Introduction

Les matériaux artificiellement structurés "cristaux photoniques (CPs)" ont suscité un grand intérêt dans plusieurs travaux de recherches, c'est une branche récente et prometteuse de l'optique. Les cristaux photoniques également connus sous le nom de structures à bandes interdites photoniques (BIP), ces structures offrent la possibilité de contrôler la propagation de la lumière. Les cristaux photoniques sont des structures dont le constant diélectrique varie de manière périodique à l'échelle de la longueur d'onde, sur une ou plusieurs directions de l'espace (1D, 2D et 3D).

Ce premier chapitre est une introduction générale sur les cristaux photoniques. Nous débutons par un historique retraçant l'origine des cristaux photoniques et la définition des cristaux photoniques. Nous continuerons par une présentation des différents types de cristaux photoniques et les caractéristiques de cristaux photoniques ainsi que les différents types de défauts existant. Nous terminons ce premier chapitre par quelques applications des CP dans les domaines d'optique et télécommunications.

I.2 Généralités sur les cristaux photoniques

I.2.1 Bref historique sur les cristaux photoniques

La naissance des structures photoniques provient de l'optique. Pendant les dernières décennies que les cristaux photoniques ont attiré une grande attention, les premières hypothèses sur la possibilité de contrôler la propagation de la lumière utilisant des structures périodiques se rapportent à 1887 avec les travaux de Lord Rayleigh. En 1922, le physicien anglais Sir William Lawrence Bragg a développé le miroir de Bragg. Ce miroir est une succession de surfaces planes transparentes d'indices de réfraction différents. Il permet de réfléchir, grâce aux phénomènes d'interférences constructives, 99.5% de l'énergie incidente ce qui est impossible avec un miroir classique. Ce n'est qu'en 1987 qu'Eli Yablonovitch[5] proposa d'étendre le concept des miroirs de Bragg aux fréquences microondes et ce pour des incidences quelconques.

En 1991, Eli Yablonovitch réalisa le premier cristal photonique artificiel fonctionnant aux longueurs d'onde centimétriques. Ce cristal artificiel, réalisé dans un bloc de plexiglas usiné dans trois directions différentes séparées de 120° de façon à reproduire la structure du diamant, est appelé **Yablonovite**[6]

I.2.2 Définition

Les cristaux photoniques sont des structures périodiques dont le motif du réseau est composé de matériaux diélectriques ou de métallos diélectriques ou de la combinaison des deux et cela dans de multiples configurations : unidimensionnelle (1D), bidimensionnelle (2D) ainsi que tridimensionnelle (3D) (Figure I.1).

Les cristaux photoniques ouvrent la voie à la réalisation de nombreuses fonctions optiques grâce aux possibilités de confinement de la lumière qui pourraient révolutionner la fabrication des circuits intégrés optoélectroniques. La majorité des applications des cristaux photoniques repose sur leur bande interdite photonique. Il est nécessaire d'introduire des défauts dans la structure périodique afin de disposer d'une fréquence permise dans la bande interdite.

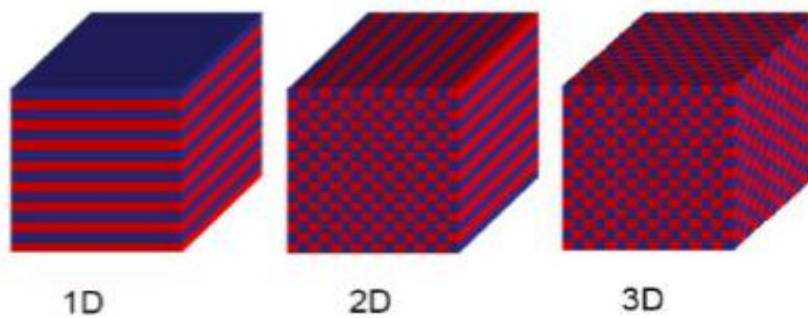
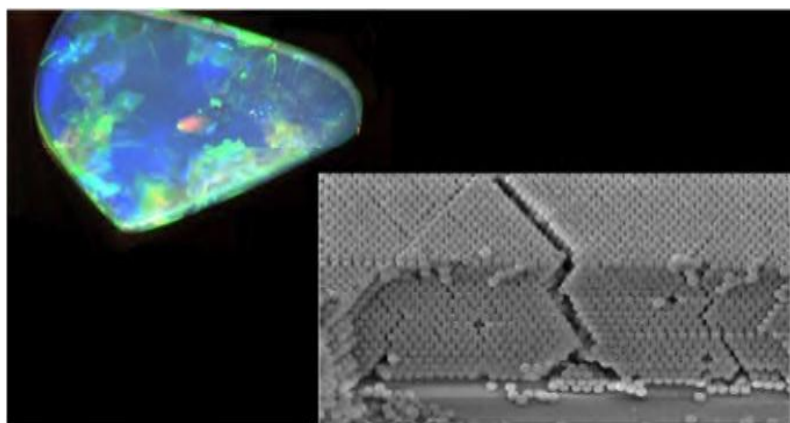


Figure I.1 : Représentation schématique de cristaux photoniques unidimensionnels (1D), Bidimensionnel (2D) et tridimensionnel (3D).

I.2.3 Les cristaux photoniques naturels

Il existe des structures naturelles qui peuvent avoir des propriétés ayant les mêmes caractéristiques que les cristaux photoniques artificiels. En effet, certaines espèces animales [7,8] et minérales fabriquent et utilisent ces structures à des fins esthétiques et stratégiques depuis bien longtemps (Figure I.2) et ce n'est finalement que très récemment que l'homme y a trouvé un intérêt intellectuel.

On distingue plusieurs genres de cristaux photoniques, les plus parfaits sont les cristaux photoniques naturels trouvés généralement dans l'opale qui est une roche minérale constitué de microbilles de silice répartie selon un arrangement plus au moins régulier (Figure I.2(a)) [9]. De même dans les ailes d'insectes telles que les papillons (Figure I.2(b)) ou oiseaux (figure I.2(c)).



(a)



(b)



(c)

Figure I.2 : une vue microscopique d'une structure de cristal photonique naturel :
 (a) opale, (b) papillons, (c) plume.

I.2.4 Analogie électron- photon

Dans les semi-conducteurs, la périodicité atomique empêche la propagation des électrons selon certaines énergies situées dans une zone appelée bande interdite [10]. Si le potentiel cristallin est assez important, ce gap s'étend à toutes les directions, on parle alors de bande interdite complète (c'est le cas des semi-conducteurs, qui possèdent une bande interdite complète entre la bande de valence et la bande de conduction).

L'analogie optique est le cristal photonique, dans lequel on a une alternance périodique de matériaux diélectriques macroscopiques qui conduit à une variation périodique de l'indice optique. Si les constantes diélectriques des matériaux sont suffisamment différentes, et si l'absorption de la lumière y est faible, on assiste alors aux mêmes phénomènes pour les photons que pour les électrons dans un réseau cristallin [11], la lumière ne pouvant pas se propager pour certaines longueurs d'onde. On parle alors de Bande Interdite Photonique (BIP).

La comparaison entre un électron dans un potentiel atomique et un photon dans une structure périodique est représentée. Analogue aux mécanismes dans un semi-conducteur, dans des cristaux photoniques.

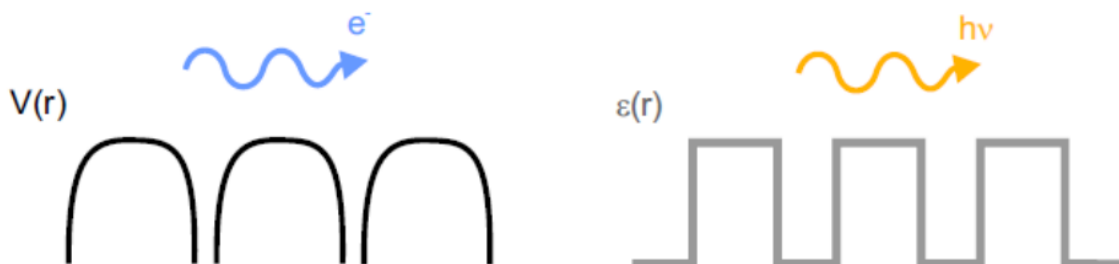


Figure 1.3 : Analogie entre les ondes d'électrons dans un potentiel périodique et les ondes lumineuses dans un environnement diélectrique variable périodiquement [12].

I.3 Les différents types de cristaux photoniques

Il existe différents types de cristaux photoniques qui sont classés selon leur dimensionnalité, Le cristal photonique peut être :

- à une dimension 1D (empilement de couches minces, réseau de Bragg).
- à deux dimensions 2D (réseau de trous sur une surface).
- à trois dimensions 3D (empilement de couches formées de billes de silices auto assemblées).

I.3.1 Les cristaux photoniques unidimensionnels 1D

Les matériaux à bandes photoniques interdites unidimensionnels (1D) possèdent une permittivité électrique périodique dans une direction et uniforme dans les deux autres directions. La figure I.4 montre qu'ils consistent en un empilement de deux couches alternées de matériaux homogènes ayant d'indice de réfraction N différentes. Ces structures existent depuis longtemps et sont utilisées en optique pour obtenir des miroirs sans pertes (miroirs de Bragg) ou des filtres [13].

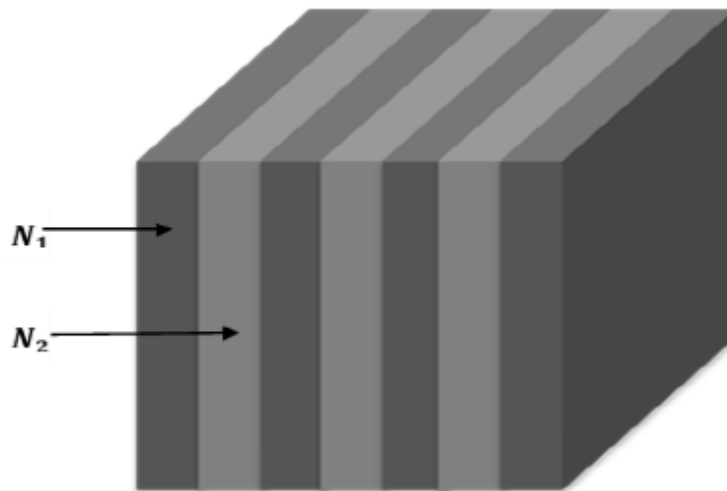


Figure 1.4 : Structure périodique 1D.

I.3.2 cristaux photoniques bidimensionnelles 2D

Les difficultés de fabrication des structures 3D ont conduit à envisager la réalisation et l'étude de structures 2D qui peuvent être fabriqués facilement. Un cristal photonique 2D appelé aussi le réseau de trous est une structure présentant une périodicité de l'indice dans deux directions de l'espace définissant ainsi un plan de périodicité.

Il existe deux types de structures périodiques diélectriques :

- ❖ **Les structures dites « déconnectées » (Figure I.5.a) :** les motifs élémentaires sont d'indice n_1 supérieur à l'indice n_2 de l'espace inter motifs. Elles sont constituées de tiges diélectriques ou métalliques alignées périodiquement dans l'air.
- ❖ **Les structures dites « connectées » (Figure I.5.b) :** les motifs élémentaires sont d'indice n_1 inférieur à l'indice n_2 de la matrice diélectrique.

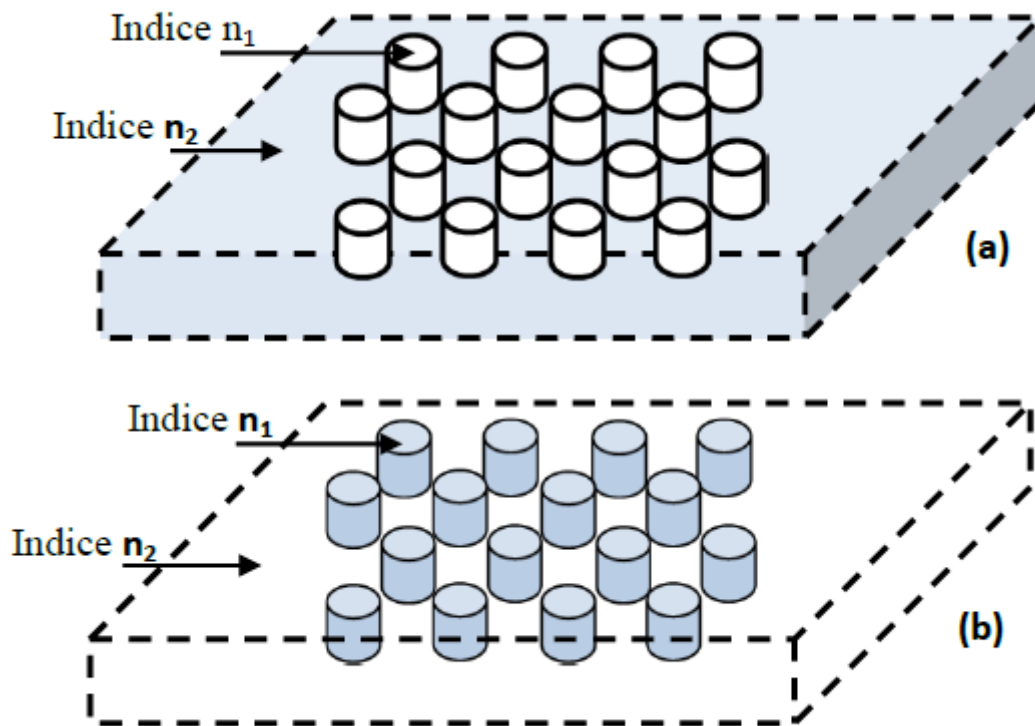


Figure I.5 : Structures bidimensionnelles : (a) connectée, (b) déconnectée.

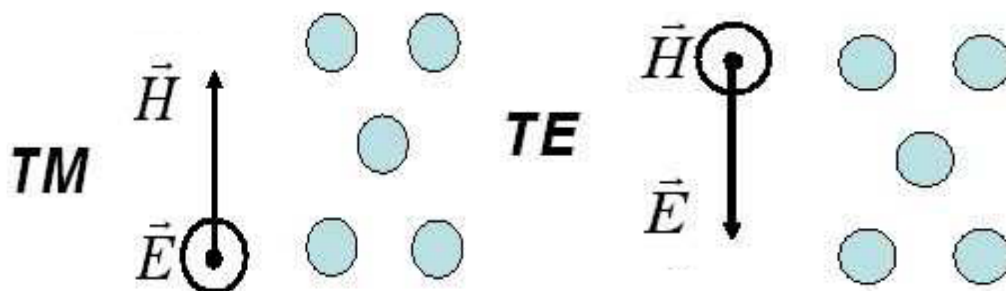


Figure I.6 : Décomposition du champ électromagnétique suivant ses deux polarisations TE et TM [12].

Dans le cas des réseaux bidimensionnels, il faut considérer deux directions de propagation au lieu d'une seule pour les unidimensionnels. Il existe deux types de polarisations possibles pour les ondes électromagnétiques. La polarisation Transverse Electric (TE) lorsque le champ magnétique est parallèle à l'axe des trous (des tiges), ou Transverse Magnétique (TM) lorsque le champ électrique est parallèle à l'axe des trous (des tiges) (Figure 1.6), les bandes énergétiques permises ou interdites seront différentes. Il existe donc une bande interdite TE et une bande interdite TM lorsque les bandes interdites photoniques pour les polarisations TE et TM se recouvrent, on parle alors de bande interdite complète. Un

cristal photonique peut également présenter une bande interdite pour l'une des polarisations mais pas pour l'autre [14].

I.3.2.1 Différentes familles de cristaux photoniques bidimensionnels

On distingue trois principales familles de matériaux à BIP bidimensionnelle selon la forme du réseau périodique à deux dimensions :

- **Le réseau carré** : La maille primitive est un carré de côté a (Figure I.7.a)
- **Le réseau triangulaire** : La maille primitive est un triangle équilatéral de côté a (Figure I.7.b).

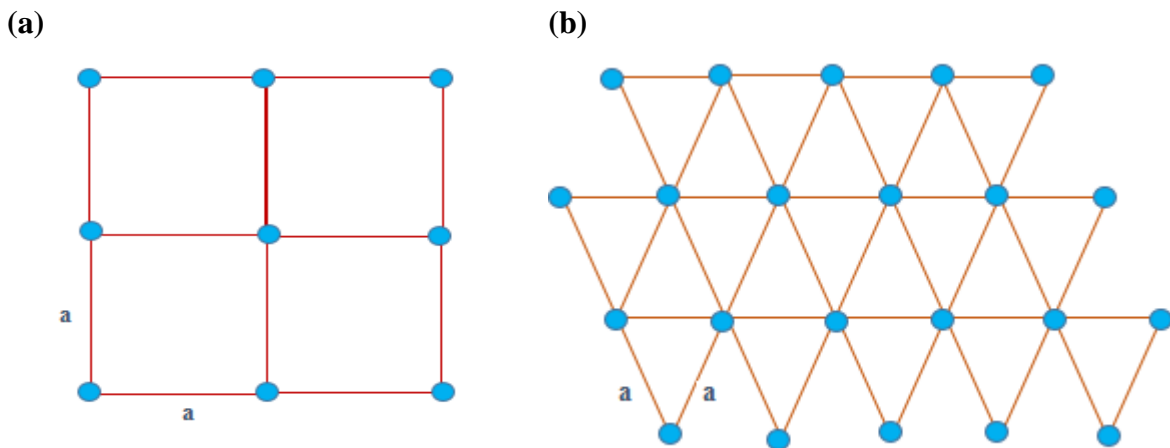


Figure I.7 : Structure 2D : (a) Structure carrée, (b) triangulaire

- **Le réseau hexagonal** :
 - **La structure nitrure de Bore** : Si un nœud diffère de son suivant par sa nature ou sa dimension, on obtient ainsi la structure cristalline du Nitrure de Bore (Figure I-8) .
 - **La structure graphite** : Dans cette structure tous les nœuds sont identiques et espacés de “ a ”, elle est similaire à la structure cristalline du graphite (Figure I.8) [15].

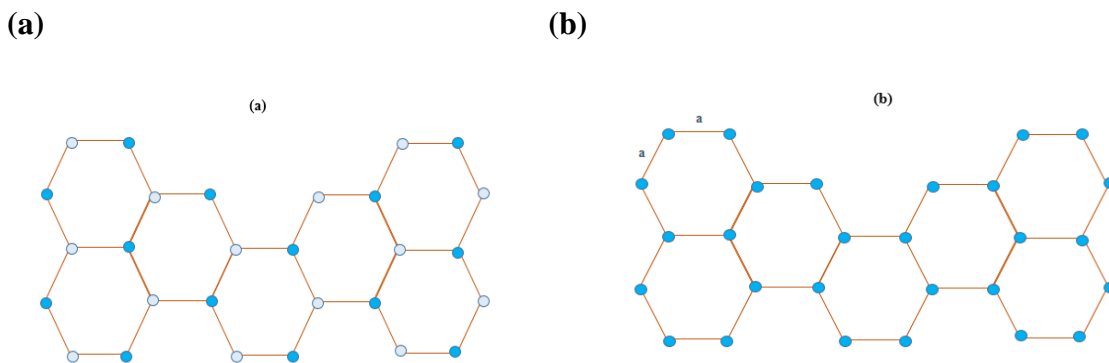


Figure I.8 : Structure hexagonal 2D : (a) Nitrure de Bore, (b) graphite.

I.3.3 Les cristaux photoniques tridimensionnels 3D

Les cristaux photoniques tridimensionnels sont des structures dont la constante diélectrique est structurée périodiquement dans les trois directions. Elles ont été les deuxièmes à réalisés par Yablonovitch après les structures 1D. Les structures 3D sont les premières structures étudiées avec les structures 1D ou 2D. L'objectif était d'obtenir des structures 3D fonctionnant sur les mêmes principes que les structures 1D mais possédant une bande interdite photonique complète c'est-à-dire dans toutes les directions de l'espace. En 1991 E. Yablonovitch fabriquait un cristal photonique 3D en perçant des trous dans un bloc de plexiglas selon trois angles azimutaux. Ce cristal photonique s'appelle d'après son inventeur (la Yablonovite) [6]. Avec ce cristal photonique, le concept de la bande interdite photonique a été démontré expérimentalement pour la première fois.

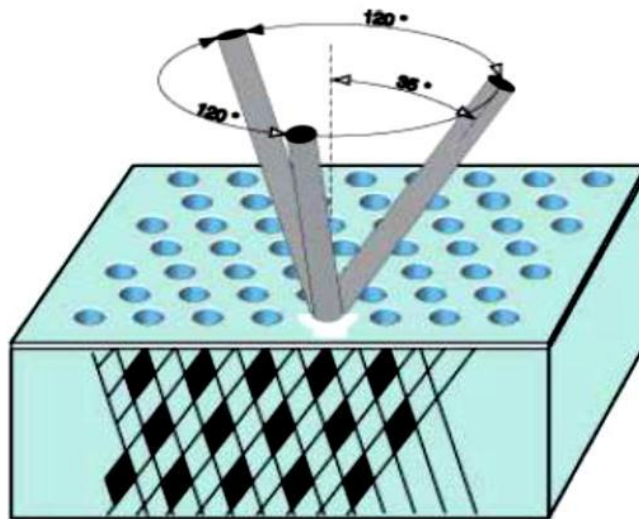


Figure I.9 : Représentation de structure yablonovite.

Il existe une infinité de géométries possibles pour des structures tridimensionnelles. Mais seulement quelques-unes présentent une bande photonique interdite complète. La plupart des structures tridimensionnelles sont inspirées de la géométrie de la structure du diamant (face cubique centrée). La symétrie cubique à face centrée (CFC) possède deux atomes par maille et permet l'ouverture d'une bande interdite complète. Elle est représentée pour une structure d'un réseau diamant de sphères d'air dans un diélectrique à haute permittivité ($\epsilon = 13$), elle est réalisée dans le domaine des micro-ondes pour des raisons évidentes de contraintes technologiques plus faibles que dans le domaine de l'optique. En plus de la Yablonovite, elle existe une autre structure 3D appelée tas de bois, cette dernière est un empilement de tiges diélectriques rectangulaires ou circulaires. Les deux niveaux consécutifs

sont perpendiculaires et les deux plans consécutifs de tiges parallèles sont décalés d'une demi-période. Quelques structures de type tas de bois ont été réalisées dans le domaine des micro-ondes soit avec des tiges d'aluminium, soit avec du silicium grâce à l'empilement des grilles gravées les unes sur les autres avec un pivotement de 90° à chaque étage et en respectant l'alignement de l'ensemble [16].

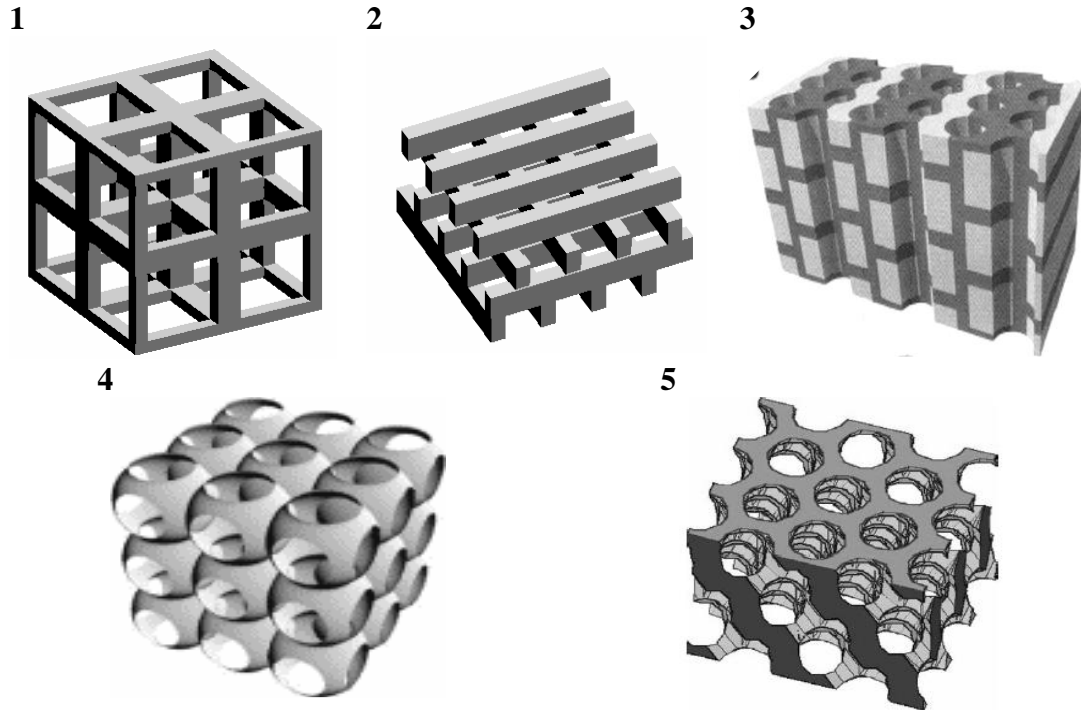


Figure I.10 : Différentes structures 3D [17] : structure cubique (1), le tas de bois (2), la structure multicouches (3), les opales ou opales inversées (4) et la Yablonovite (5).

I.4 Caractéristiques géométriques et physiques d'un cristal photonique

I.4.1. Le contraste d'indice Δn

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.01) :

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_{\text{Substrat}} - \varepsilon_{\text{trou}} \quad (\text{I.01})$$

I.4.2 Le facteur de remplissage f

Peut être comparé au largeur du potentiel périodique. S'il est pris pour le matériau de haut indice par exemple, il est défini comme le rapport entre le volume occupé par ce matériau dans la cellule élémentaire du cristal et le volume de cellule de cette dernière. L'influence de ces différents paramètres sur le comportement d'une structure photonique peut être comprise

par analogie avec un potentiel périodique induit de l'arrangement des atomes dans un semi-conducteur.

I.4.3 Les périodes

Ces paramètres géométriques choisis selon le domaine de fréquence étudié influent sur les caractéristiques de la bande interdite photonique. Par exemple pour un cristal photonique unidimensionnel, la période $a = (a_1 + a_2)$ avec a_1 l'épaisseur de la couche de permittivité ε_1 et a_2 l'épaisseur de la couche de permittivité ε_2

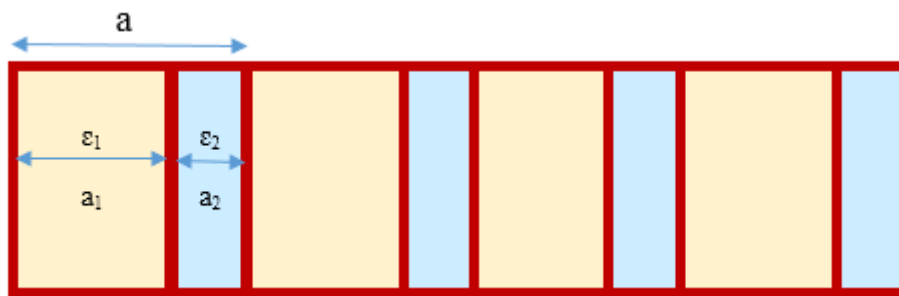


Figure I.11 : Les périodes d'un cristal photonique unidimensionnel

I.5 Bande interdite photonique 2D

Un cristal photonique est caractérisé par son diagramme de bandes, les bandes permises et interdites d'un CP se regroupent dans un diagramme de bandes photoniques sont des représentations des fréquences possibles pour l'onde électromagnétique au sein du CP en fonction de son vecteur d'onde (sa direction de propagation au sein du cristal). Afin d'expliquer le concept de diagramme de bandes photoniques, prenons le cas d'un CP 2D constitué par un réseau de cylindres dans une symétrie cubique (Figure 12).

A deux dimensions, les cristaux photoniques sont composés d'un réseau périodique de piliers de diélectrique dans l'air ou de trous d'air percés dans un diélectrique. Les deux réseaux les plus courants pour l'organisation des piliers (ou des trous) sont le réseau carré et le réseau triangulaire (ou hexagonal). Pour le réseau hexagonal, le réseau réciproque est un réseau triangulaire. Sa zone de Brillouin irréductible est un triangle rectangle de sommets Γ , K, M. il suffit de suivre l'évolution du vecteur d'onde k sur les trois côtés du triangle pour atteindre les extrema de $\omega(k)$. On peut alors tracer le diagramme de bande $\omega = f(k)$ qui représente les variations des fréquences permises dans le réseau en fonction de la projection du vecteur d'onde suivant les directions de haute symétrie de celui-ci[18].

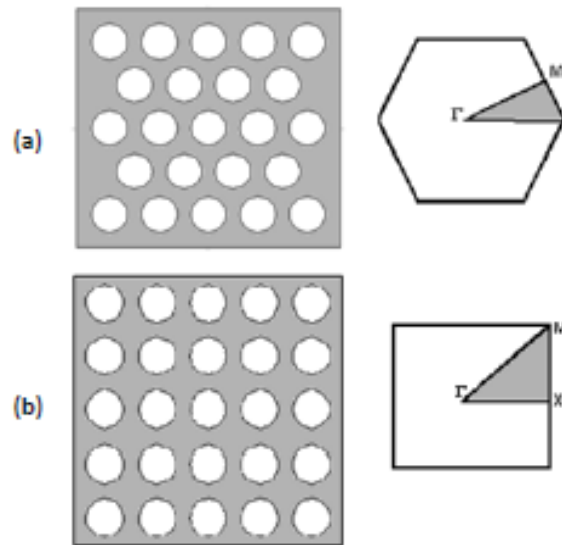


Figure I.12 : (a) Réseau triangulaire avec sa première zone de Brillouin,
 (b) Réseau carré avec sa première zone de Brillouin.

La Figure 13 montre le diagramme de bandes du CP pour une certaine direction de propagation de la lumière. Nous pouvons distinguer deux bandes permises (courbe Blue et rouge). L'onde électromagnétique pourra se propager dans le CP comme dans un milieu diélectrique homogène, si son énergie est contenue dans ces bandes permises. Ces deux bandes permises sont séparées par une bande interdite (région jaune) où aucune fréquence n'est autorisée.

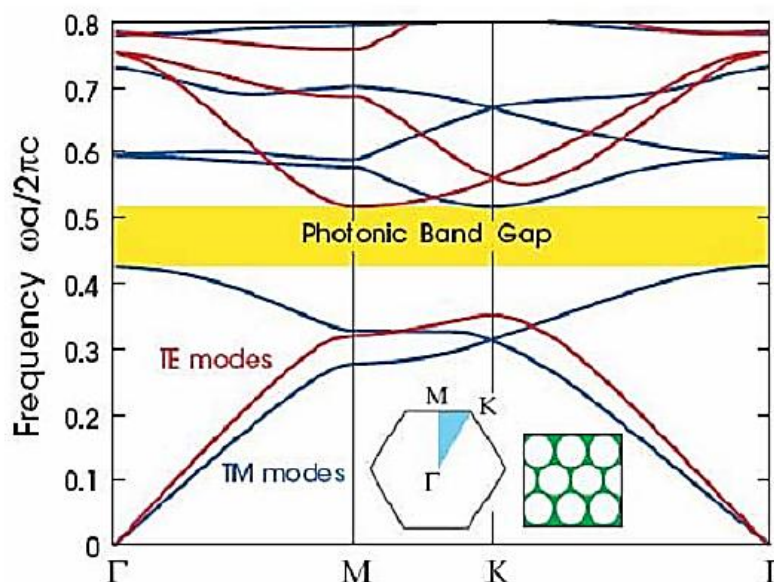


Figure I.13 : Diagramme de bande d'un BIP 2D

I.6 Les différents types de défauts

Plusieurs types de défauts sont réalisables et permettent de réaliser certaines applications telles que les filtres à haute sélectivité puisque seule l'onde électromagnétique dont la fréquence correspond à celle du mode permis sera transmise ou encore des filtres accordables. Une façon simple de créer un ou plusieurs modes permis dans le gap consiste à introduire un défaut dans le cristal, c'est-à-dire une imperfection dans l'arrangement périodique de la structure diélectrique. On distingue deux types de défaut :

I.6.1 Les défauts ponctuels

Les défauts ponctuels sont obtenus en modifiant les caractéristiques d'une cellule du réseau. Ces défauts se comportent comme des micro-résonateurs, on distingue deux types de défauts, lacunaires et de substitution.

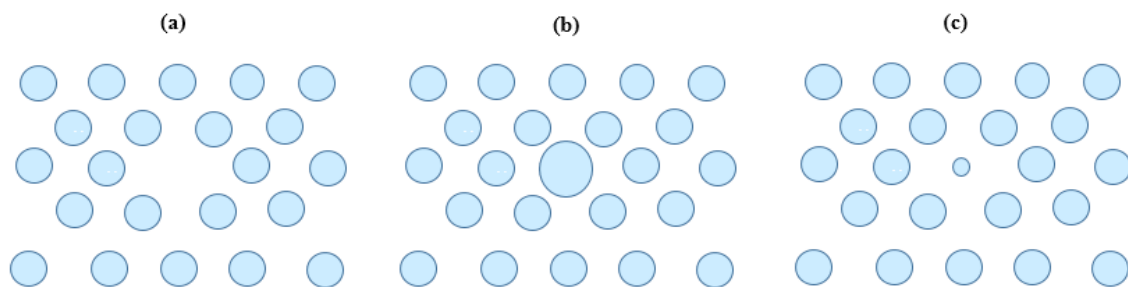


Figure I.14 : Défauts ponctuels : (a) Défaut lacunaire, (b) et (c) Défauts de substitutions

I.6.2 Les défauts linéaires

Le défaut linéaire c'est une ligne de trous qui a été omise (Figure I.15). La lumière ne pouvant pénétrer au sein du cristal photonique, elle est contrainte de se propager le long du défaut, on a ainsi réalisé un guide. Ce guide est appelé guide W1 car il est formé par l'omission de la gravure d'une ligne de trous. Les guides formés de l'omission de deux lignes de trous sont appelés W2, ceux de trois rangées de trous W3,....etc.

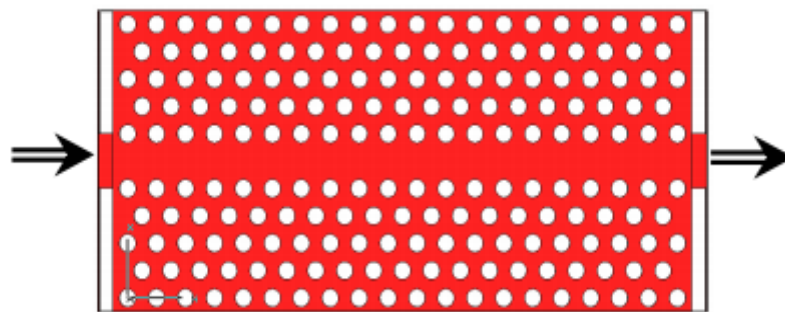


Figure I.15 : Exemple de guide W1 à cristal photonique.

I.7 Applications des cristaux photoniques :

Les applications des cristaux photoniques sont multiples et touchent de nombreux domaines. La plupart de ces applications sont en domaine optique, informatique, microonde et télécommunications. Nous allons décrire quelques exemples d'applications principales des cristaux photoniques tels que : cavités [19], guides d'ondes [20], filtres [21], capteurs [22], multiplexeurs/démultiplexeurs [23].

-Les multiplexeurs/démultiplexeurs. Le but est d'insérer ou d'extraire des longueurs d'onde bien précises.

-Les fibres à CP sont des guides permettant le guidage d'ondes lumineuses.

I.8 Conclusion

Un cristal photonique est un matériau généralement artificiel qui présente une périodicité spatiale du constant diélectrique, dans une, deux ou trois directions de l'espace. Ce nouveau type de matériau est capable de bloquer la propagation des ondes optique, élastiques ou acoustiques dans certaines directions de propagation. Dans ce chapitre, nous sommes rappelés les concepts fondamentaux et les notions de bases associées aux cristaux photoniques. Ensuite, dans le chapitre suivant, nous avons envisagé les différents types de cavités et guides d'onde à cristaux photoniques et présenté la théorie de couplage guide cavité.

II.1 Introduction

Un attrait majeur des cristaux photoniques 2D repose sur l'insertion de défauts au sein du cristal photoniques. Les géométries possibles peuvent aller de la modification de la taille, la position ou de l'indice d'un seul ou de certains motifs du cristal. Ces défauts peuvent générer des  tats permis aux fréquences de la bande interdite du cristal parfait et être ainsi le support d'un champ électromagnétique propagatif pour ces fréquences. L'utilisation de ces structures ouvre notamment dans recherches et permis une avancée considérable vers la miniaturisation des composantes optique intégrée et une amélioration de leurs performances.

Ce chapitre porte sur les principales notions concernant les cavités et les guides à cristaux photoniques bidimensionnels, notamment nous décrivons la géométrie des différents types de cavités (défauts ponctuels) et guides (défauts linéaire). Nous avons présenté les cavités et les guides à cristal photonique. Ensuite nous nous intéressés au couplage entre eux (couplage guide cavité) pour l'application en télécommunication optique, notamment les démultiplexeurs à cristaux photoniques et leurs types.

II.2 Les cavités en cristaux photoniques

Si un défaut unique est introduit dans une structure périodique à l'origine supposée parfaite, un mode (ou un groupe de modes) peut être obtenu à une certaine fréquence (ou à plusieurs fréquences spécifiques) dans la BIP. Le défaut se comporte comme une cavité entourée de miroirs, puisque les ondes à cette fréquence ne peuvent pas se propager dans le cristal photonique parfait. Les cavités à cristaux photoniques qui confinent fortement la lumière auront des applications nombreuses dans le domaine de l'optique intégrée [24]. Dans ces applications, il est nécessaire de réaliser des cavités à cristaux photoniques ayant à la fois un facteur de qualité Q élevé et un volume modal V petit(Figure II.1).

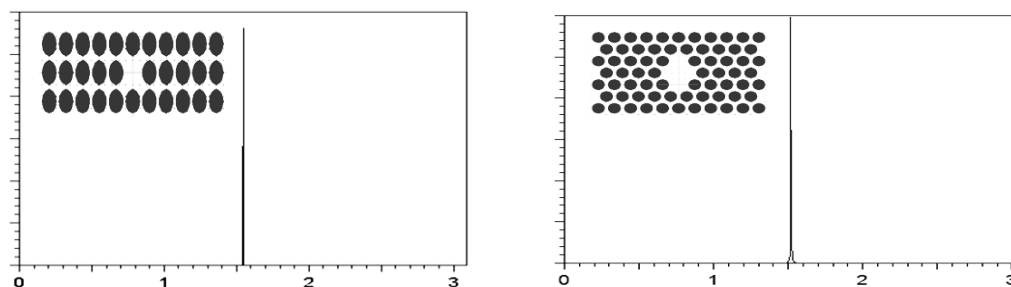


Figure II.1 : Quelques exemples des types de cavités à défauts ponctuels.

Les cavités optiques sont caractérisées par trois grandeurs. La première caractérise la position et l'existence des modes de résonance dans la bande interdite photonique ; c'est la longueur d'onde de résonance λ_0 . La seconde caractérise la capacité du résonateur à stocker des photons résonants, c'est le facteur de qualité Q du mode de résonance. La dernière grandeur qui reflète l'aptitude de la cavité à stocker spatialement un mode de résonance, c'est le volume modal V .

II.2.1 Facteur de qualité

Le facteur de qualité est défini comme étant la mesure universelle de la capacité d'une cavité à conserver l'énergie [25]. Par définition, le confinement d'un mode dans la cavité à une pulsation ω_0 correspond au taux de pertes mesuré lors d'une oscillation du champ à cette même fréquence. Plus explicitement, cela correspond donc au rapport entre l'énergie stockée à l'intérieur de la cavité W et la puissance dissipée p , soit :

$$Q = \omega_0 \frac{W}{p} \quad (\text{II.01})$$

La représentation fréquentielle du champ se présente donc sous la forme d'une lorentzienne centrée à ω_0 et de largeur à mi-hauteur (FWHM) $\Delta\omega$. A partir l'expression (III.01), nous pouvons obtenir une autre expression du facteur de qualité (II.07) :

$$Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega} = \frac{\lambda_0}{\Delta\lambda} \quad (\text{III.07})$$

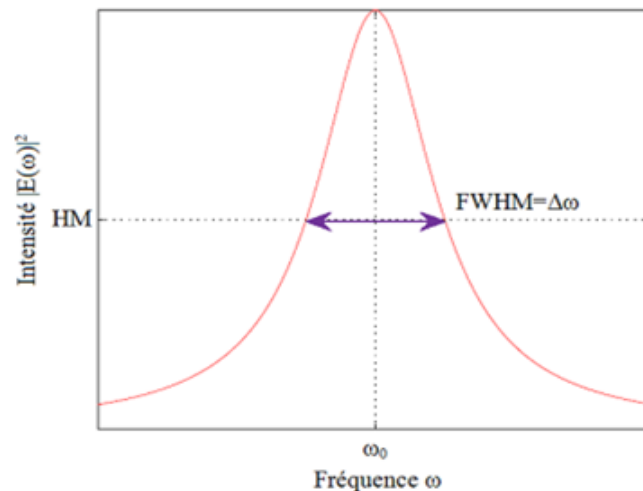


Figure II.2 : Représentation fréquentielle de l'intensité Lorentzienne d'un mode dans la cavité centré à la fréquence ω_0 .

On définit alors le facteur de qualité Q comme étant le rapport entre la longueur d'onde de résonance λ_0 , à la largeur à mi-hauteur du pic $\Delta\lambda$. Ce facteur de qualité rend compte de la capacité de la cavité à piéger la lumière.

Le volume modal caractérise le confinement spatial de la lumière au sein de la cavité. Il correspond au volume effectif occupé par le champ dans la cavité. Le volume modal est défini comme suit :

$$V = \frac{\iiint \varepsilon_r(\vec{r}) |\vec{E}(\vec{r})|^2 d^3\vec{r}}{\max [\varepsilon_r(\vec{r}) |\vec{E}(\vec{r})|^2]} \quad (\text{III. 08})$$

Où $\varepsilon_r(\vec{r})$ désigne la fonction diélectrique du matériau et $\vec{E}(\vec{r})$ le champ électrique.

Le volume modal est très souvent exprimé en unité de $(\lambda/n)^3$.

II.2.2 Influence des paramètres géométriques sur les cavités

Une solution pour réaliser simplement des cavités à CP 2D consiste à exploiter les propriétés de bande interdite photonique (BIP). L'omission des tiges au sein d'un réseau CP 2D ménage une région spatiale cernée de rangées de tiges se comportant comme des miroirs pour la gamme spectrale d'intérêt [26-29]. Plusieurs paramètres permettent de contrôler les propriétés d'une cavité :

- La géométrie de la cavité, essentiellement sa forme et sa taille (variation du rayon du point de défaut).
- Le changement de l'indice de réfraction des tiges par l'infiltration des liquides (polymère ou eau) dans les trous où les tiges des cristaux photoniques modifie les propriétés optiques de ces derniers.
- La période et le facteur de remplissage du CP 2D, responsables de la position spectrale des modes et de la BIP
- Le nombre de rangées de CP 2D bordant la cavité détermine la réflectivité des miroirs associés. Environ 8-9 rangées de CP 2D triangulaire suffisent en pratique pour s'affranchir des fuites de lumière dans le plan à travers la couronne CP [30].

II.3 Les différents types de cavités

Il existe plusieurs types de cavités, elles dépendent de la forme du réseau ; triangulaire ou carré, ou du nombre ou du types de défauts ; omission d'une ou plusieurs tiges ou variation du rayon ou de l'indice, parmi ces cavités nous citons :

II.3.1 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 H1, sept trous manquants à H2, etc. (figure II.3)[31]. Les cavités de type H_n , de forme hexagonale, n présente le nombre de rangées manquantes par côté de l'hexagone sont les plus étudiées [32].

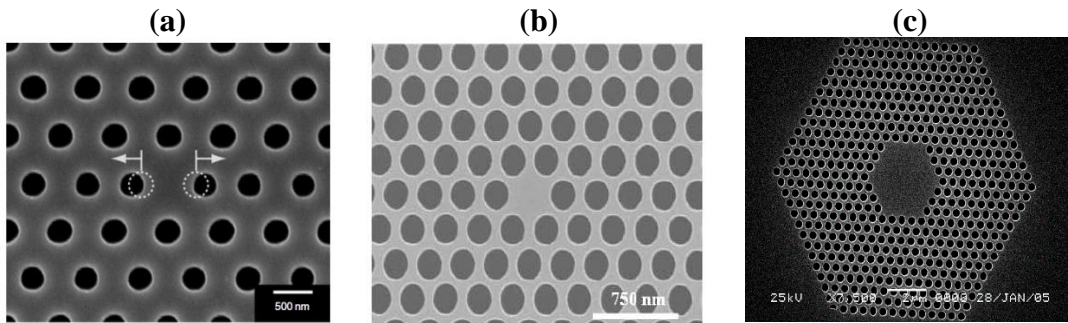


Figure II.3 : Exemples de cavités de types H_n : (a) cavité H_0 , (b) cavité H_1 , (c) cavité H_4 .

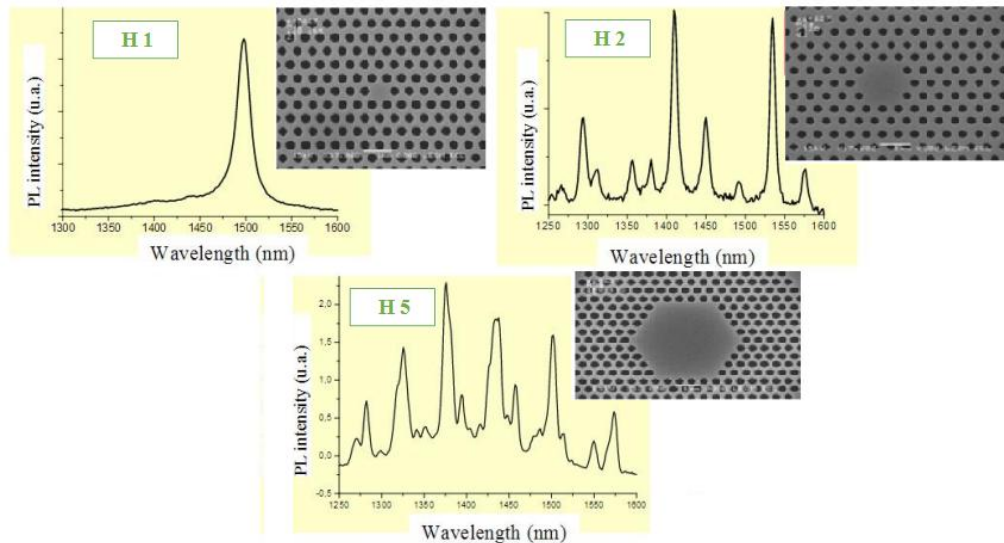


Figure II.4 : Signatures spectrales de cavités hexagonales [33].

II.3.2 Les cavités linéiques

Les cavités L_n sont linéiques et consistent en l'omission de n trous alignés sur la même rangée dans la direction ΓK . La figure suivante présente quelques exemples de cavité L_n à cristaux photoniques 2D [34].

Les cavités de types L_3 ont des modes dont les facteurs de qualité ne dépassent pas quelques milliers. Toutefois il est possible d'obtenir de forts facteurs de qualité avec ce

type de cavités, surtout depuis les travaux d'*Akabane et al* qui ont démontré l'importance d'un confinement progressif de la lumière grâce à l'optimisation de la position des trous aux extrémités de la cavité. Grâce à cela ils ont également exploré la piste des cavités linéiques modifiées, qui permettent de multiplier par 9 le facteur de qualité par rapport aux cavités linéiques simples (45 000 par rapport à 5000) [35].

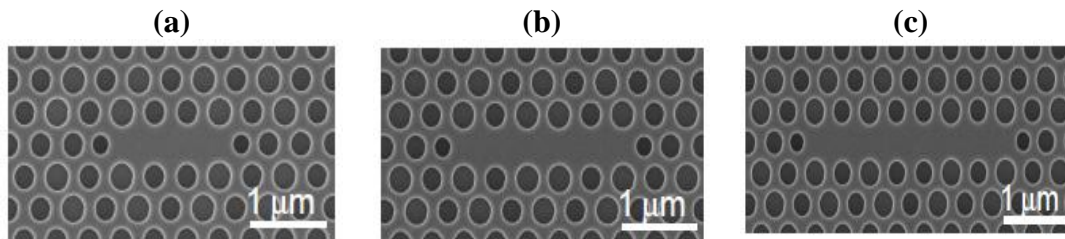


Figure II.5 : Exemples de cavités de types L_n : (a) cavité L_3 , (b) cavité L_5 , (c) cavité L_7 .

II.3.3 Cavité Carrée

Dans un réseau bidimensionnel carré, les cavités sont de type S_n de forme carrée, n présente 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.

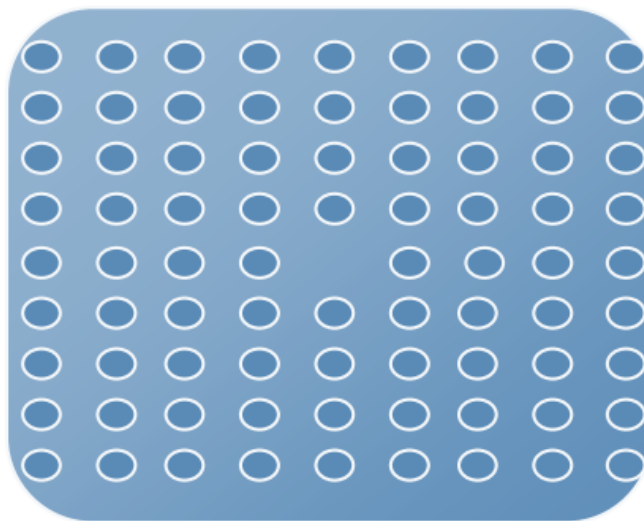


Figure II.6 : Exemple de cavité carrée dans un cristal photonique a réseau carré.

II.3.4 Cavité triangulaire

La figure II.7 (a) 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 ($\epsilon=8.12$). Ce cristal est éclairé par une onde

plane sous incidence normale avec une polarisation TE. Le spectre de photoluminescence de cette cavité est représenté sur la figure II.7 (b).

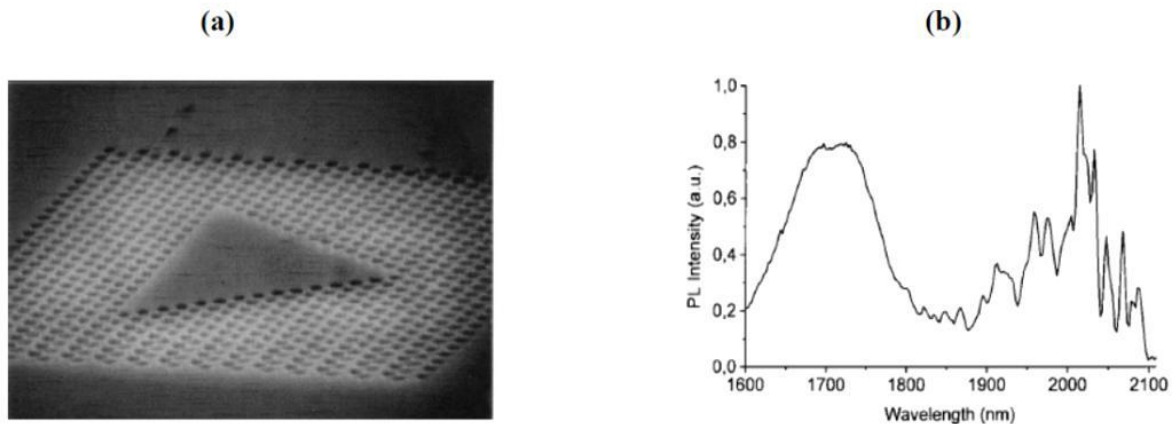


Figure II.7 : (a)Exemple de cavité triangulaire dans un cristal photonique triangulaire avec un paramètre de maille 600nm,(b)Spectre de photoluminescence d'une cavité triangulaire dans un cristal photonique triangulaire de trous d'air (Paramètre de maille $a = 600\text{nm}$, rayon $r = 200\text{nm}$) plongé dans une matrice diélectrique ($\epsilon = 8.12$) [36].

II.4 Guides d'ondes dans les cristaux photoniques

Le développement d'une optique intégrée à base de cristaux photoniques 2D passe par la conception et la réalisation de guides optiques performants. La première idée des guides d'ondes est apparue en 1994 sous l'impulsion de *Joannopoulos*, Meade et al, mais les premières réalisations ont été effectuées cinq à six ans plus tard [37].

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

Le mécanisme de guidage dans ce type de guide n'est pas toujours assuré par la présence de la BIP, il peut être affecté par la réflexion totale interne, et cela, selon la nature de la structure du matériau à bande interdite photonique utilisée. Dans la structure de trous

(où le guide est formé par une rangée de trous manquante), l'indice de réfraction du cœur du guide à cristal photonique est plus élevé que celui du matériau constituant la gaine photonique. Dans ce cas, le guidage met en jeu des réflexions multiples sur le cristal photonique, mais, les propriétés modales des modes de Bloch seront affectées par la réflexion totale interne. Le guidage s'effectuera donc par effet BIP et par réflexion totale interne (figure II.8), le guide est alors multimode aux longueurs d'onde correspondant aux bandes interdites de la gaine photonique, car il existe au moins deux modes dus à chacun des deux types de propagation. Il en résulte un bon couplage entre le guide diélectrique et le guide à CP, puisque les mécanismes de guidage des deux types de guides se ressemblent. D'autre part, le guide à cristal photonique dans la structure à tiges (où le guide est formé par une rangée de tiges manquante) a un cœur d'indice de réfraction plus faible que celui des gaines. Dans ce cas, le mécanisme de guidage ne peut pas être de nature réfractive. La lumière est guidée dans le cœur, car elle ne peut pas se propager dans les gaines qui présentent une bande interdite photonique. Le guidage s'effectuera donc par réflexions multiples sur le matériau à bande interdite photonique, le guidage par effet BIP est le seul type de guidage opérant dans cette structure, le guide peut être donc monomode. Le couplage sera pauvre puisque les mécanismes de guidage des deux types de guides sont très différents, même si les deux guides ont la même largeur.

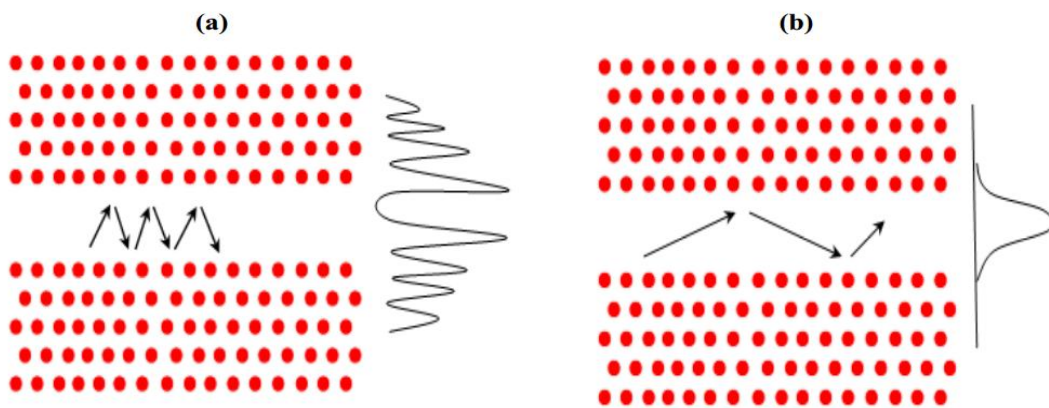


Figure II.8 : Guide crée dans un cristal photonique bidimensionnel de réseau triangulaire en omettant quelques lignes de trous. (a) Propagation et schémas du profil de l'intensité dans le cas où le guidage se fait par BIP, (b) Propagation et schémas du profil de l'intensité dans le cas où le guidage est réfractif.

II.5 Différents types des guides d'ondes

II.5.1 Guide d'onde linéique

Les guides à cristaux photoniques sont obtenus en créant un défaut linéique dans le cristal. Au sein de ces défauts, des modes ayant une fréquence appartenant à la bande interdite photonique peuvent exister. Pour des cristaux photoniques bidimensionnels, un guide à cristal photonique peut être créé en retirant (ou modifiant) directement une ou plusieurs rangées de motifs du cristal photonique (Figure II.9) [38]. Les guides formés de l'omission d'une ligne de trous sont appelés W1, ceux de deux lignes de trous W2, etc. ... Deux exemples sont rapportés sur la figure II.8 dans le cas d'un cristal 2D hexagonal, le premier exemple (Figure II.10(a)) représente un défaut obtenu en retirant une rangée de motifs dans la direction ΓM et le deuxième exemple (Figure II.10(b)) correspond à un défaut obtenu en retirant une rangée de motifs dans la direction ΓK .

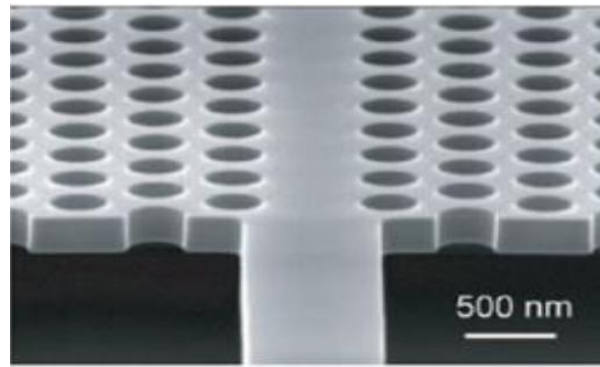


Figure II.9: Représentation réelle d'un guide d'onde de largeur W à base d'un CP2D [39].

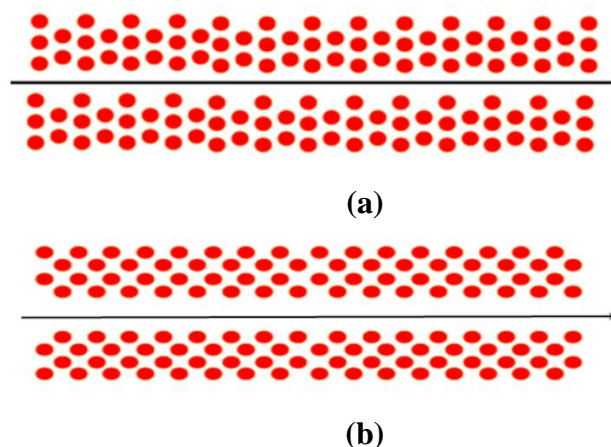


Figure II.10: Exemple de guides d'ondes dans un cristal photonique hexagonal. (a) guide obtenu par retrait d'une rangée de motifs dans la direction ΓM , (b) guide obtenu par retrait d'une rangée de motifs dans la direction ΓK .

II.5.2 Guide d'onde courb e

Les guides courb es constituent également un domaine d'application privilégié des cristaux photoniques car ils permettent théoriquement de réaliser des virages avec des rayons de courbure de l'ordre de la longueur d'onde (figure II.11). Dans le guide virage il y a des problèmes de réflexion et les pertes subsistent, ces virages peuvent être réalisés simplement en omettant de graver des trous dans les directions de symétrie du cristal (virages à 60 et 120 ). Dans le cas des virages simples à 60 , les meilleurs résultats mesurés ont été des transmissions d'environ 80 à 90 % pour un guide étroit (W1) [40]. Le virage peut être amélioré en ajoutant ou supprimant des trous ou encore en modifiant la topologie du coude.

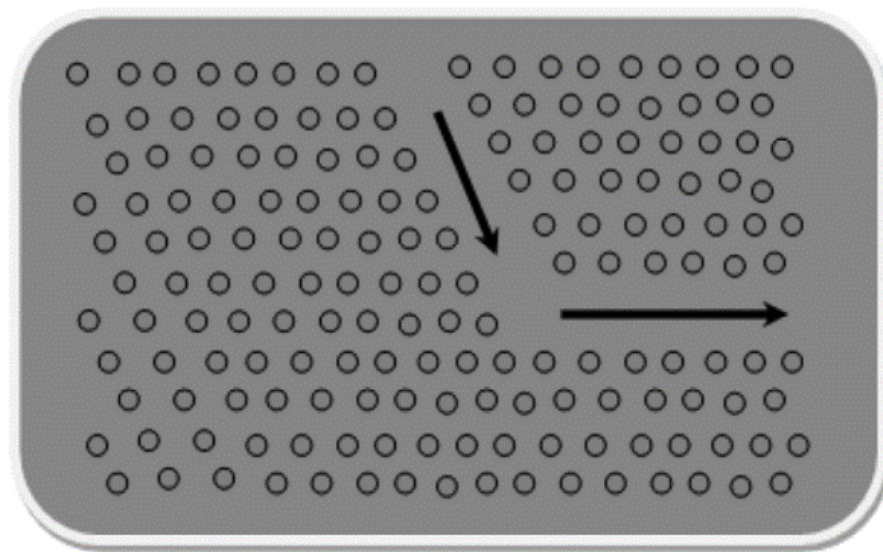


Figure II.11 : Virage réalisé dans un cristal photonique bidimensionnel.

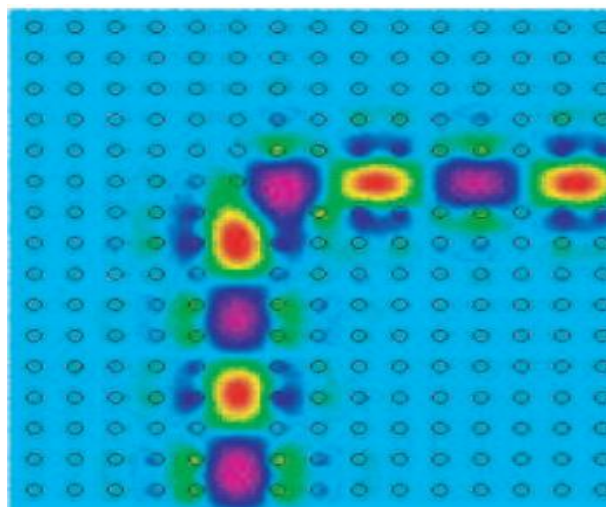


Figure II.12 : Cartographie du champ électrique lorsque une onde électromagnétique se propage dans un guide d'onde faisant un virage à 90  dans un cristal photonique.

La démonstration expérimentale du guidage dans des virages a été réalisée rapidement, mais des problèmes de réflexion et de pertes subsistent. Dans le cristal photonique hexagonal ou triangulaire, ces virages peuvent être réalisés simplement en omettant de graver des trous dans les directions de symétrie du cristal virage. Dans le cas des virages simples, les meilleurs résultats mesurés sont été des transmissions d'environ 80 à 90 % pour un guide étroit (une rangée de trous omise) et de 78 % pour un guide plus large [41].

II.6 Couplage guide –cavité

Les guides à cavités couplées sont appelés aussi guides CROW (Coupled Resonator Optical Waveguide). Ils sont composés d'une chaîne de cavités fortement couplées séparées par un ou plusieurs trous [42,43]. Les cavités sont dessinées de façon à ce que leurs fréquences propres se situent dans le gap photonique du CP 2D. Bien que les modes de cavité soient fortement confinés à l'intérieur des cavités, le recouvrement évanescent entre deux modes des cavités voisines est suffisant pour permettre le passage par saut d'un photon d'une cavité à l'autre (figure IV.13) [44]

Les guides à cavités couplées sont donc intéressants pour la réalisation des fonctions optiques tels que : les capteurs [45], les fibres[46], les multiplexeurs[47], les filtres [48], et les ports logiques [49]. On peut aussi utiliser les cavités couplées pour la fabrication de virages aigus à fort taux de transmission ou de fonctions de démultiplexage.

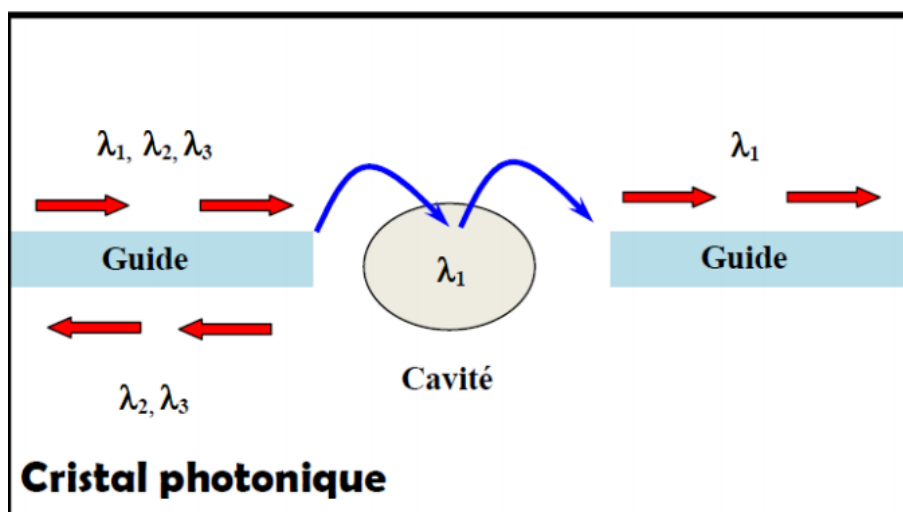


Figure II 13 : Dispositif associant guide et cavité d'un même cristal photonique bidimensionnel.

II.7 Multiplexeurs/ Démultiplexeurs

Le rapprochement des guides d'ondes et des défauts ou cavités résonnantes dans un CP amène à des possibilités de filtrage et de multiplexage (insertion ou extraction) en longueur d'onde dans le cadre de l'optique intégrée[50].

Une fonction importante qu'on peut réaliser avec les cristaux photoniques : le multiplexage en longueurs d'ondes (WDM, Wavelength Division Multiplexing). L'objectif est d'insérer ou d'extraire des longueurs d'onde bien précises.

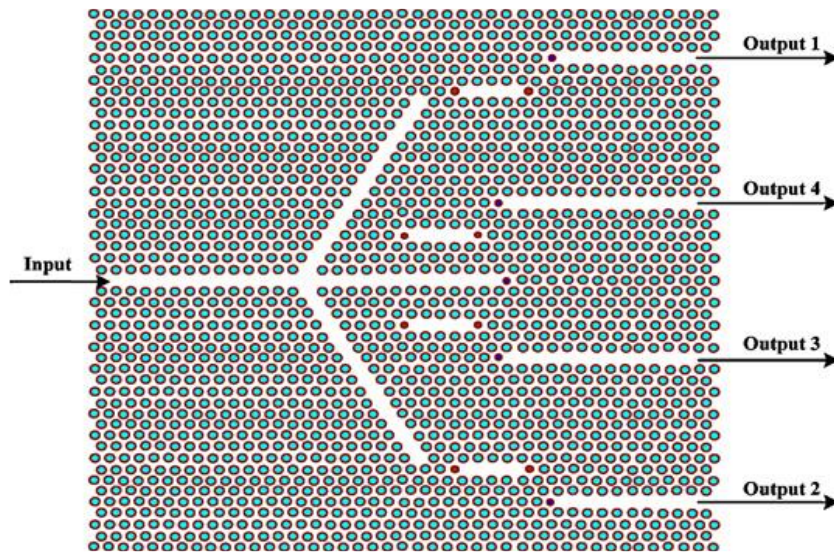


Figure II.14 : schéma d'un démultiplexeur à cristaux photoniques[51].

Une méthode pour la conception d'un démultiplexeur en longueur d'onde à base des cristaux photoniques 2D pour la séparation des impulsions ultra-courtes du canal est proposée [52]. La méthode est basée sur l'analyse des cartes de bandes interdites photoniques complète qui permet de sélectionner les paramètres géométriques du démultiplexeur. Le dispositif sépare efficacement les canaux avec des longueurs d'onde 1,31 μm et 1,55 μm (Figure II. 15).

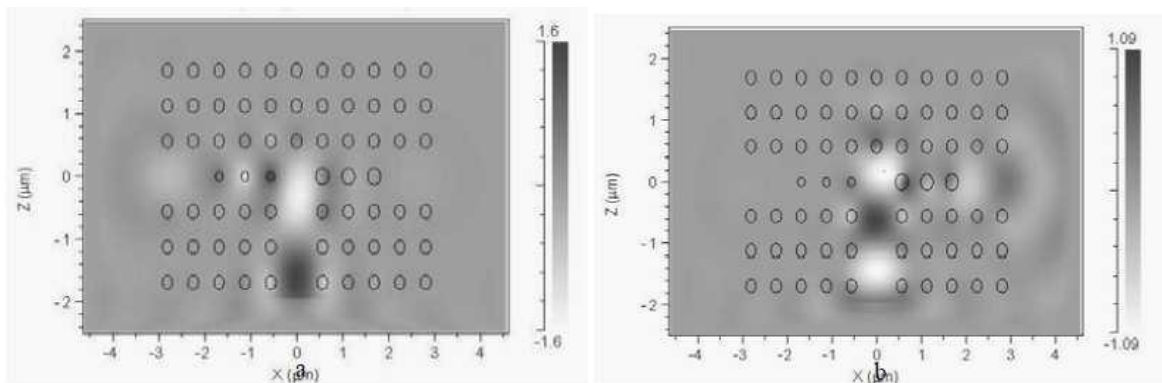


Figure II.15 : Résultats de la simulation FDTD d'un démultiplexeur en longueur d'onde :
 (a) longueur d'onde $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$, (b) longueur d'onde $\lambda = 1,31 \mu\text{m}$ [53].

Un démultiplexeur à huit canaux basés sur double structure photonique comme montré dans la Figure II. 12. La structure est un cristal photonique 2D à réseau triangulaire de trous d'air de rayon $r = 255 \text{ nm}$ et de deux périodicité $a_1 = 440 \text{ nm}$ et $a_2 = 440 \text{ nm}$, gravés sur une membrane de Si. Le principe de fonctionnement de ce démultiplexeur consiste à ajuste la longueur d'onde de résonance de chaque cavité en fonction de rayon de trous de $0,05a$, $0,06a$, $0,06a$ et $0,06a$ pour les quatre canaux de cristal photonique de période PC1, et un rayon de trous de $0,18a$, $0,18a$, $0,17a$, et $0,2a$, respectivement pour les quatre canaux de cristal I photonique de période PC2 [54].

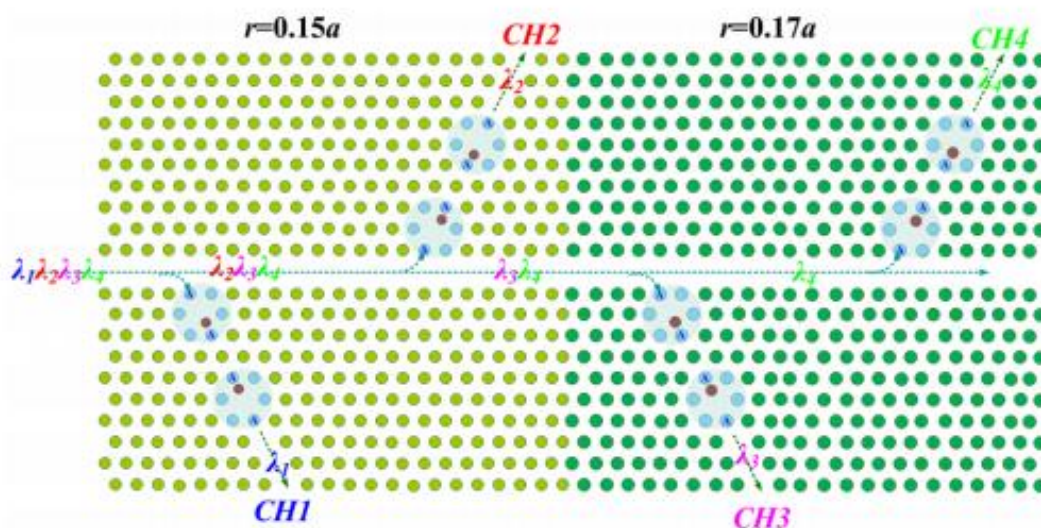


Figure II.16 : schéma d'un démultiplexeurs [54].

Sur la figure suivante nous avons présenté la propagation de la lumière dans chaque canal pour différentes longueur d'onde 1530, 1550, 1570 et 1590 nm.

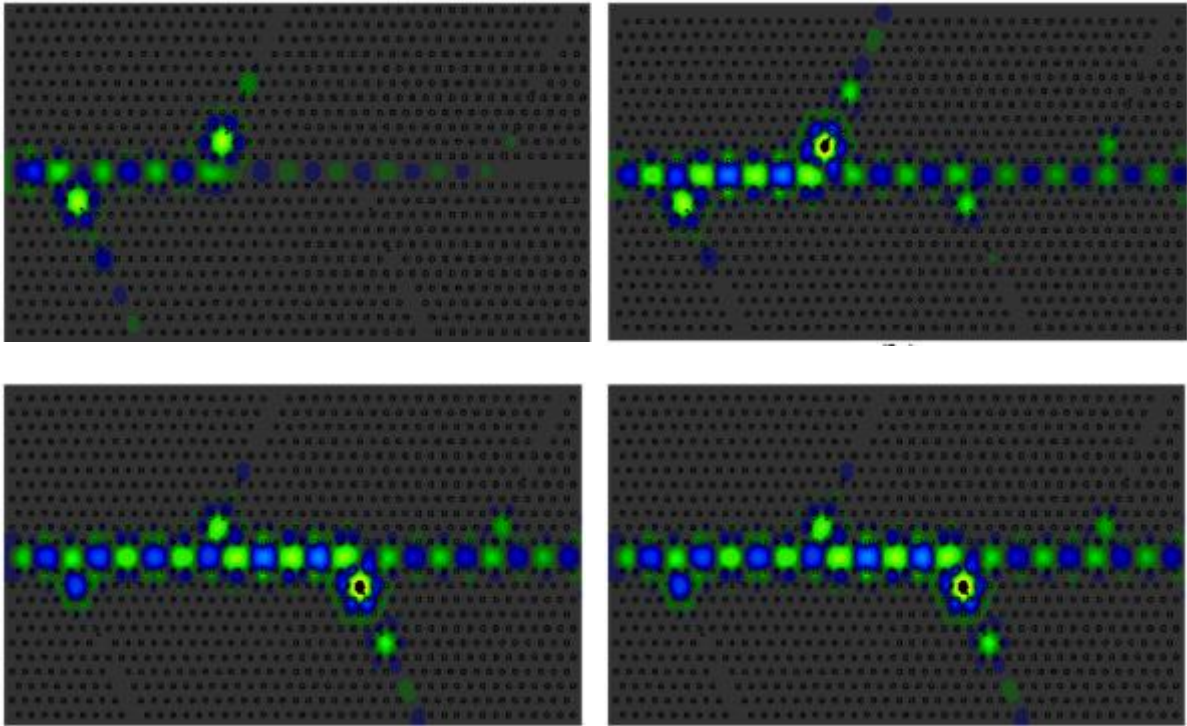


Figure II.17 : Simulation d'un démultiplexeur en longueur d'onde 1530, 1550, 1570 et 1590 nm, respectivement [54].

II.8 Conclusion

Les cristaux photoniques sont très prometteurs pour la réalisation des composants optique planaires. Ces matériaux représentent une plate-forme extrêmement intéressante pour l'optique intégrée. En effet, la miniaturisation des composants optiques, pour l'intégration, exige le contrôle des modes de propagation des ondes électromagnétiques dans ces cristaux (mode de défauts). Dans ce chapitre nous avons étudié les cavités a cristaux photoniques et les guides d'onde a cristaux photoniques et le couplage guide – cavité. Plus nous terminons notre étude théorique par une étude de démultiplexeurs.

III.1 Introduction

La modélisation électromagnétique des propriétés des cristaux photoniques nécessite en général un gros investissement en programmation et en analyse numérique et constitue une activité exigeante en compétence et en temps. Le développement des méthodes de modélisation optiques précises et rapides reste donc primordial pour l'étude de ces structures. Parmi les modèles théoriques traitant les cristaux photoniques, on peut distinguer la méthode des ondes planes PWE et la méthode des différences finies dans le domaine du temps FDTD, nous avons utilisé la méthode (FDTD) à l'aide de logiciel Fullwave et la méthode (PWE) à l'aide de logiciel Bandsolve de Rsoft CAD qui permet de modéliser différentes structures en un, deux et trois dimensions. Dans le cadre de ce chapitre, nous présentons les méthodes PWE et FDTD.

III.2 présentation de Rsoft CAD

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

III.2.1 Le simulateur «FullWAVE»

L'objectif de *FullWAVE* est de fournir un ensemble de simulations pour calculer la propagation de la lumière dans les guides d'ondes de géométries arbitraires. La simulation est basée sur la technique de la FDTD (Finite Difference Time Domain).

La FDTD est une méthode de résolution directe des équations de Maxwell dans le domaine temporel, elle utilise l'outil numérique des différences finies. On peut obtenir les réponses en champs TE et TM simultanément, On peut ainsi obtenir les cartographies du champ EM à n'importe quel endroit et n'importe quel moment. La connaissance de l'évolution du champ en fonction du temps permet également d'obtenir des informations sur la réponse spectrale de la structure.

La méthode FDTD est largement utilisée dans les études relatives à la mécanique des matériaux ainsi qu'à la propagation des ondes. Dans le domaine de la photonique, elle se rapproche plus de la réalité car elle offre la possibilité de générer une excitation (source) dans un CP et de suivre dans le temps le comportement de l'onde et son

interaction avec le CP, ce qui permet d'y étudier sa transmission. Ainsi, elle a été appliquée en 2000 par Si galas et Garcia pour déterminer le coefficient de transmission dans une structure photonique tridimensionnelle [55].

III.2.2 Lesimulateur« BandSOLVE »

BandSOLVE est un moteur de simulation pour la génération et l'analyse des structures à bandes interdites photoniques. Il est basé sur une implémentation optimisée de la technique de la méthode des ondes planes pour des structures périodiques.

La décomposition en ondes planes, communément appelée PWE, est sans doute la méthode la plus utilisée dans les domaines où les systèmes étudiés sont généralement périodiques en particulier dans les cristaux photoniques et les cristaux acoustiques. La méthode PWE a été utilisée initialement pour obtenir les états d'énergie électroniques dans un cristal métallique périodique [56]. Elle a été ensuite largement utilisée en photonique puis en photonique pour le calcul des structures de bandes [57-58].

III.2.3 Fenêtre de programme de CAD.

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

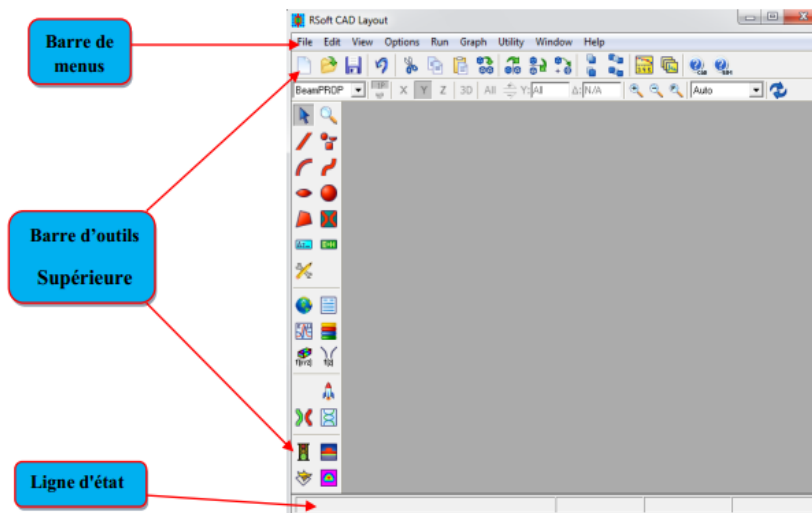



Figure III.1 : La fenêtre de programme de R Soft CAD montrant la barre de menus au-dessus, les barres des outils supérieurs à gauche, et la ligne d'état au fond.

III .2.4 Créer un nouveau circuit

Pour créer un nouveau circuit, cliquez sur l'icône **New circuit**  dans la barre d'outil supérieure. Alternativement, choisissez **File/New** du menu. Le dialogue de démarrage apparaît (fig. III. 2). Ce dialogue donne des informations de base sur le circuit.

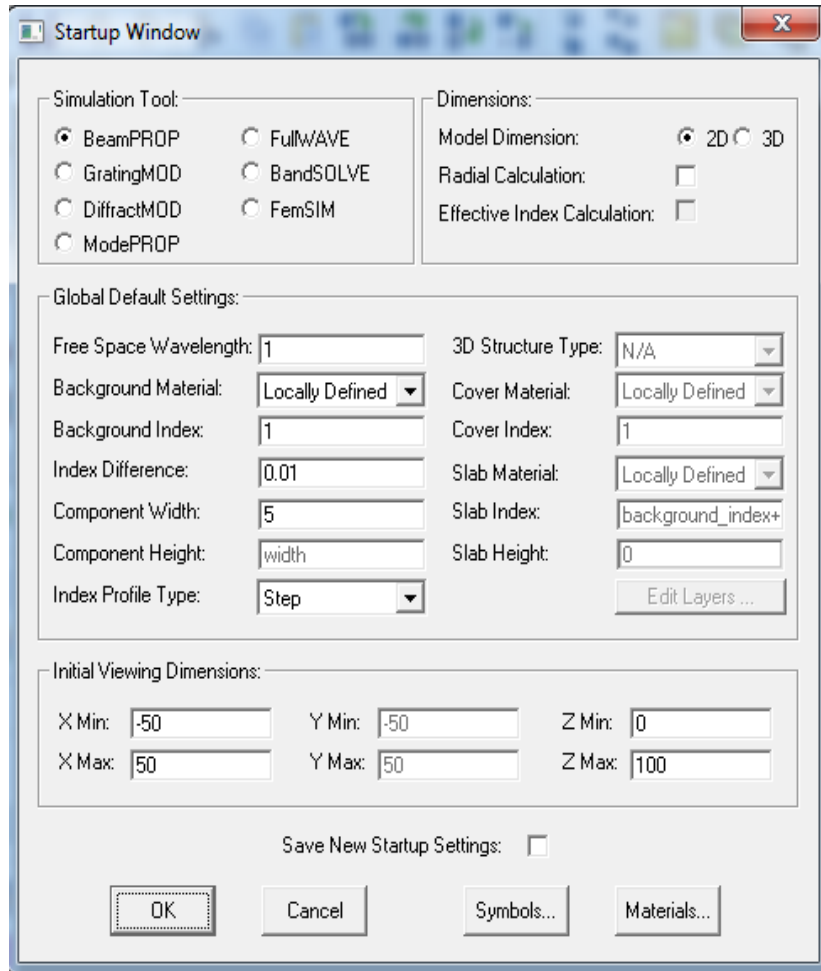


Figure III.2 : La fenêtre de démarrage.

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 R Soft bandSOLVE, FullWave, BeamPROP/BPM ou GratingMOD.

Après cette étape on clique sur le bouton **OK**, puis on obtiendra la fenêtre représentée sur la (fig. III. 3).

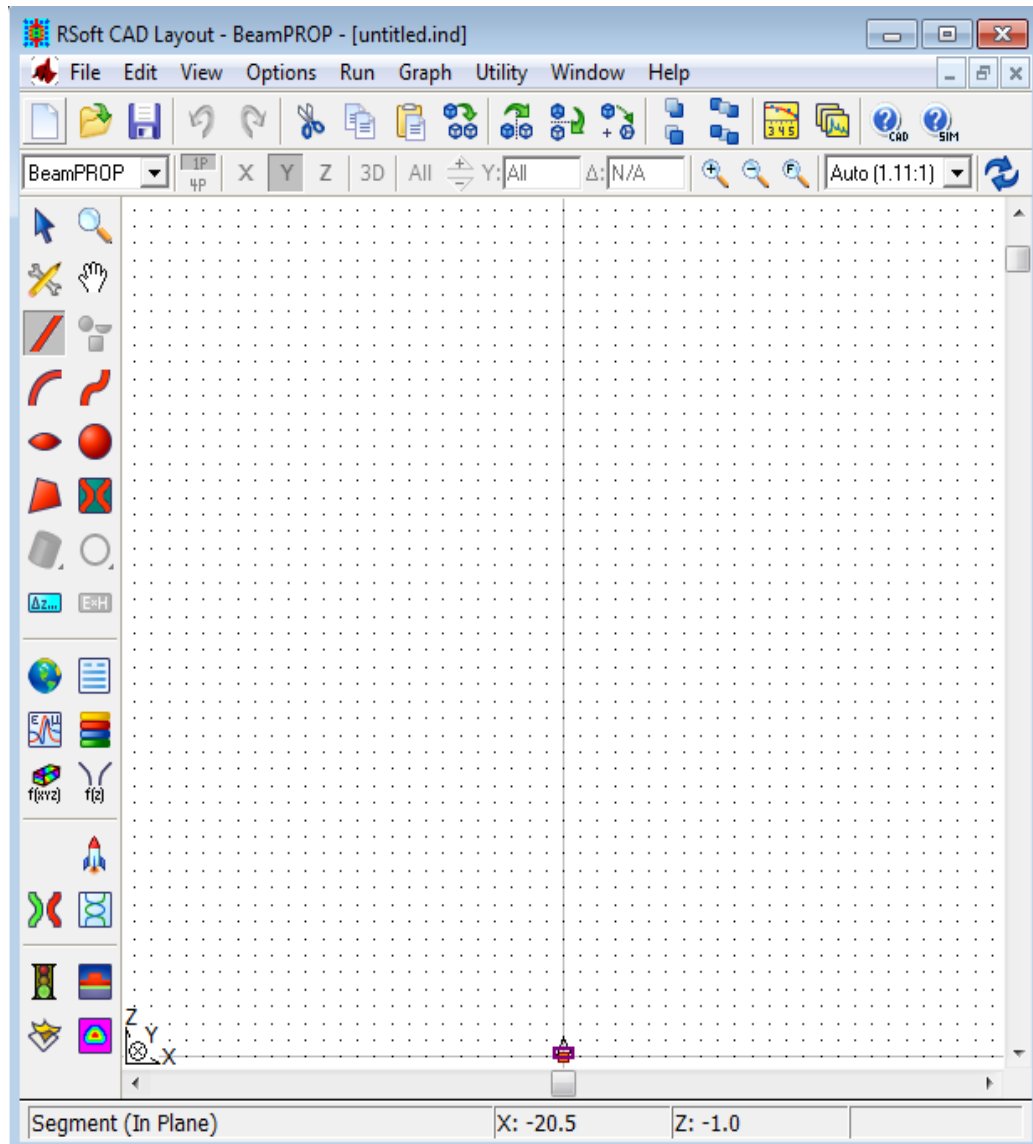


Figure III.3 : Nouvelle fenêtre pour réaliser un nouveau composant ou nouveau circuit.

III.3 Structure d'un cristal photonique

Cette explication discute la création des réseaux en cristal photonique dans l'interface de CAD, et puis l'analyse de ces réseaux en utilisant la méthode de FDTD dans *Full WAVE*.

III.3.1 Présentation de la structure

Il y a plusieurs manières de créer une structure de réseau dans l'interface de CAD. La manière la plus facile est d'employer un des multiples utilités de disposition qui sont incluse avec *Full WAVE* afin d'expédier la création de ce réseau. Pour créer ce réseau en utilisant ArrayLayout XZ, on place les paramètres comme indiqué sur la figure III.04 (a), On clique sur le bouton ok on obtient la structure sur la figure III.04(b).

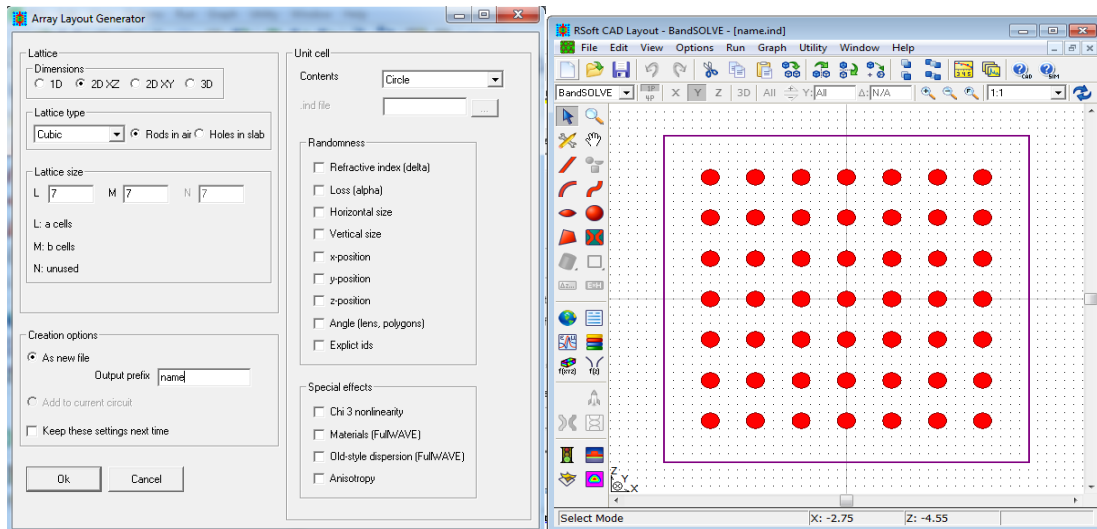


Figure III.4 : (a) Arrangements de disposition de la rangée XZ, (b) Disposition de rangée dans la fenêtre de CAD.

III.3.2 Personnalisation de réseau



Le bouton *Global Settings Window* utilisé pour définir le module de simulation *BandSOLVE* ou *FullWAVE* parmi les autres méthodes qui existent à RSoft (*BeamPROP/BPM BandSOLVE* ou *GratingMOD*).

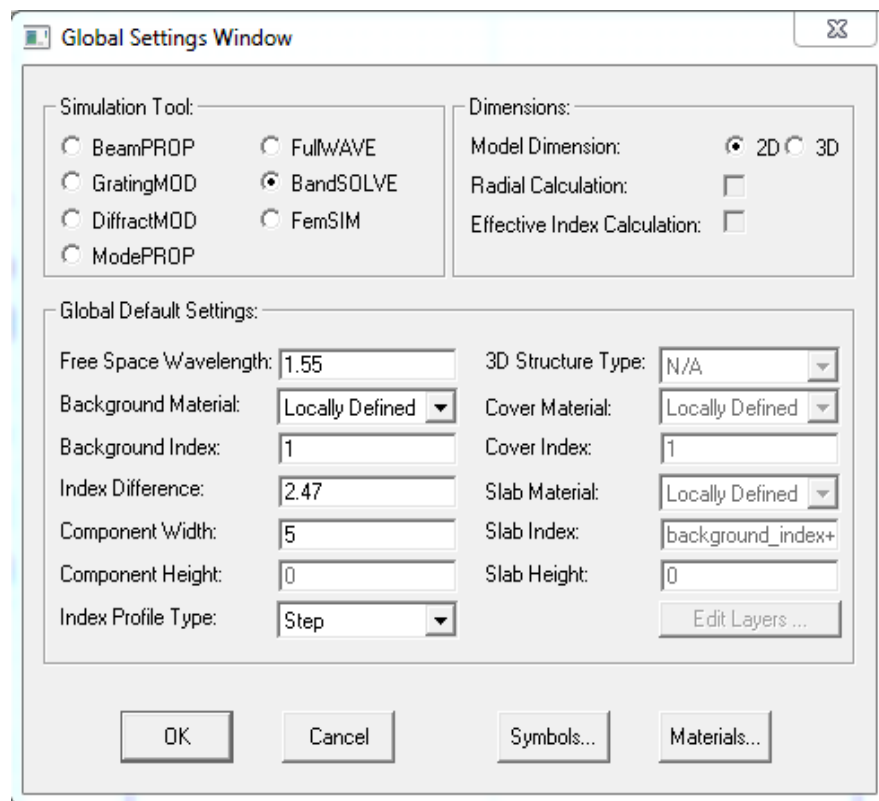


Figure III.5 : Fenêtre des paramètres globaux du circuit.

III.3.3 Créer Des Variables

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

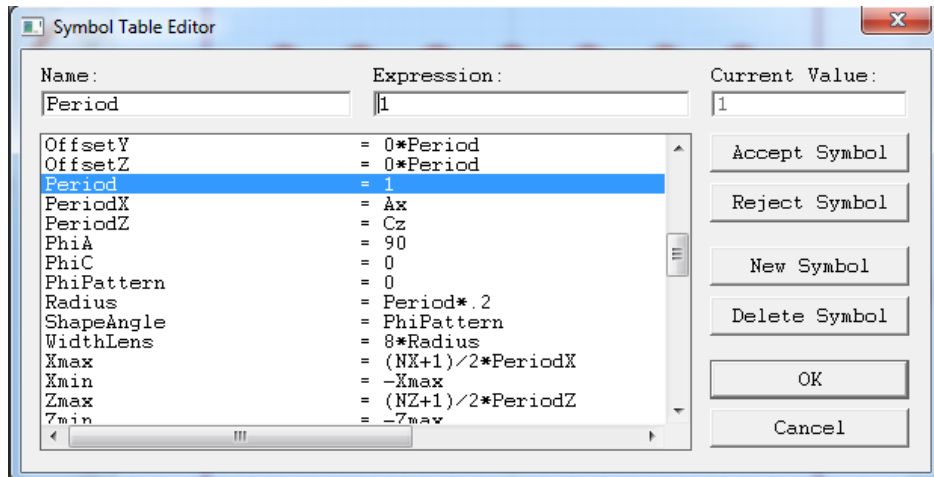


Figure III.6 : l'éditeur du Tableau de symboles.

III.3.4 Vérification du profil d'index

Pour vérifier la distribution d'indexe de la structure qu'on a créé. On appuie sur le bouton de profil d'index et on change le pas de calcul, on met les valeurs max et min pour X et Z (voir figure III-7(a)). La structure obtenue est sur la figure III.7(b).

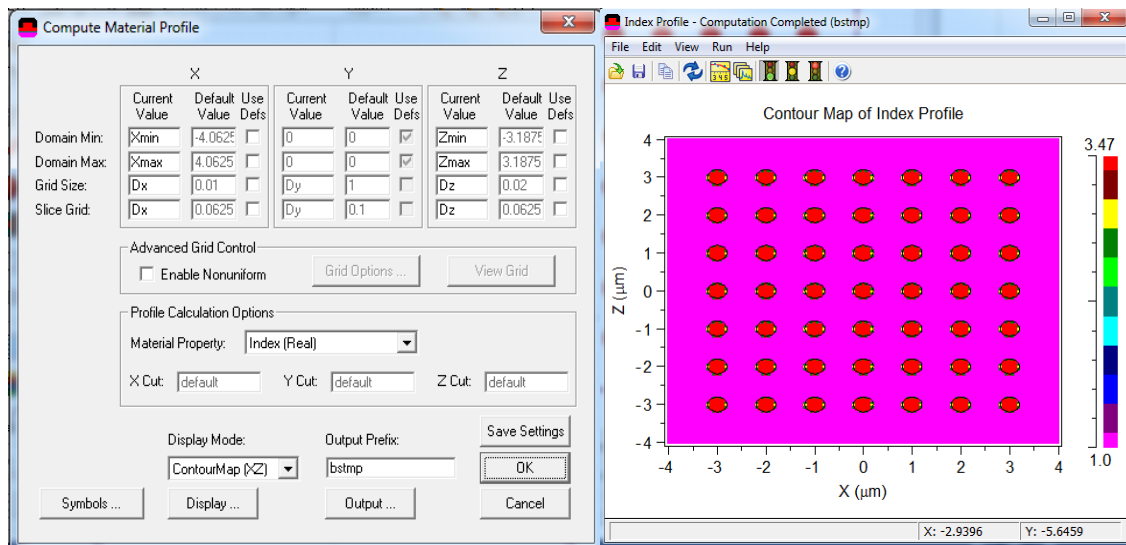


Figure III.7 : Profil d'indice de la structure à cristaux photoniques 2D

III.3.5 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 utilisée (BandSOLVE / FullWave) comme il est représenté sur la figure III.8 ou sur la figure III.9.

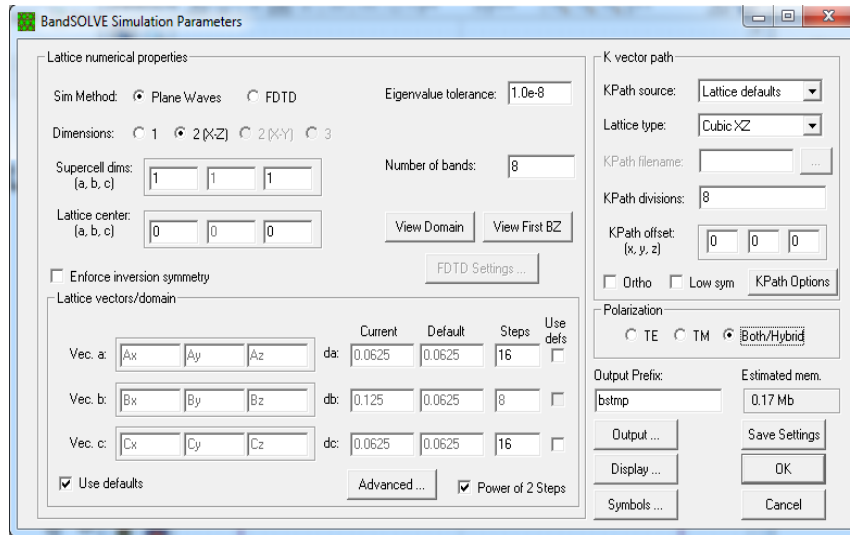


Figure III.8 : La fenêtre de paramètres de simulation de BandSOLVE.

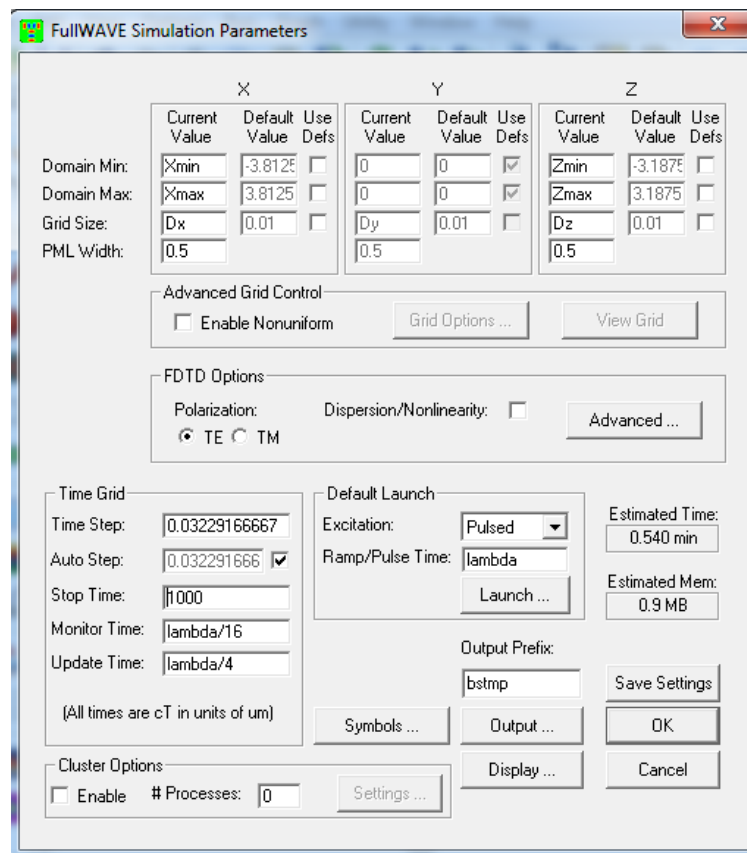



Figure III.9 : La fenêtre de paramètres de simulation de Full WAVE

III.3.6 Lancement de la simulation

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

III.3.7 Voir les résultats

Regarder ou imprimer a sauvé des résultats de simulation, on clique sur l'icône  de *WinPLOT* dans la barre des outils supérieur de la fenêtre de CAD, et on choisit le graphe désiré à partir du dialogue qui est présenté.

III.4 création d'un guide d'onde droit

Pour créer un guide droit de largeur $W1$ suivant une direction ΓK ou ΓM , il suffit d'enlever un rangé de trous d'air selon la direction choisie (voir figure

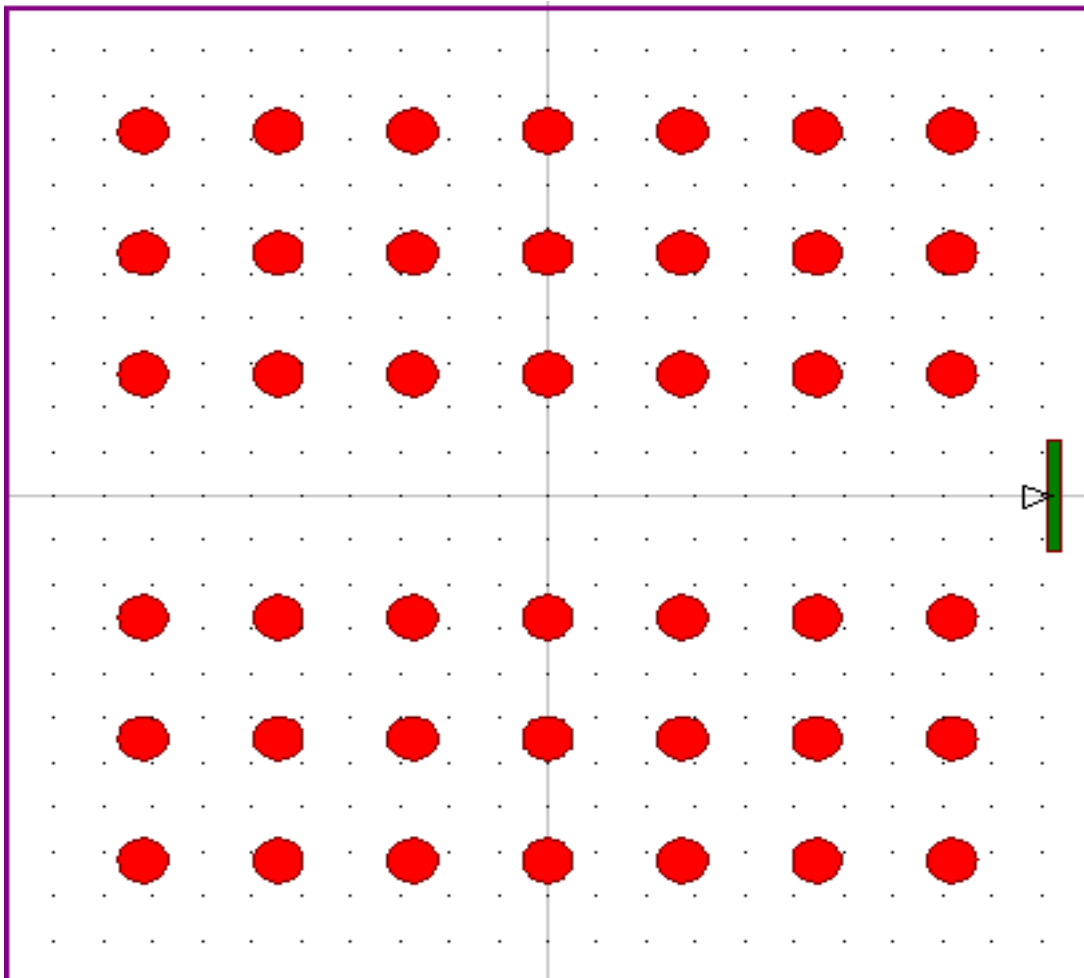


Figure III.10 : guide d'onde droit $W1$.

III.5 création d'unecavité

Pour créer unecavité largeur $S1$ suivant une direction ΓK ou ΓM , il suffit d'enlever un trou d'air selon la direction choisie(figureIII.11).

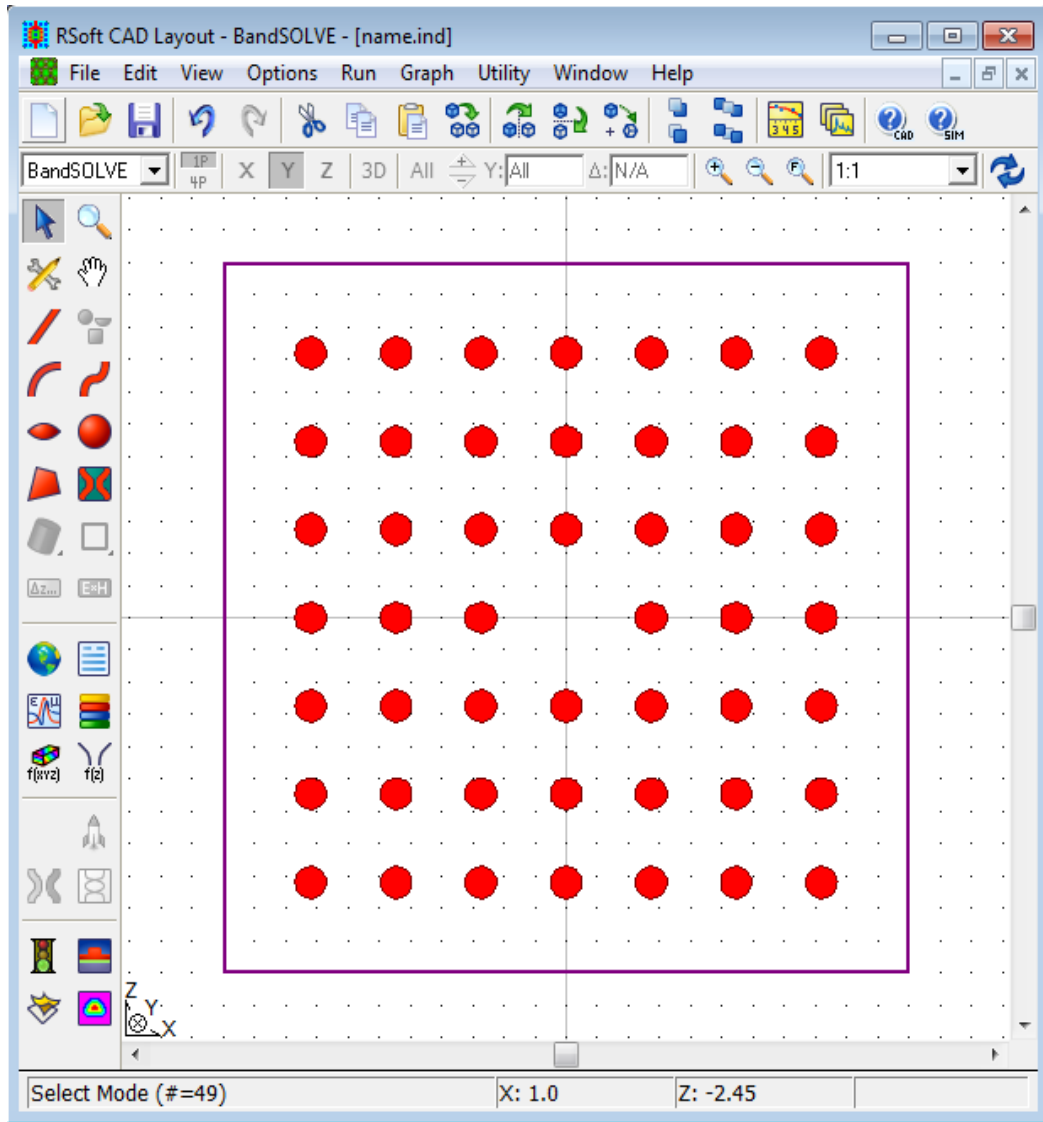


Figure III.11 : cavité d'onde droite S1.

III.6 Diagramme des bandes

Comme indiqué dans le premier chapitre, les zones de Brillouin aident 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 III.12 montre le diagramme des bandes correspondant à la structure de la fibre en cristaux photoniques (FCP) pour les modes TE/TM.

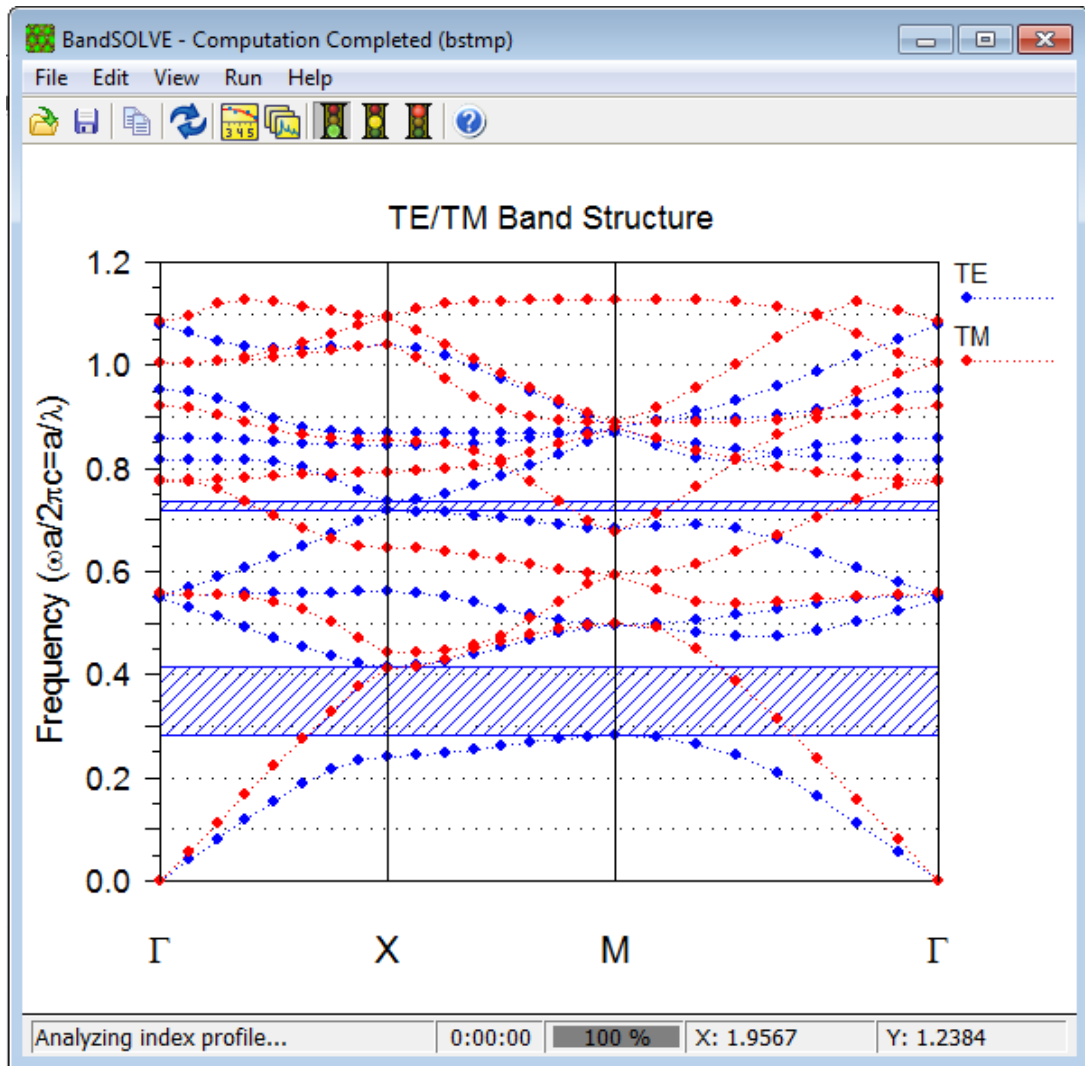


Figure III.12 : Diagramme des bandes pour les modes TE et TM

III.7 Conclusion

La méthode des ondes planes était la première utilisée pour calculer les structures de bande d'énergie des structures diélectriques. Cette technique de résolution dans le domaine fréquentiel consiste à développer le champ électromagnétique sur une base d'ondes planes. La méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD) a aussi eu beaucoup de succès pour la modélisation de ce type de matériaux grâce à sa facilité d'implémentation. Cependant, elle est plus utilisée pour le calcul des diagrammes de transmission et de réflexion. Dans ce chapitre, nous avons présenté les deux méthodes de simulation : la méthode des ondes planes (PWM) et la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD). Ensuite, nous avons décrit les deux modules de simulation le Bandsolve et le Fullwave de Rsoft CAD, dans le chapitre suivant nous avons étudié la cavité et l'étude de guide d'onde à CP, et l'étude d'émultiplexeur.

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre nous avons étudié le démultiplexeur à base de cristaux photoniques 2D en utilisant la méthode des différences finies dans le domaine temporel intégrée dans le logiciel Rsoft CAD. Le démultiplexeur est l'un des composants essentiels pour le système WDM et l'optique intégrée, il sélectionne une fréquence particulière ou des plusieurs fréquences, où il est composé des cavités couplés avec guide d'ondes.

Dans un premier temps, nous étudions la cavité a cristaux photoniques .Ensuite le guide d'onde a cristaux photoniques et enfin le couplage entre eux pour concevoir un démultiplexeur a cristaux photoniques. Les propriétés de ces structures photoniques sont numériquement étudiées en utilisant la méthode des différences finies dans le domaine temporel à deux dimensions (FDTD 2D).

IV.2 Présentation de la structure étudiée

En premier lieu, nous avons étudié le couplage guide-cavité ensuite la conception d'un démultiplexeur formé de 8 canaux. Le cristal photonique est un réseau à maille carré de cylindres diélectriques plongés dans l'air (structure déconnecté). Les paramètres du réseau donné comme suite : $r= 185\text{nm}$, $a =546 \text{ nm}$. L'indice de réfraction (n) des tiges diélectriques est fixé à 3.47 (c'est l'indice de réfraction du silicium). La structure photonique est composée de 31×26 tiges diélectriques dans le plan (xz). Dans la conception et la simulation, nous avons utilisé FDTD pour la simulation numérique (BandSOLVE et FullWAVE).

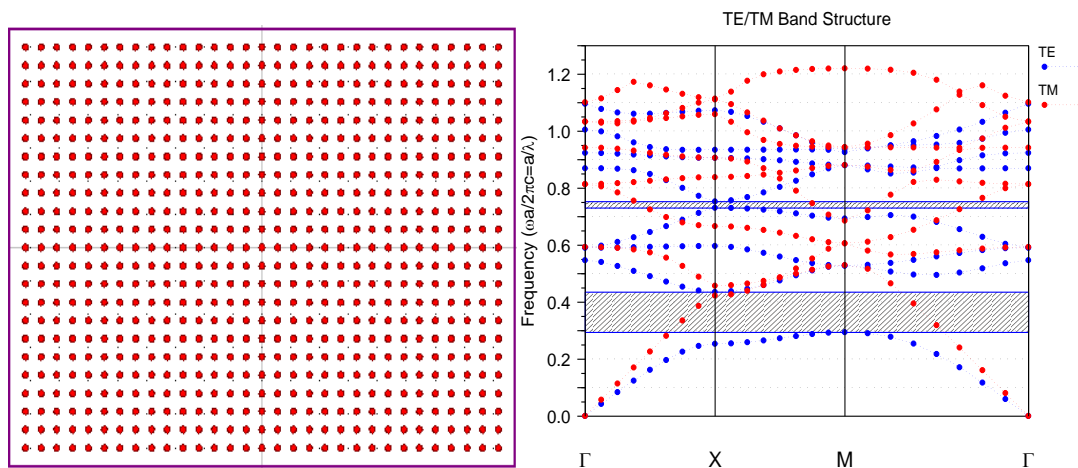


Figure IV.1 : la band interdit photonique d'un CP2D à réseau carré de paramètre de maille $a=546\text{nm}$ constitué des tiges de rayon $r=0.185a$ silicium en polarisation TE.

La bande interdite de la structure photonique est obtenue par le simulateur BandSOLVE (figure IV.1). On voit à partir de ce diagramme que la bande interdite s'ouvre

pour les gammes de fréquence de 0.2910-0.4309 (a/λ), ce qui correspond à l'intervalle de longueur d'onde de [1,2671, 1.8762 μm] pour une polarisation de type TE (champ électrique parallèle à la structure), où λ est la longueur d'onde en espace libre.

IV.3 Etude de cavités à Cristaux Photoniques 2D

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

IV.3.1 Etude de la cavité S1 pour un défaut de substitution

Une microcavité à cristaux photoniques est une structure, à l'échelle du micromètre, capable de piéger la lumière pour un temps donné. Ces dernières années, un intérêt croissant a été porté aux cavités à cristaux photoniques, qui sont des structures permettant de confiner fortement la lumière et d'obtenir ainsi des facteurs de qualités très élevés.

Ces cavités ont en effet de nombreuses applications, l'application la plus importante d'une microcavité est liée à sa propriété de ne laisser passer qu'une bande très étroite de fréquences permettant de réaliser des filtres en longueur d'onde. En télécommunication, il est déjà commun de multiplexer l'information, c'est-à-dire d'injecter dans une même fibre optique plusieurs longueurs d'onde différentes qu'il faut pouvoir filtrer en sortie. Le critère pour ces applications demeure la réalisation des cavités avec des facteurs de qualité élevés et avec des volumes modaux petits.

La partie qui suite sera consacrée à la présentation des résultats de simulation obtenus sur les cavités S_1 à cristaux photoniques, ces derniers ont été un objet de recherche intense depuis une dizaine d'années. L'intérêt particulier prêté à ce type de cavité vient du fait qu'elles présentent des facteurs de qualité extrêmement élevés.

IV.3.1.1 Variation du rayon de la maille centrale (r)

Les cavités S_1 sont celles qui possèdent à priori le plus faible volume modal. Pour calculer les paramètres caractéristiques d'une telle structure, la méthode des différences finies temporelles *FDTD 2D* est la plus utilisée. Cette méthode nécessite de disposer des conditions absorbantes aux bords du domaine de calcul qui permet d'éviter les réflexions parasites engendrées aux bords de la fenêtre du calcul *FDTD* afin de simuler un milieu ouvert.

Pour étudier l'influence de rayon de tige sur le facteur de qualité Q et la position de la longueur d'onde des modes résonnants de la cavité HI , on va effectuer une série de simulations pour chaque valeur de rayon $r=0.294$ jusqu'à $r=0.301$. Le *Tableau IV.1* présente la variation du facteur de qualité et la longueur d'onde de résonance de cavité SI en fonction de rayon de tige centrale de la structure.

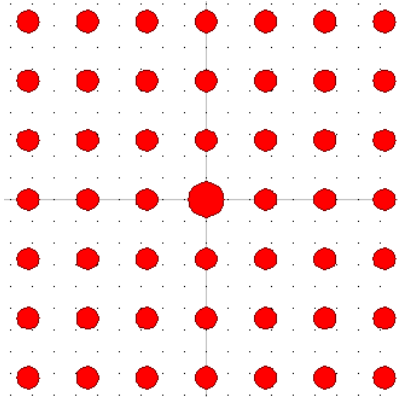


Figure IV.2 :Structure de cavité S1.

Rayon de tige centrale r (μm)	Longueur d'onde de résonance (μm)	Facteur de qualité Q
0.294	1.5092	5766.9
0.295	1.5124	5704.2
0.296	1.5163	5695
0.297	1.5193	5682.2
0.298	1.5232	5682.2
0.299	1.5267	5658.6
0.300	1.5304	5644.6
0.301	1.5338	5643.7

Tableau IV.1 : *Variation de la longueur d'onde de résonance et le facteur de qualité en fonction du rayon r de la tige centrale.*

On remarque que la position de la longueur d'onde de résonance dépend de la valeur du rayon r , Par conséquent quand on fait varier le rayon du défaut, on peut atteindre n'importe quelle fréquence située dans la bande interdite photonique. On remarque aussi que lorsqu'on augmente la taille du rayon r les longueurs d'ondes de résonance se décalent vers les grandes valeurs.

Sur la Figure IV.3, nous avons tracé la variation de facteur de qualité et la longueur d'onde de résonance de la cavité S1 en fonction de rayon de la tige centrale. D'après les résultats, il est clair que le rayon possède une grande influence sur le facteur de qualité et la longueur d'onde de résonance. En effet, le facteur Q passe de 5767 pour $r=0.294$ à la valeur 5644 pour $r=0.301$ et il en a de même pour la longueur d'onde de résonance λ_0 de la cavité qui se trouve décalée progressivement vers les longueurs d'onde élevées (λ_0 passe de $1.5092\mu\text{m}$ à $1.5338\mu\text{m}$).

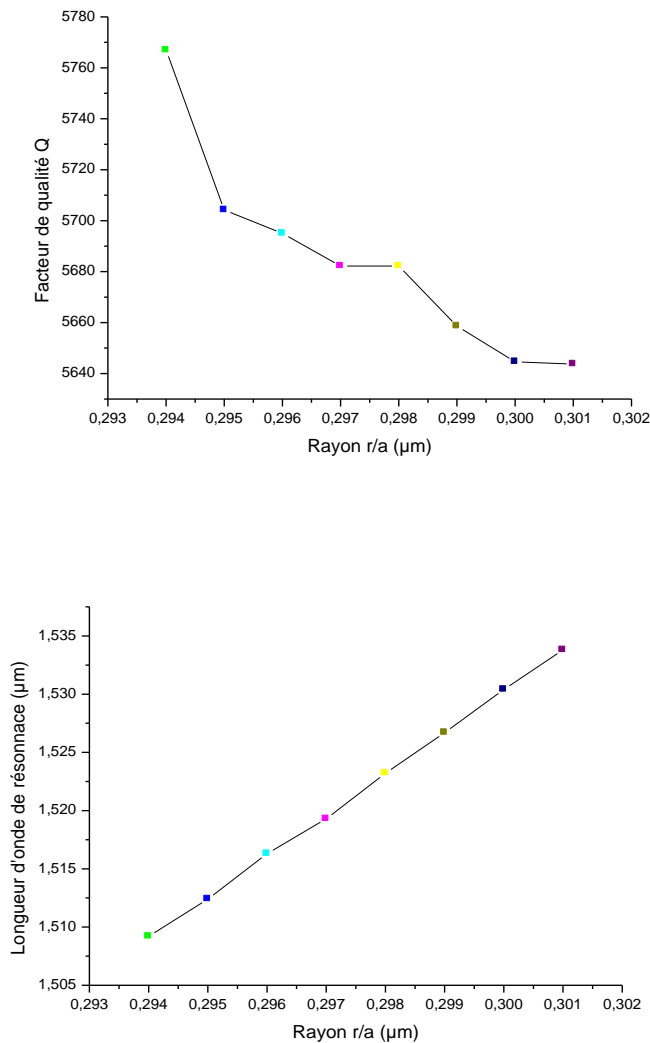


Figure IV.3 : Variation de la longueur d'onde de résonance et facteur de qualité en fonction de la variation du rayon de la tige centrale.

Nous allons calculer les spectres de transmissions de la cavité S1 pour différentes valeurs de rayon de la tige centrale. Les calculs ont été faits par le module Fullwave du logiciel RSoft et les valeurs considérées de rayon r sont entre $r = 0.294\mu\text{m}$ et $r = 0.301\mu\text{m}$, les

résultats que nous avons obtenus sont regroupés en Figure IV.4. Les spectres obtenus permettent de constater l'existence de mode de propagation pour chaque valeur de rayon de la tige centrale et chaque mode correspond en fait à la résonance de la cavité S1. Les abscisses des pics des courbes de transmissions obtenus représentent les longueurs d'ondes de résonances.

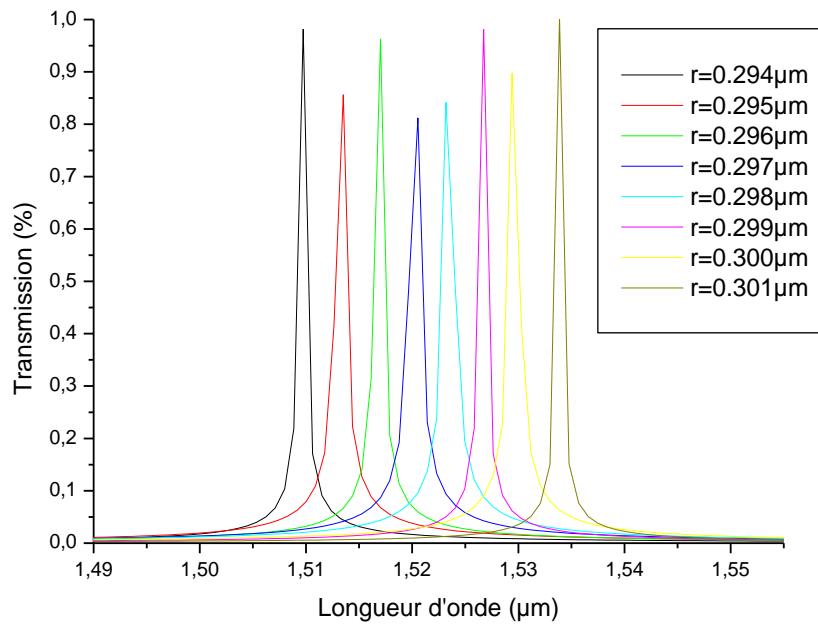


Figure IV.4 : spectre de transmission des Canaux en fonction de la variation du rayon de la tige centrale.

IV.4 Etudes des guides à cristaux photoniques

La fonction de guidage repose naturellement sur l'idée d'introduction du défaut linéique, donc la périodicité du cristal photonique est rompue et une direction privilégiée de la lumière est imposée, c'est celle du guide.

Considérons notre structure à cristal photonique, dans laquelle on va créer un défaut linéique en omettant une rangée de tiges diélectriques, ce qui correspond à la création d'un guide W1. La structure du dispositif et sa transmission pour la gamme de fréquence associée à la BIP sont rapportées sur la Figure IV.5.

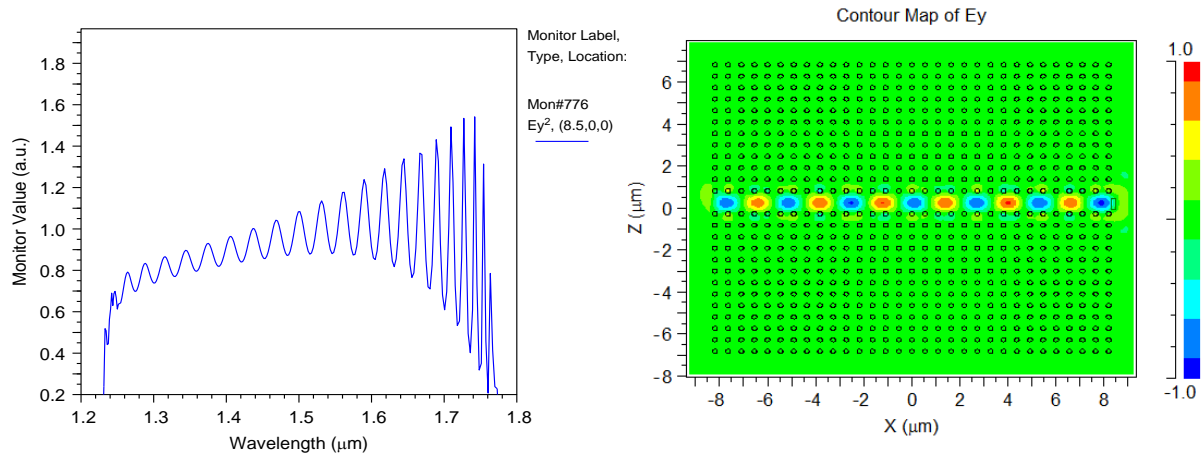


Figure IV.5 : Propagation de la lumière à l'intérieur du guide.

IV.5 Etude d'un démultiplexeur à cristal photonique

Les démultiplexeur à base de structure photonique sont obtenus par le couplage entre le guide d'onde et la cavité photonique, donc la propriété de résonance d'un démultiplexeur optique peut être modifiée en ajustant la taille du point de défaut.

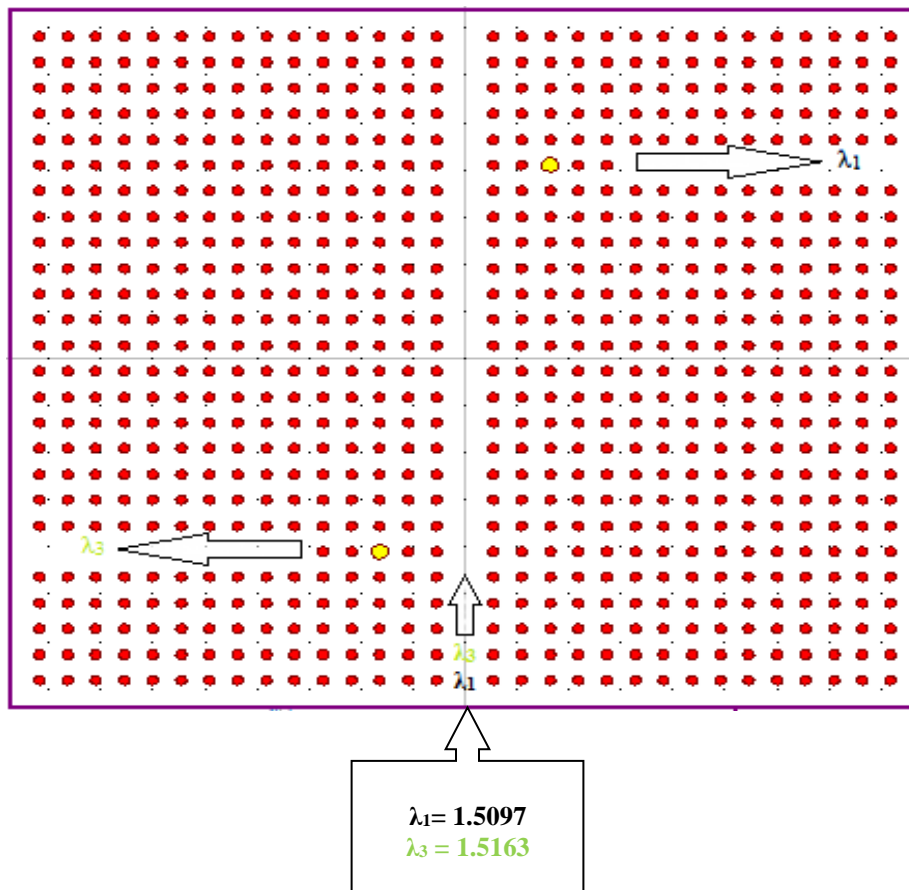


Figure IV.6 : Structure d'un démultiplexeur a deux canaux pour un défaut substitutionnel de $\lambda_1=1.5097$ et $\lambda_3=1.5163$

Dans ce travail, la fréquence de résonance de la cavité optique est contrôlée par variation du rayon du défaut ponctuel (la variation du r). Notre étude est basée sur la sélection des huit longueurs d'ondes : 1.5097 μm , 1.5124 μm , 1.5163 μm , 1.5193 μm , 1.5232 μm , 1.5267 μm , 1.5304 μm et 1.5338 μm . Ces longueurs d'ondes sont obtenues pour les défauts substitutionnels de rayon $r = 0.294, 0.295, 0.296, 0.297, 0.298, 0.299, 0.300$ et 0.301 .

Le premier démultiplexeur qui permet la sélection de la longueur d'onde de 1.5097 μm et 1.5163 μm est réalisé à partir de la cavité substitutionnelle, sa structure et sa résonance sont représentées sur la Figure IV.6.

Le deuxième démultiplexeur permet la sélection de la longueur d'onde de 1.5097 μm , 1.5163 μm , 1.5232 μm , 1.5304 μm est présenté sur la Figure IV.7.

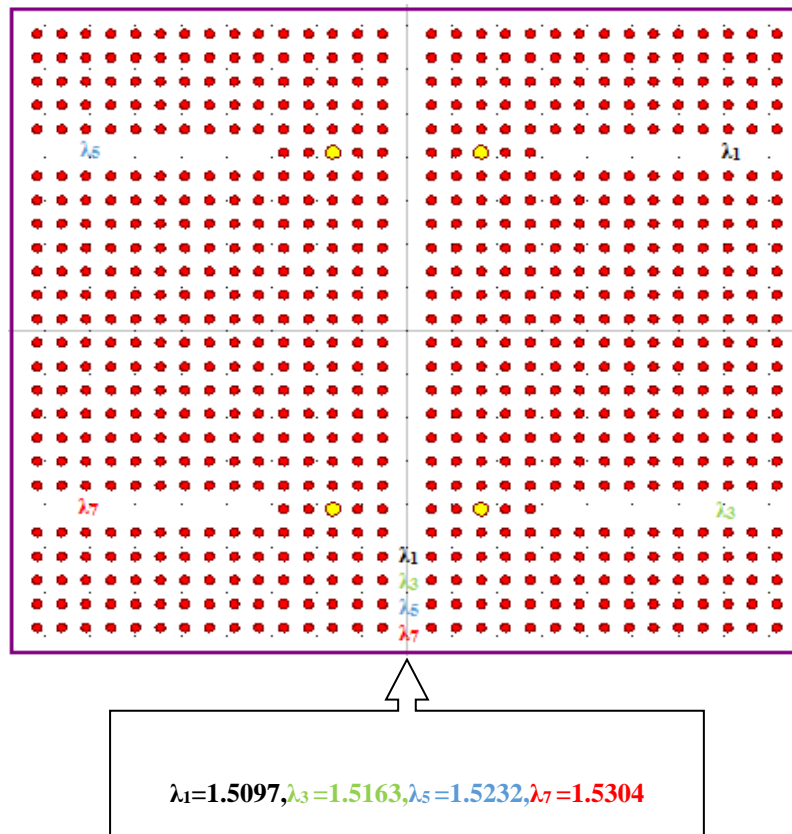


Figure IV.7 : Structure d'un démultiplexeur à quatre canaux pour un défaut substitutionnel pour $\lambda_1=1.5097$, $\lambda_3=1.5163$, $\lambda_5=1.5232$ et $\lambda_7=1.5304$

Le troisième démultiplexeur permet la sélection de la longueur d'onde de $\lambda_1=1.5097$, $\lambda_3=1.5163$, $\lambda_4=1.5193$, $\lambda_5=1.5232$, $\lambda_6=1.5267$ et $\lambda_8=1.5338$ est présenté sur la Figure IV.8.

Le quatrième démultiplexeur permet la sélection de toute la huit longueur d'onde est présenté sur la Figure IV.9.

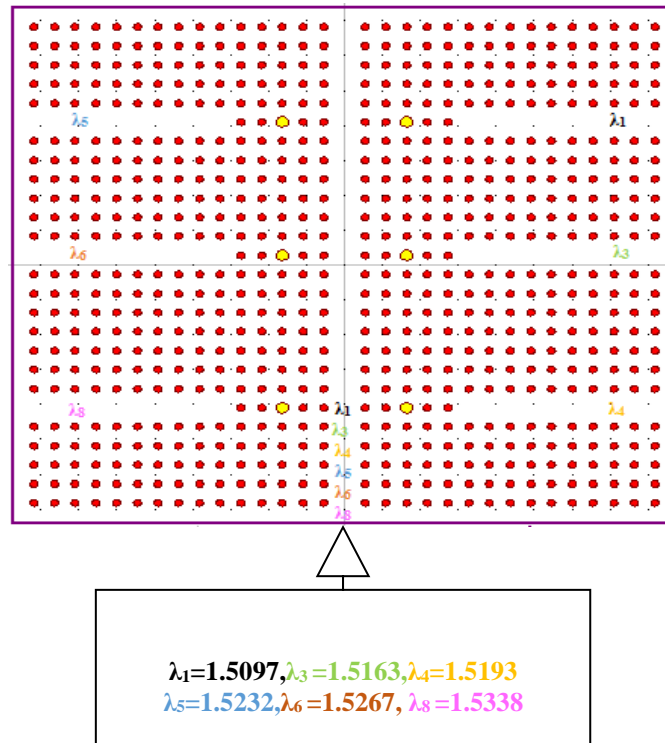


Figure IV.8 : Structure d'un démultiplexeur a six canaux pour un défaut substitutionnel pour $\lambda_1=1.5097, \lambda_3=1.5163, \lambda_4=1.5193, \lambda_5=1.5232, \lambda_6=1.5267$ et $\lambda_8=1.5338$

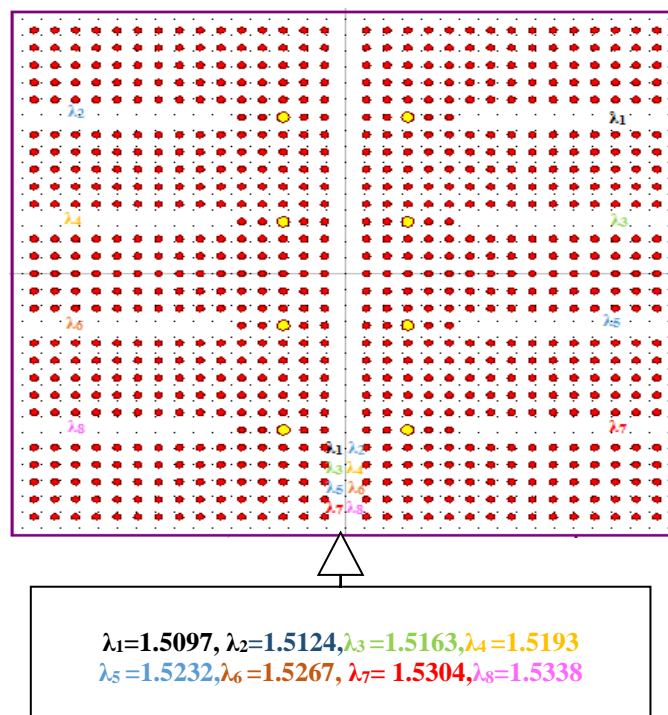


Figure IV.9 : Structure d'un démultiplexeur a huit canaux pour un défaut substitutionnel pour : $\lambda_1=1.5097, \lambda_2=1.5124, \lambda_3=1.5163, \lambda_4=1.5193, \lambda_5=1.5232, \lambda_6=1.5267, \lambda_7=1.5304$ et $\lambda_8=1.5338$.

Dans ce qui suit, nous allons présenter la propagation de la lumière pour chaque démultiplexeur en utilisant le module Fullwave du logiciel Rsoft. Les résultats que nous avons obtenus sont regroupés en figure IV.10 pour la propagation de la lumière dans un démultiplexeur a deux canaux pour des longueurs d'ondes de résonances : $\lambda_1 = 1.5097$ et $\lambda_3 = 1.5163$.

La figure IV.11 présente la propagation de la lumière dans un démultiplexeur a quatre canaux pour des longueurs d'ondes de résonances : $\lambda_1 = 1.5097$, $\lambda_3 = 1.5163$, $\lambda_5 = 1.5232$, $\lambda_7 = 1.5304$. Sur la figure IV.12, nous avons présenté la propagation de la lumière dans un démultiplexeur a six canaux pour des longueurs d'ondes de résonances : $\lambda_1 = 1.5097$, $\lambda_3 = 1.5163$, $\lambda_4 = 1.5193$, $\lambda_5 = 1.5232$, $\lambda_6 = 1.5267$ et $\lambda_8 = 1.5338$. La propagation de la lumière dans le dernier démultiplexeur a huit canaux est présenté dans la figure IV.13 pour des longueurs d'ondes de résonances : $\lambda_1 = 1.5097$, $\lambda_2 = 1.5124$, $\lambda_3 = 1.5163$, $\lambda_4 = 1.5193$, $\lambda_5 = 1.5232$, $\lambda_6 = 1.5267$, $\lambda_7 = 1.5304$ et $\lambda_8 = 1.5338$.

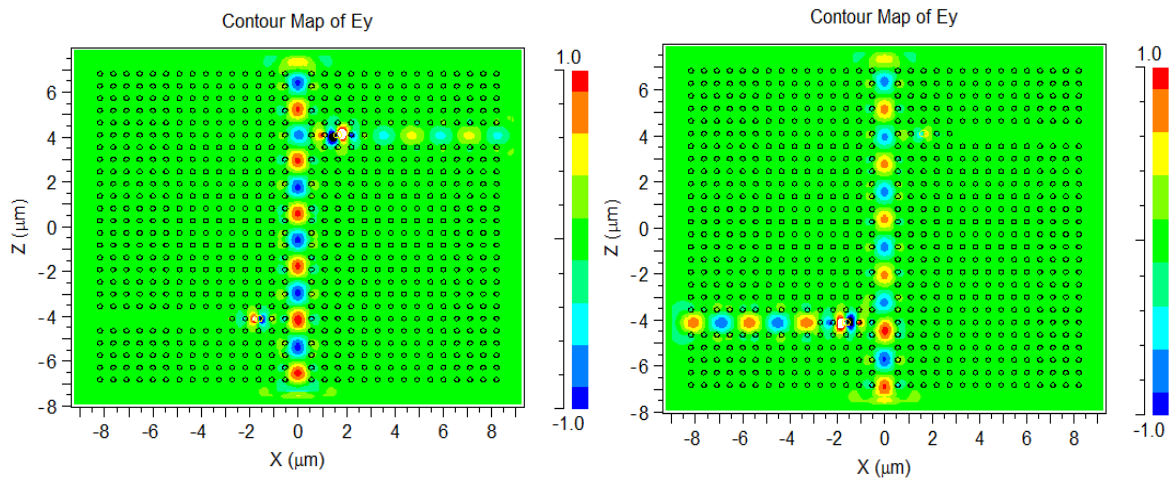


Figure IV.10 : La propagation de la lumière dans un démultiplexeur a deux canaux pour : $\lambda_1 = 1.5097$ et $\lambda_3 = 1.5163$.

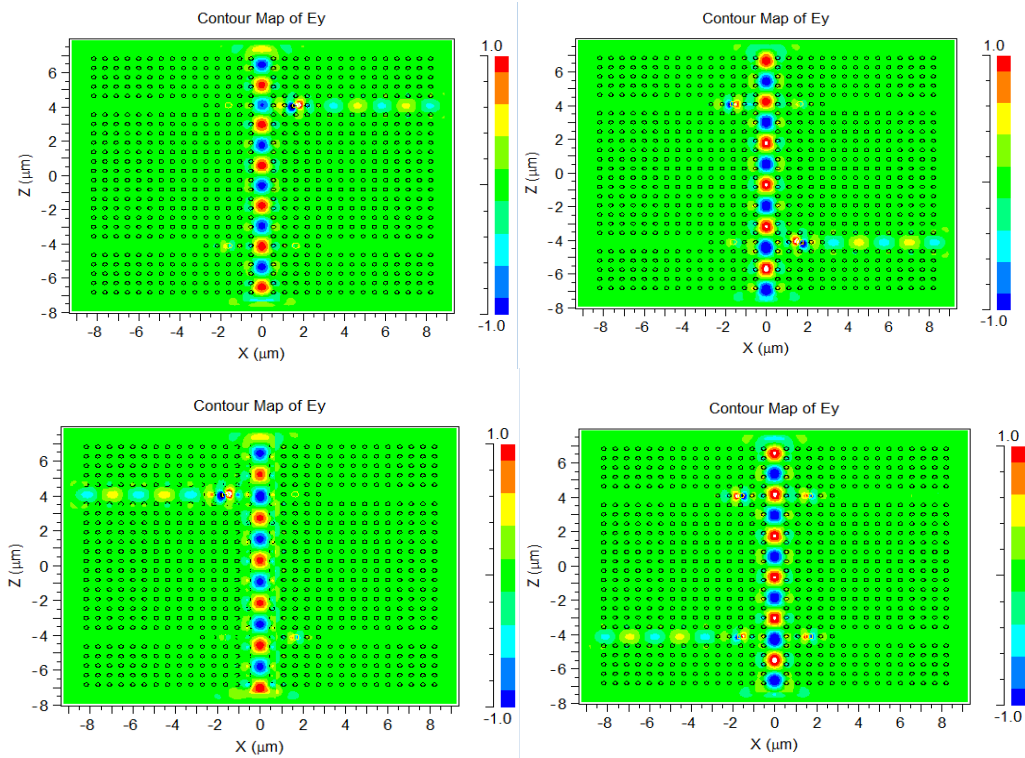
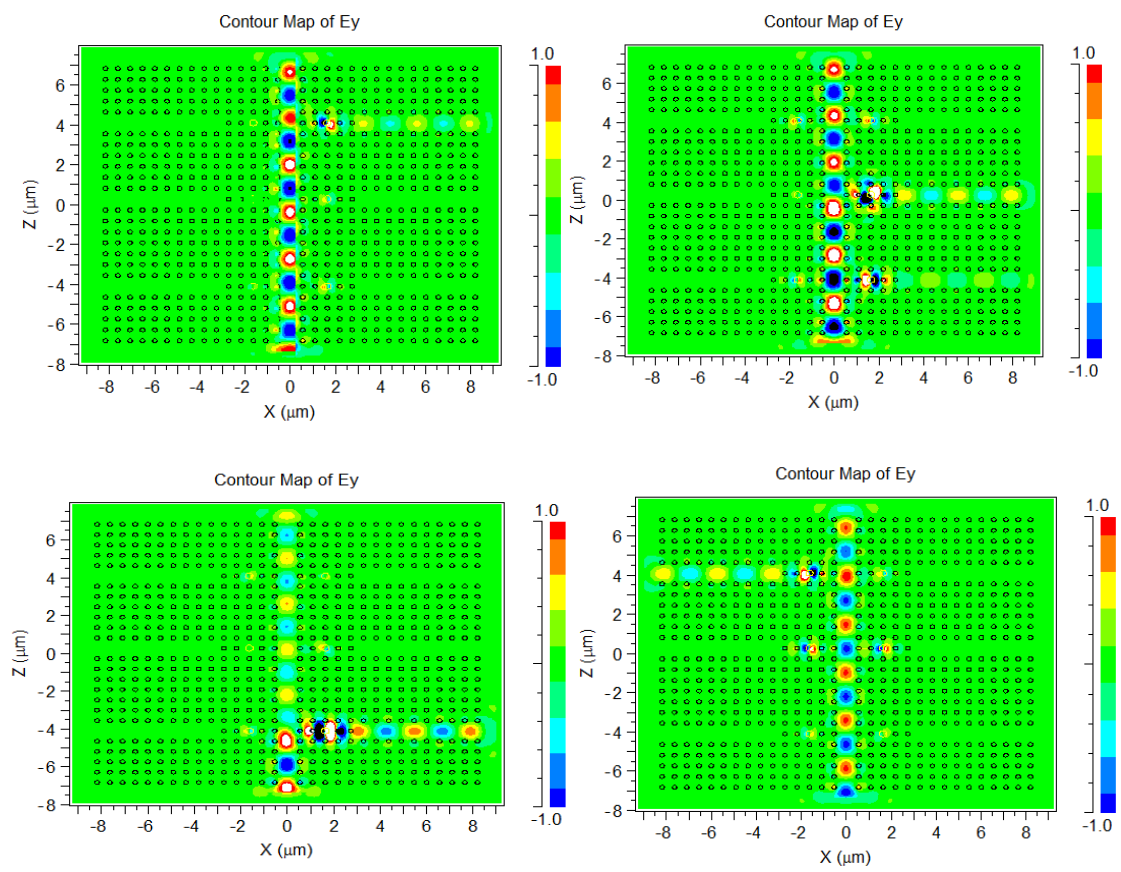


Figure IV.11 : La propagation de la lumière dans un démultiplexeur a quatre canaux pour :
 $\lambda_1=1.5097, \lambda_3=1.5163, \lambda_5=1.5232, \lambda_7=1.5304$.



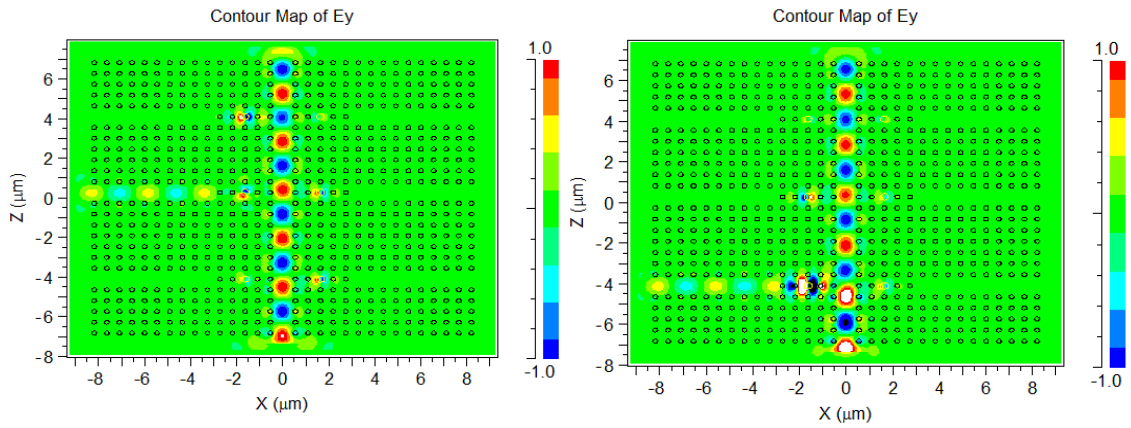
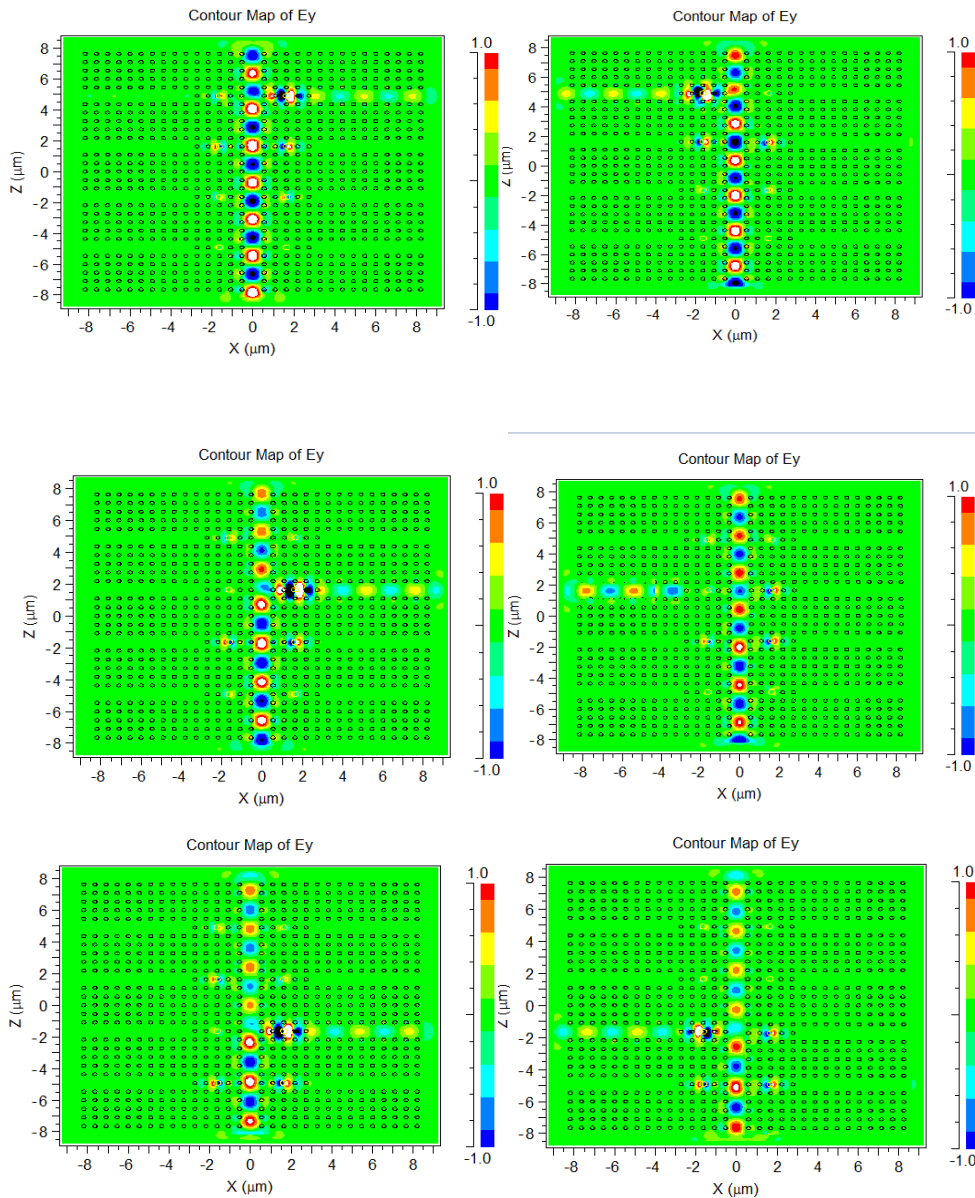


Figure IV.12 : La propagation de la lumière dans un démultiplexeur a six canaux pour : $\lambda_1=1.5097$, $\lambda_3=1.5163$, $\lambda_4=1.5193$, $\lambda_5=1.5232$, $\lambda_6=1.5267$ et $\lambda_8=1.5338$.



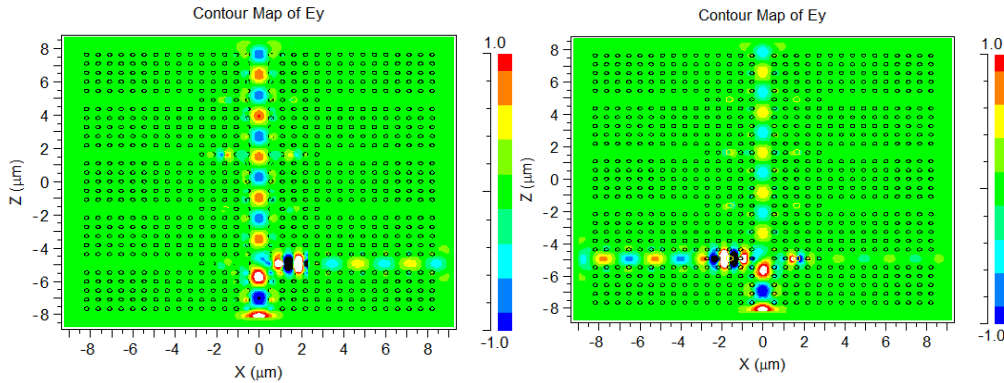


Figure IV.13 : La propagation de la lumière dans un démultiplexeur a huitcanaux pour :

$$\lambda_1=1.5097, \lambda_2=1.5124, \lambda_3=1.5163, \lambda_4=1.5193, \lambda_5=1.5232, \lambda_6=1.5267, \lambda_7= 1.5304 \text{ et} \\ \lambda_8=1.5338.$$

Le but de cette application est de prouver qu'on peut sélectionner ou extraire plusieurs longueurs d'ondes bien définies et bien distinctes à partir d'un seul signal émis , en utilisant les propriétés des démultiplexeurs à cristaux photoniques déjà étudiés. Donc en ajustant la taille du défaut, on peut atteindre n'importe quelle fréquence dans la gamme des télécoms en utilisant une seule structure à cristal photonique voir un seul dispositif. C'est une propriété inhérente aux démultiplexeurs à base des cristaux photonique qui confère à ces derniers des potentialités confirmées dans le domaine de la transmission optique.

III.6. Conclusion

Nous avons étudié au cours de ce chapitre les cavités S_1 à réseau carré pour un défaut de substitution dans un cristal photonique bidimensionnel formés des tiges diélectriques plongés dans l'air. Dans ce contexte, nous avons étudié l'influence du défaut substitutionnel sur cette cavité et nous avons montré qu'on peut atteindre n'importe quelle fréquence de résonance en ajustant ce défaut. Puis, nous avons étudié la transmission du guide w_1 à cristaux photoniques et nous avons confirmé l'existence de toutes les fréquences appartenant à la BIP. Nous avons procédé à la modélisation du démultiplexeur. Ensuite et à la fin de ce chapitre, nous avons étudié un démultiplexeur à cristaux photoniques bidimensionnels et nous avons amélioré le confinement et le guidage de la lumière dans ce composant.

Conclusion générale

Notre travail concerne la conception et l'étude d'un démultiplexeur optique, à base d'un matériau à bande interdite photonique à deux dimensions, à l'aide du logiciel Rsoft-CAD.

Nous avons étudié dans un premier temps la cavité S1 à réseau carré pour un défaut un défaut substitutionnel, nous avons expliqué l'influence de ce dernier sur cette cavité. Nous avons montré qu'on peut atteindre n'importe quelle fréquence de résonance en ajustant ce défaut substitutionnel, en suite nous avons étudié le guide w1 et nous avons vérifié à partir des courbes de la transmission l'existence de toutes les fréquences appartenant à la BIP..

Par la suite le démultiplexeur optique à base de cristal photonique a été proposé, analysé et optimisé. La structure du démultiplexeur présenté est composée de deux défauts linéaires (guides à cristal photonique) et des filtres optiques qui sont mis en œuvre par les cavités optiques insérées dans les guides d'ondes, afin de séparer le signal en longueurs d'ondes différentes en ajustant les défauts du point milieu du cristal photonique

Nous avons étudié la bande interdite photonique d'un cristal 2D, et la résonance des cavités à base des cristaux photoniques, et La conception des démultiplexeurs à cristaux photoniques et l'amélioration de leur confinement et guidage de la lumière.

Les dispositifs à base des cristaux photonique ont donc un avenir très prometteur dans le domaine des télécommunications.

Bibliographie

- [1] E. YABLONOVITCH., Physical Review Letters, 58(20), 2059-2062 (1987).
- [2] S. JOHN., Physical Review Letters 58, 2059 (1987).
- [3] E. Yablonovitch, « Photonic band-gap crystals », J. Phys: Condensed Matter, Vol 5 N°16, pp. 2443-2460, 1993.
- [4] P. C. Lacaze, « Les nanotechnologies : Concepts et applications », Lavoisier, pp 113-114, 2013.
- [5] E. Yablonovitch, Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics, Phys. Rev. Lett. 58 (20) (1987) 2059–2062.
- [6] Yablonovitch, E., et al. "Photonic Band Structure: The Face-Centered-Cubic Case Employing Nonspherical Atoms." PLOS Biology, Public Library of Science, 21 Oct. 1991.
- [7] M. Aschwanden, A. Stemmer, "Polymeric, electrically tunable diffraction grating based on artificial muscles, Opt. Lett., Vol. 31, N°17, p. 2610-2612, 2006.
- [8] L. P. Biro, Z. Bálint, K. Kertész, Z. Vértesy, G. I. Márk, Z. E. Horvath, J. Balazs, D. Mehn, I. Kiricsi, V. Lousse, and J.-P. Vigneron, Role of photonic-crystal-type structures in the thermal regulation of a lycaenid butterfly sister species pair, Phys. Rev. E, Vol. 67, p. 021907, 2003.
- [9] C. Sauvan, études de la propagation et du confinement de la lumière dans des nanostructures, thèse de doctorat en science, Université de Paris XI Orsay, 2005
- [10]. JD Joannopolous, R Meade, J Winn, Photonic Crystals: Molding the Flow of Light, Princeton University Press, Princeton, NJ 1995
- [11]. B.E.A. Saleh, M.C. Teich, Fundamentals of Photonics, Wiley Series in Pure and Applied Optics 1991.
- [12] A. Belhassos, S. Metref, Etude et simulation des cristaux photoniques, Mémoire de master Université Kasdi Merbah Ouargla, 2017
- [13] F. Benaissa, Etude et Simulation de la Propagation des Ondes Electromagnétiques dans les guides à Cristaux Photoniques-Application aux Fibres Optiques, Memoire De Magister, Université De Abou-Bakr Belkaïd – Tlemcen, 2013
- [14] BENDJELLOUL Rahima « Etude du couplage dans les guides d'onde à cristaux photoniques » Memoire De Magister, Université De Mentouri Constantine, 2009
- [15] D.CASSAGNE, C. JOUANIN, D. BERTHO « Hexagonal photonic and gap structures » Physical Review B, Vol. 53, March 1996, pp.7134-7141.

- [16] G. Kiriakidis, N. Katsarakis, Fabrication of 2D and 3D PBG crystals in the GHz and THz regions, *J. Materials Physics and Mechanics*, vol. 1, pp. 20–26, 2000.
- [17] C. Oh, M.J. Escuti, Time domain analysis of periodic anisotropic media at oblique incidence: an efficient FDTD implementation, *J. Optics Express*, vol. 14, pp. 11870–11884, 2006.
- [18] E. Yablonovitch, “Photonic band-gap structures,” vol. 10, no. 2, 1993.
- [19] A. Hocini, R. Moukhtari, D. Khedrouche, A. Kahlouche, M. Zamani, Magneto-photonic crystal microcavities based on magnetic nanoparticles embedded in silica matrix, *Opt. Commun.* 384 (2017) 111–117.
- [20] B. Chen, L. Huang, Y. Li, C. Liu, G. Liu, A compact optical wavelength splitter in one-dimensional photonic crystal waveguides, *J. Mod. Opt.* 59 (13) (2012) 1186–1193.
- [21] M. Banihashemi, V. Ahmadi, Nonlinear response of high efficient in-plane channel drop filter in Si heterostructure photonic crystal slab, *J. Mod. Opt.* 58 (7) (2011) 587–592.
- [22] A. Harhouz, A. Hocini, Design of high-sensitive biosensor based on cavity-waveguides coupling in 2D photonic crystal, *J. Electromagn. Waves Appl.* 29 (5) (2015) 659–667.
- [23] M. Koshiba, S. Member, and A. Abstract, “Wavelength Division Multiplexing and Demultiplexing With Photonic Crystal Waveguide,” vol. 19, no. 12, pp. 1970–1975, 2001.
- [24] F. Lacour, *Propagation de la lumière dans les nanostructures et cristaux photoniques planaires associés aux guides d’onde : fabrication et caractérisation*, thèse de doctorat en Optique., Université de Franche-Comté, 2005.
- [25] C. Blin, *Développement de cristaux photoniques en diamant : modélisation, technologie et application à la biodétection*, Thèse de doctorat en Chimie - Physique des matériaux, Université de Pierre et Marie Curie, 2015.
- [26] P. Pottier, C. Seassal, X. Letartre, J.L. Leclercq, P. Victorovitch, D. Cassagne et C. Jouanin, “Triangular and Hexagonal High Q-Factor 2-D Photonic Bandgap Cavities on III-V Suspended Membranes,” *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 17, p.2058, 1999.
- [27] C.J.M. Smith, H. Benisty, D. Labilloy, U. Oesterle, R. Houdré, T.F. Krauss, R.M. De La Rue et C. Weisbuch, “Near-infrared microcavities confined by two-dimensional photonic crystals », *Electronics Letters*, vol. 35, p.228, 1999.

- [28] P. R. Villeneuve, S. Fan, et J. D. Joannopoulos, “ Microcavities in photonic crystals: mode symmetry, tunability and coupling efficiency,” *Physica. Review. B*, vol. 54, p.7837, 1996.
- [29] R. K. Lee, O. J. Painter, B. D’Urso, A. Scherer, et A. Yariv, “ Measurement of spontaneous emission from a two-dimensional photonic band gap defined microcavity at near infrared wavelengths ,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 74, p.1522, 1999.
- [30] O. Painter, J. Vuckovic, et A. Scherer, “Defect modes of a two dimensional photonic crystal in an optically thin dielectric slab,” *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 16, p.275-285, 1999.
- [31] J.M. Lourtioz, D. Maystre, H. Benisty, V. Berger, J. M. Gerard, A. Tchelnokov, « Le cristaux photoniques ou la lumière en cage », GET et Lavoisier, Paris, 2003.
- [32] H. Rigneault, « la nanophotonique » GET et Lavoisier, Paris, 2005.
- [33] O. Levy, B.Z. Steinberg, A. Boag, S. Krylov, I. Goldfarb, « Mechanical tuning of two-dimensional photonic crystal cavity by micro Electro mechanical flexures », *Sens. and Act. A.*, Vol 139, N° 1-2, pp 47
- [34] S. Prorok, *Photonic Crystal Cavities*, Nanophotonics and integrated optics, Whitepaper, Germany, 2013.
- [35] M. Zelsmann, « *Nano-structures à base de cristaux photoniques en silicium sur isolant pour les circuits intégrés photoniques et l’émission de lumière* », Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier Grenoble 1, 2003.
- [36] P.Pottier, C. Seassal, X. Letartre, J.L. Leclercq, P. Victorovitch, D. Cassagne et C. Jouanin « Triangular and Hexagonal High Q-Factor 2-D Photonic Bandgap Cavities on III-V Suspended Membranes », *IEEE J. Lightwave Technol.* Vol 17, N° 11, pp 2058 – 2062, 1999.
- [37] I. Bouderdji, « *Conception d'un démultiplexeur à cristaux photoniques bidimensionnels* », Mémoire de master, Université de M’sila, 2016
- [38] C. Grillet, « Microcomposants optiques à base de cristaux photoniques bidimensionnels pour l’optique intégrée », Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 2003.
- [39] O. Levy, B. Z. Steinberg, et al., « *Mechanical tuning of two-dimensional photonic crystal cavity by micro electro mechanical flexures* », *Sensors and Actuators A:Physical*, Vol. 193, n° 1, pp. 47–52, 2007

- [40] M. Zelsmann, « *Nano-structures à base de cristaux photoniques en silicium sur isolant pour les circuits intégrés photoniques et l'émission de lumière* », Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier Grenoble 1, 2003.
- [41] O. Levy, B. Z. Steinberg, et al., « *Mechanical tuning of two-dimensional photonic crystal cavity by micro electro mechanical flexures* », *Sensors and Actuators A:Physical*, Vol. 193, n° 1, pp. 47–52, 2007.
- [42] A. Yariv, Y. Xu, R. K. Lee et A. Scherer, « *Coupled-resonator optical waveguide: a proposal and analysis* », *Optics Letters*, vol. 24, n° 11, pp. 711-713, 1999. 0
- [43] N. Stefanou et A. Modinos, « *Impurity bands in photonic insulators* », *Phys. Rev. B*, vol. 57, n° 19, pp. 12127–12133, 1998.
- [44] M. Bayindir, B. Temelkuran et E. Ozbay, « *Propagation of photons by hopping: A waveguiding mechanism through localized coupled cavities in threedimensional photonic crystals* », *Phys. Rev. B*, vol. 61, n° 18, pp. 11855–11858, 2000.
- [45] A. Hocini, A. Harhouz, *Modeling and analysis of the temperature sensitivity in two-dimensional photonic crystal microcavity*, *J. Nanophotonics*, vol. 10, pp. 16007–16017, 2016.
- [46] P. S. J. Russell, *Photonic crystal fibers*, *J. Lightwave Technology*, vol. 24, pp. 4729–4749, 2006
- [45] A. J. M. Adnan, S. Shaari, R. Mohamed, I. Tengku, *Photonic Crystal Demultiplexer with Square Defect Scatterers*, *J. IEEE Lasers & Electro Optics & The Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics*, 2009.
- [47] L. Weng, *An introduction to photonic crystals*, *Optics and Photonics*, Springer, 2012.
- [48] Y. Akahane, T. Asano, H. Takano, B.S. Song, Y. Takana, S. Noda, *Two dimensional photonic crystal slab channel drop filter with flat top response*, *J. Optics Express*, vol. 13, pp. 2512–2530, 2005.
- [49] L. Weijia, Y. Daquan, S. Guansheng, T. Huiping, J. Yuefeng, *Design of ultra compact all-optical XOR, XNOR, NAND and OR gates using photonic crystal multi-mode interference waveguides*

- [50] J. J. Bonnefois . « Modelisation d'effets non lineaires dans les cristaux photoniques, application a la limitation optique », Thèse de doctorat, université de Nanterre - Paris X, 2006.
- [51] A. Rostami *, H. Alipour Banaei, F. Nazari, A. Bahrami, An ultra compact photonic
[52] crystal wavelength division demultiplexer using resonance cavities in a modified Y-branch structure
- [53] Abri Badaoui Hadjira , «Etude Et Conception Des Micro Composants A Base Des Cristaux Photoniques Bidimensionnels» Thèse De Doctorat Université Tlemcen Décembre (2012)
- [54] L. Weijia, Y. Daquan, S. Guansheng , T. Huiping, J. Yuefeng, Optimization transmission of photonic crystal coupled cavity and design of demultiplexer for wavelength division multiplexing application
- [55] M. Plihal and A. A. Maradudin, Phys. Rev. B 44, 8565 (1991).
- [56] R. D. Meade, K. D. Brommer, A. M. Rappe, and J. D. Joannopoulos, Appl. Phys. Lett. 61, 495 (1992).
- [57] B. Manzanares-Martinez, Phys. Rev. B 68 134303 (2003)78.
- [58] C. Herring, Phys. Rev. 57, 1169 (1940).

الملخص

البلورات الفوتونية هي بنية مركبة تتميز بمعامل انكسار دوري في اتجاه واحد، اتجاهين أو ثلاثة اتجاهات من الفضاء. دورية معامل الإنكسار البصرية تؤدي إلى ظهور رقعات ضوئية ممنوعة: نطاقات التردد التي بالنسبة إليها لا يمكن للضوء أن ينتشر في الهيكل، بغض النظر عن استقطابه و جهة انتشاره. والهدف من هذا العمل هو تصميم 'كريستال الضوئية' ديمولتيلييكسور لدراسة وتحسين وضعهم وتوجيه الضوء.

الكلمات المفتاحية

البلورات الضوئية ثنائية الأبعاد , موجة في البلورات الضوئية , تجويف في البلورات الضوئية.

Résumé

Les cristaux photoniques sont des structures dont l'indice diélectrique varie périodiquement selon une ou plusieurs directions de l'espace. Cette variation périodique de l'indice optique entraîne l'apparition de bandes interdites photoniques : gammes de fréquences pour lesquelles la lumière ne peut pas se propager dans la structure, quelque soit sa polarisation et sa direction de propagation.

Le but de ce travail est l'étude la conception des démultiplexeurs a cristaux photoniques et l'amélioration de leur confinement et guidage de la lumière.

Mots clés :

Cristaux photonique bidimensionnels, Guide d'onde à cristaux photoniques, cavité à cristaux photoniques.

Abstract:

Photonic crystals (PhC) are periodic dielectric structures, where the periodicity varies in one, two or three dimensions of space. The periodicity of the refractive index leads to the appearance of photonic bands gap: Frequency ranges for which light can not propagate in the structure, whatever its polarization and propagation direction.

The purpose of this job is study the comprehension of demultiplexers has crystals photonic and the improvement of their confinement and guidance of light

Keywords:

Two-dimensional crystals photonic, Guide of wave to photonic crystals, cavity with photonic crystals.