

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد – تلمسان –

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En : Télécommunications

Spécialité : Systèmes de Télécommunications

Par : Boukhira Souad

Sujet

Exploitation des nouveaux matériaux pour la conception d'un filtre ultra sélectif à haut facteur de qualité : Application aux démultiplexage DWDM

Soutenu publiquement, le 07 / 07 / 2021 , devant le jury composé de :

Mme MELIANI Maghnia	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
Mme BADAOUI Hadjira	Professeur	Univ. Tlemcen	Encadrante
MR. RAHMI Bachir	Doctorant	Univ. Tlemcen	Co- Encadrante
MR. ABRI Mehadjji	Professeur	Univ. Tlemcen	Examineur

Dédicace

C'est grâce à Allah seul que j'ai pu achever ce travail. Je le dédie :
A mes chers parents, pour leurs sacrifices, leur amour, et leur soutien tout au long de mes études. Que dieu leur procure bonne santé et longue vie.

A mon cher mari, pour sa compréhension et son soutien tout au long de ce projet, et qui a toujours su être là pour moi.

A mes chers beaux parents pour leur amour, et leur soutien au long de mes études. Que dieu leur procure bonne santé et longue vie.

A mes chers frères et sœur.

A mes chers belles sœurs.

A toute ma famille, mes amis.

A mes professeurs et à mon encadreur pour son immense aide,
Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis Merci.

SOUAD

Remerciements

Tout d'abord, tous nos louanges à ALLAH, le clément et le miséricordieux de nous avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Nos chaleureux remerciements pour notre chère encadreur Madame ABRI Née BADAoui Hadjira Professeur à l'Université Abou-Bekr Belkaid pour son soutien, sa générosité, et qui n'a pas hésité à nous donner toutes les informations et conseils judicieux afin de nous orienter au cours de l'élaboration de ce travail.

Nos profonds respects et remerciements à Monsieur ABRI Mehadji Professeur à l'Université Abou-Bekr Belkaid pour avoir pris la peine d'examiner notre travail et pour le temps qu'il a consacré afin de lire ce document.

J'adresse aussi mes vifs remerciements à Madame MELIANI Maghnia Professeur à l'Université Abou-Bekr Belkaid d'avoir accepté de juger ce travail en présidant le jury, vous nous avez honoré d'accepter de siéger parmi notre jury de mémoire.

Mes sincères remerciement à Monsieur RAHMI BACHIR docteur en télécommunications.

A la fin, nous exprimons également notre gratitude à tous les professeurs enseignants qui ont collaboré à notre formation depuis notre premier cycle d'étude jusqu'à la fin de notre cycle universitaire. Qu'ils trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude.

Résumé

Les cristaux photoniques sont des structures périodiques de matériaux diélectriques ou métalldiélectriques modifiant la propagation des ondes électromagnétiques de la même manière qu'un potentiel. Ces structures sont désignées par l'appellation de cristaux photoniques à une, deux ou trois dimensions, influence sur la propagation des ondes électromagnétiques à l'intérieur de la structure CPs. Ces derniers présentent une propriété optique unique qui est la bande interdite photonique (BIP) dans laquelle aucun mode électromagnétique ne peut se propager. Cette BIP est intéressant pour plusieurs applications dans le domaine de la télécommunication optique comme le filtrage.

Dans ce mémoire nous avons étudié en particulier les filtres de type add-drop basés sur le couplage latéral entre des guides d'ondes et les résonateurs en anneaux à cristaux photoniques (PCRRs).

La conception des composants optiques est basée sur l'utilisant de la méthode des éléments finis comme outil mathématique de simulation par le biais du logiciel adéquat appelé COMSOL Multiphysics.

Mots clés :

Cristaux photoniques, PWE, la carte des bandes, maille carrée, filtre, filtre add-drop, COMSOL.

Abstract

Photonic crystals are periodic structures of dielectric or metallo-dielectric materials that modify the propagation of electromagnetic waves in the same way as a potential. These structures are referred to as one, two or three dimensional photonic crystals, which influence the propagation of electromagnetic waves within the CPs structure. The latter have a unique optical property which is the photonic band gap (BIP) in which no electromagnetic mode can propagate. This BIP is interesting for several applications in the field of optical telecommunications such as filtering.

In this thesis we have studied filters (add-drop filter) based on the lateral coupling between waveguides and photonic crystal ring resonators (PCRRs).

The design of these optical components is based on using the finite element method as a mathematical simulation tool through the appropriate software called COMSOL Multiphysics.

Key words:

photonic crystals, PWE, band map, square mesh, filter, add-drop filter, COMSOL.

ملخص

البلورات الضوئية هي هياكل دورية من المواد العازلة أو المعدنية العازلة التي تعدل انتشار الموجات الكهرومغناطيسية بنفس طريقة الجهد. يشار إلى هذه الهياكل على أنها بلورات فوتونية أحادية أو ثنائية أو ثلاثية الأبعاد ، والتي تؤثر على انتشار الموجات الكهرومغناطيسية داخل بنية CPs. هذا الأخير له خاصية بصرية فريدة وهي فجوة النطاق الضوئية (BIP) التي لا يمكن أن ينتشر فيها أي وضع كهرومغناطيسي. هذا BIP مثير للاهتمام للعديد من التطبيقات في مجال الاتصالات الضوئية مثل التصفية.

في هذه الأطروحة درسنا المرشحات (مرشح الإضافة) بناءً على الاقتران الجانبي بين أدلة الموجة والرنانات الحلقية البلورية الضوئية (PCRR). يعتمد تصميم هذه المكونات الضوئية على استخدام طريقة العناصر المحدودة كأداة محاكاة رياضية من خلال البرنامج المناسب المسمى COMSOL Multiphysics

الكلمات الرئيسية

البلورات الضوئية ، PWE ، خريطة النطاق ، شبكة مربعة ، مرشح ، مرشح إضافة قطرة ، COMSOL

Liste des Abréviations

CP : cristal photonique
1D : structure à une dimension.
2D : structure à deux dimensions.
3D : structure à trois dimensions.
 n_h : L'indice de réfraction du matériau de haut indice.
 n_l : L'indice de réfraction du matériau de bas indice.
 δ : contraste d'indice.
f: facteur de remplissage.
 V_i : Volume occupé par le matériau de permittivité ϵ_i
A : Volume de la cellule.
a : la période.
 ϵ : permittivité diélectrique.
 a_1 : l'épaisseur de la couche de permittivité ϵ_1 .
 a_2 : l'épaisseur de la couche de permittivité ϵ_1 .
 \mathbf{a}_i et \mathbf{b}_j : les vecteurs des réseaux réel et réciproques.
 δ_{ij} : le symbole de Kronecker.
PWE : méthode des ondes planes.
 \vec{E} : Champ électrique (volts/mètre).
 \vec{B} : Densité de flux magnétique (tesla).
 ϵ_0 : Permittivité du vide.
 μ_0 : Perméabilité du vide : $1/36\pi \times 10^{-9}$ F/m.
 \vec{H} : Vecteur excitation magnétique (ampères/mètre).
 \vec{D} : Vecteur déplacement électrique (coulombs/mètre²).
 ρ : densité de charges électriques (coulombs/mètre (1D) , coulombs/mètre² (2D) coulombs/mètre³ (3D)).
 \vec{j} : Vecteur densité de courant (Ampères/ metre²).
FDTD : Finite-Difference Time-Domain.
ADF : add-drop filtre.
 n_0 : l'indice de réfraction linéaire.
I: intensité local de la lumière.
K : est un entier.
PCRR : Photonic Crystal Ring Resonator, résonateur en anneau à cristal photonique.
DWDM : Dense Wavelength Division Multiplexed.

Liste des figures

Chapitre 1

Figure 1.1 : light-emitting diode.

Figure 1.2 : (a) Aile de papillon, (b) Coupe d'une aile de papillon observée au MEB.

Figure 1.3 : Agrandissement d'une plume de paon au microscope montrant la structure des Barbules. Chaque barbule est divisée en une série de cuvettes (flèche rouge).

Figure 1.4 : Schéma d'un miroir de Bragg 1D.

Figure 1.5 : Représentation schématique de l'interférence des ondes réfléchies par chaque dioptré.

Figure 1.6 : période d'un cristal photonique unidimensionnel.

Figure 1.7: Structure périodique 2D connectée.

Figure 1.8 : Structure périodique 2D déconnectée.

Figure 1.9 : Structure « La Yablonovite ».

Figure 1.10 : Image MEB (Microscopie Electronique à Balayage) d'un cristal photonique du type tas de bois fabriquée par lithographie UV dans du silicium.

Figure 1.11: une opale.

Figure 1.12: Schéma montrant le principe des arrangements pour des cristaux photoniques unidimensionnels (1D), bidimensionnels (2D) et tridimensionnels (3D).

Figure 1.13 : réseau carré.

Figure 1.14: réseau triangulaire.

Figure 1.15: réseau hexagonal.

Figure 1.16: réseau réciproque.

Figure 1.17: zone de Brillouin.

Figure 1.18 : La maille de Wigner- Seitz.

La figure 1.19 : illustre la zone de Brillouin irréductible pour un réseau carré et triangulaire.

Figure 1.20: Diagramme de bande d'un BIP 2D en polarisation TM et TE.

Figure 1.21 : diagramme de bande CP 3D.

Figure 1.22 : Direction de E^{\rightarrow} , H^{\rightarrow} , k^{\rightarrow} des faisceaux incidents, réfléchi et transmis en polarisation TE.

Figure 1.23 : les défauts ponctuels : (a) défauts substitution, (b) et (c) défauts de lacunaire.

Figure 1.24: Exemple de guide W1 à cristal photonique triangulaire de trous d'air sur un substrat de silicium sur isolant.

Figure 1.25 : exemple de maillage triangulaire.

Figure 1.26: Guide réfractif : modèles de rayons en zig-zag avec réflexions totales et ondes évanescentes b) Guidage par bande interdite photonique.

Figure 1.27: la distribution du champ est autour du défaut en polarisation. (a) Rectiligne (b) Courbures 90° (simulée par le logiciel Rsoft).

Figure 1.28 : Spectre de transmission en mode ΓK et ΓM d'une structure W5 du réseau triangulaire de trou d'air de facteur de remplissage $r/a = 0.27$ dans $Ti : LiNbO_3$.

Figure 1.29 : (a) Représentation d'un filtre add / drop, (b) Principe de fonctionnement. Système à 4 accès constitué d'un résonateur en anneaux et de deux guides d'ondes.

Figure 1.30 : Exemple de réalisation expérimentale d'un filtre add-drop constitué de deux guides d'onde diffractifs et d'une cavité linéique dans un cristal photonique membranaire. Un peu plus de 80% de la puissance se propageant dans le guide d'onde bus a été transférée dans le guide d'onde drop, vers l'avant, autour de $1.537 \mu m$.

Figure 1.31 : spectre de transmission normalisé à base d'un résonateur hexagonal

Figure 1.32: Images MEB des cavités de type H2 (a), et de type L3 (b) fabriquées dans la salle blanche de l'IEF.

Figure 1.33 : Exemple d'ingénierie de défauts. Une cavité H1 modifiée.

Figure 1.34: Distribution de la composante Hz du champ magnétique pour les différents modes de cavité.

Figure 1.35 : schéma d'un démultiplexeurs.

Figure 1.36 : Diviseur de puissance à CPh 2D.

Figure 1.37: Principe de démultiplexeur spectrographe.

Figure 1.38 : illustration de l'utilisation de la mini-stopband.

Chapitre2

Figure 2.1: – Filtre add-drop vertical composé d'un résonateur à double cristaux photoniques 1D et de deux guides identiques situés de part et d'autre de la cavité. La position du dipôle d'excitation est donnée par "x" et les symboles R, T, Davant et Derrière désignent respectivement les puissances transmises et réfléchies dans le guide Bus et les puissances transmises vers l'arrière (Backward) et vers l'avant (Forward) dans le guide Drop.

Figure2.2 : Conception schématique et simulation du résonateur à anneau quasi carré QSRR proposé. (a) principal de couplage. (b) L'esquisse finale du conception proposée. (c) Les résultats de transmission simulés QSRR pour tous les rayons relatifs intérieurs et les constantes de réseau donnés $a=0,53$ m et $a_{in}=0,3747$ m. (d) Distribution du champ électrique à la longueur d'onde $1,523 \mu\text{m}$ avec $r_{in} = 0,18 \times a$.

Figure :2.3 : (a) structure schématique, (b) spectres de transmission normalisés au niveau de trois ports de sortie B, C, D pour les PCRR avec et sans diffuseurs ; (c) Les modèles de champ électrique pour les canaux de passage (résonance : $\lambda_0 = 1500$ nm) et de chute (sur résonance : $\lambda_1 = 1567$ nm).

Figure2.4 : (a) Structure schématique et (b) spectres de transmission normalisée d'un CDF en forme de T.

figure2.5 : Diagramme de bande carrée PhC sans défaut et distribution du champ électrique aux longueurs d'onde $1,316 \mu\text{m}$ et $1,558 \mu\text{m}$. Les paramètres sont fixés tels que : $n=f(\lambda)$ [40], $r = 0,21 \times a$, et $a = 0,53$ m.

Figure2.6 : simulation du démultiplexeur large bande splitter T. (a) La conception schématique des séparateurs où $r_1 = 0,245 \times a$, $r_2 = 0,327 \times a$ et $r_3 = 0,42 \times a$. (b) Les résultats de la simulation représentant le coefficient de transmission entre l'entrée et les ports 1 et 2. (c) Le champ électromagnétique diffusé pour la longueur d'onde correspondante $1,3106$ m. (d) Le champ électromagnétique diffusé pour la longueur d'onde correspondante $1,5518$ m.

Figure2.7 : Les résultats de transmission simulés QSRR pour tous les rayons relatifs intérieurs donnés, la constante de réseau de fond $a=0,53$ m et la constante de réseau intérieur $a_{in}=0,3747$ m.

Figure2.8 : L'esquisse finale du démultiplexeur multicanal bibande.

Figure2.9 : Spectre de transmission normalisé du circuit proposé. (a) La transmission normalisée du deuxième 2e bloc (environ $1,31 \mu\text{m}$) où $a_{1,31} = 0,45$ m et $r_{in}(\lambda_r)/a_{1,55}=s(\lambda_r)$. (b) La transmission normalisée du premier 1er (bloc autour de $1,55$ m) où $a_{1,55} = 0,53$ m et $r_{in}(\lambda_r)/a_{1,55}=s(\lambda_r)$. Avec λ_r est la valeur de longueur d'onde de résonance et "s" est donné comme vecteur linéaire comme $s(\lambda_r) = [0,18, 0,19, 0,20, 0,21, 0,225, 0,24, 0,255, 0,27]$.

Figure2.10: structure d'un diviseur : (a) 1x2 avec une jonction Y, (b) 1x4 avec une jonction Y, (c) 1x2

Figure2.11: Répartition du champ magnétique Hz : (a) diviseur en Y (1x2), (b) diviseur en Y (1x4), (c) diviseur en T (1x2), (d) diviseur en T (1x4).avec une jonction T, (d) 1x4 avec une jonction T.

Figure 2.12: Principe de la commutation tout optique, (a) : auto-commutation, (b) : Commutation par un signal de commande.

Figure 2.13 : Schéma représentant une commutation optique utilisant le décalage du bord de la BIP. Les courbes rouges et noires correspondent aux spectres de transmission avant et après le signal de pompe respectivement.

Figure 2.14 : Schéma représentant une commutation optique utilisant le décalage du mode résonant. Les courbes noire et rouge correspondent aux spectres de transmission avant et après le signal de pompe, respectivement.

Figure 3.15 : (a) Principe de la bistabilité optique, (b) Courbe de bistabilité optique, représentée par une boucle d'hystérésis qui lie deux états d'équilibre, qui fonctionnent aux intensités inférieure et élevée. La courbe à tiret correspond à un mode instable du système.

Figure 2.16 : (a) OR gate structure. (b) $1 \text{ OR } 0 = 1$. (c) $0 \text{ OR } 1 = 1$. (d) $1 \text{ OR } 1 = 1$. The OR gate structure parameters are set such as: $n = 3.28$, $r = 0.188 \times a$ and $a = 640 \text{ nm}$.

Figure 2.17 : (a) XOR structure de porte. (b) $1 \oplus 0 = 1$. (c) $0 \oplus 1 = 1$. (d) $1 \oplus 1 = 0$. The XOR les paramètres de la structure de la porte sont définis tels que : $n = 3.28$, $r = 0.188 \times a$ and $a = 640$

Chapitre 3

Figure 3.1 : Structure déconnectée sans défaut.

Figure 3.2 : La propagation de champ électrique E_z dans la structure sans défaut.

Figure 3.3 : Réponse spectrale de transmission et de réflexion dans une structure sans défaut.

Figure 3.4 : La structure du cristal photonique formée par un réseau carré, avec un défaut de ligne.

Figure 3.5 : Répartition du champ électrique E_z d'un guide d'onde.

Figure 3.6 : La réponse spectrale en transmission du guide.

Figure 3.7 : Répartition du champ électrique E_z d'un guide d'onde à base d'un CP-2D déconnecté à maille carré pour différentes longueurs d'ondes en mode TE : (a) pour $\lambda = 1.299 \mu\text{m}$ et (b) pour $\lambda = 1.35 \mu\text{m}$. (c) pour $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$.

Figure 3.8 : Représentation schématique du filtre.

Figure 3.9 : Représentation de la réponse spectrale en transmission dans la bande $[1.4-1.48] \mu\text{m}$.

Figure 3.10 : La réponse spectrale après redimensionnements entre $[1.54-1.56] \mu\text{m}$.

Figure 3.11 : Répartition de champ électrique E_z dans un filtre en anneau proposé.

Table des matières

Dédicaces.....	i
Remerciements.....	ii
Résumés.....	iii
Abstract.....	iv
Résumé en arabe.....	v
Liste des abréviations.....	vi
Liste des ..figures.....	vii
Introduction Générale.....	1
Chapitre1 : Généralité sur les cristaux photoniques	
1.1 . Introduction.....	1
1.2 . Cristaux photoniques naturels	5
1.2.1. Les papillons.....	5
1.2.2 . La plume de paon	5
1.2.3 les opales.....	6
1.3 . Cristaux photoniques artificiels.....	6
1.3.1.Les cristaux photoniques unidimensionnels (Miroirs de Bragg) (CPs1D)	6
1.3.2 . Propriétés géométriques et physique d'un CPs1D.....	7
1.3.3 .Les cristaux photoniques bidimensionnels (CP -2D) et tridimensionnelles (CPs- 3D).....	8
1.3.4.Propriétés géométriques et physique d'un CPs- 2D	10
1.4 .Méthode des ondes planes(PWE)	14
1.5 .Diagramme de bande d'un CP 2D.....	15
1.6 .Diagramme de bande d'un CP- 3D.....	15
1.7 .Diagramme de dispersion	15
1.8 .Carte de bande	16
1.9 .L'état de polarisation des ondes électromagnétique.....	16
1.9.1 .Polarisation TE.....	16
1.9.2 .Polarisation TM.....	17
1.10 .Les défauts.....	17
1.10.1.les défauts ponctuels.....	17
1.10.2.Les défauts linéaires	18

1.11. Les méthodes d'analyse des cristaux photoniques.....	18
1.11.1.La méthode FDTD (Finite-Difference Time-Domain).....	18
1. 11.2.La méthode de matrice de transfert (TMM).....	19
1. 11.3 .La Méthode des éléments finis FEM.....	19
1. 11.4. La méthode des réseaux de diffraction.....	20
1.11.5. La méthode des liaisons fortes.....	20
1.12 .Les applications.....	20
1. 12.1.Guides d'onde	20
1. 12.2 .Guide en termes de transmission.....	21
1. 12.3 .Filtre add / drop	21
1. 12.4 .Cavité de résonante	22
1. 12.5. Démultiplexeurs.....	24
1.12.6 .Diviseur de puissance.....	24
1. 12.7. DEMUX-coupler	25
1.13. Conclusion.....	26

Chapitre 2: Les filtres add-drop en cristaux photoniques

2.1. Introduction.....	28
2.2. Description géométriques des filtres add-drop.....	29
2.3. Fonctionnement physiques des filtres add-drop.....	29
2.4. Les applications des filtres en cristaux photoniques.....	31
2.4.1. Filtrage	31
2.4.1. 1. Filtre Add-Drop à base de PCRR à anneau unique.....	31
2.4.1.2 : 2. Filtre Channel drop en forme de T à base de PCRR.....	33
2.4.2. Démultiplexage	33
2.4.2.1 Bande-gapanalyse.....	34
2.4.2.2. Démultiplexeur large bande.....	34
2.4.2.3.Le démultiplexeur double bande 16 canaux.....	35
2.4.3. Les diviseurs de puissances en CP	37
2.4.4. Commutation optique	38

2.4.4.1. Mécanismes de la commutation tout optique.....	39
2.4.5. Les portes logiques	41
2.4.5.1 .OU Porte.....	41
2.4.5.2. Porte XOR.....	42
2.5. Conclusion.....	43

Chapitre3 : Résultats et Interprétations

3.1.introduction.....	45
3.2. Présentation de logiciel COMSOL Multiphysics	45
3.3.Etude des structures bidimensionnelles sans défaut.....	46
3.4.Etude d'une structure bidimensionnelle carré avec défaut.....	47
3.4.1. Conception du guide.....	48
.....	
3.5.Simulation d'un filtre en anneau	51
.....	
3.5.1. Conception d'un filtre Channel drop à base de CPs avec un seul résonateur (PCRR) : système à trois ports autour de 1.5 μm	51
3.6.Conclusion	54
Conclusion Générale.....	56
Références	58

Introduction générale

Introduction Générale

Ces dernières années, les matériaux à bande interdite photonique (BIP) ou cristaux photoniques ont attiré de nombreux chercheurs en science de la technologie.

Les cristaux photoniques (PhC) ont proposé de nouvelles possibilités pour concevoir des dispositifs optiques compacts et hautement accordables. Ces structures artificielles sont des réseaux périodiques de matériaux diélectriques avec différents indices de réfraction. Le comportement de la lumière dans les PhC est très similaire à celui des électrons dans les semi-conducteurs, donc comme les semi-conducteurs, ces structures artificielles ont une zone de fréquence (ou longueur d'onde) interdite pour la propagation des ondes lumineuses qui est appelée Photonic Band Gap (PBG) [82,83]. Cette propriété a résolu le défi de confiner les ondes lumineuses à l'intérieur des structures PhC, par conséquent, la conception de dispositifs optiques tels que des filtres optiques [84,85], des démultiplexeurs optiques [86,87] et des commutateurs optiques et des portes logiques [88,89] avec des dimensions ultra-compactes adaptées à tous les circuits intégrés optiques est devenue possible.

Les structures périodiques dites CPs sont connues comme étant des milieux fortement dispersifs pour la propagation respectivement des ondes électromagnétiques et acoustiques lorsque les longueurs d'onde sont de l'ordre de grandeur du paramètre de maille. En fonction de la géométrie de la structure, les CPs peuvent être divisés en trois grandes catégories, à savoir les structures unidimensionnelles (1D), bidimensionnelles (2D) et tridimensionnelles (3D).

Si l'on introduit des défauts dans le cristal photonique, de nouveaux états permis apparaissent dans la bande interdite photonique. La lumière peut être confinée selon plusieurs dimensions selon le défaut et la dimensionnalité du cristal photonique. Par exemple, si l'on introduit un défaut unidimensionnel dans un cristal photonique bidimensionnel, la lumière est confinée en deux dimensions. Une cavité bidimensionnelle est créée, si l'on introduit un défaut linéaire dans un cristal photonique bidimensionnel, la lumière est confinée dans une dimension et elle est libre de se propager dans l'autre dimension, ce qui constitue un guide d'onde. En utilisant ces concepts de base, il est alors possible de concevoir des dispositifs pour l'optique intégrée avec ces cavités et ces guides d'ondes. L'introduction d'éléments à base de cristaux photoniques permettrait de traiter toute l'information sous forme lumineuse et de miniaturiser les circuits actuels. C'est la raison pour laquelle de nombreuses propositions pour des dispositifs à base de cristaux photoniques ont été faites et parfois déjà réalisées, comme les guides d'ondes, les virages, les filtres sélectifs, et les multiplexeurs[90].

Le filtrage est un mécanisme essentiel qui permet d'éliminer une fréquence ou une bande de fréquence, ou inversement, à favoriser une fréquence ou une bande de fréquences. Autrement dit, c'est l'action de modifier les composantes spectrales d'un signal électrique.

Justement les CPs ont trouvé leur place dans la conception de filtres sélectifs de tailles très réduites et de facteur de qualité très élevé par rapport aux dispositifs conventionnels. Le filtre Channel drop (CDF) joue un rôle clé dans l'intégration des circuits photoniques. Les résonateurs en anneau à cristaux photoniques (Photonic crystals ring resonators: PCRRs) sont couramment utilisés pour la conception de filtres optiques à base de CPs afin de réaliser de nouvelles topologies de démultiplexeurs DWDM.

Le but de ce mémoire est de exploiter des nouveaux matériaux pour la conception d'un filtre ultra sélectif à haut facteur de qualité de CPs-2D en utilisant les résonateurs en anneau PCRRs comme élément de brique de base.

Notre mémoire s'articule sur trois chapitres, les deux premiers seront théoriques dont le premier est destiné à la présentation générale des cristaux photoniques, le deuxième est Les filtres add-drop en cristaux photoniques, de quelques exemples basés sur filtrage, les portes

Introduction Générale

logiques, diviseur de puissance en cp. Le dernier sera consacré à la simulation numérique en utilisant le simulateur COMSOL MULTIPHYSICS.

Le travail est réparti en trois chapitres :

Dans le premier chapitre est une introduction générale de l'étude des cristaux photoniques ou nous allons définir les concepts de base sur les cristaux photoniques ensuite nous allons énumérer les types de cristaux photoniques artificiels qui ont été inspirés par la nature. Nous citerons leurs propriétés physiques et présenterons également le principe d'ouverture de la bande interdite photoniques et la carte de dispersion. Nous aborderons par la suite les techniques de modélisation et les principes de défaut ponctuels qui existent aux niveaux des CPs, ainsi que les différentes applications optiques qui peuvent en découler de ces matériaux.

Dans le deuxième chapitre, nous sommes intéressés par le filtrage, fonctionnement physiques des filtres add-drop, les applications des filtres en cristaux photoniques, demultiplexage, les diviseurs de puissances en CP, commutation optique, les portes logiques.

Le troisième chapitre est dédié aux résultats de simulation obtenus sous environnement Comsol Multiphysics pour le calcul de l'énergie électromagnétique ainsi afin d'obtenir les spectres de transmission et de réflexion. Les différentes étapes de modélisation comprenant le choix du modèle physique, une étude des structures de CP-2d sans défaut et avec défaut, un filtre sélectif à PCRR.

Les structures sont formées par des paramètres précis extraits de la bande photonique interdite et les résultats sont appuyés par les représentations schématiques.

Ce modeste manuscrit se termine par une conclusion générale.

Chapitre 1

Généralité sur les cristaux
photoniques

1. Introduction :

Les cristaux photoniques, ou cristaux photoniques, sont des nano composites photoniques compacts périodiquement conçus pour affecter le mouvement des photons d'une manière similaire à l'effet des composés semi-conducteurs sur le mouvement des électrons se déplaçant à l'intérieur.

Les cristaux photoniques sont présents dans la nature depuis l'Antiquité et les études scientifiques à leur sujet ont commencé au cours des 100 dernières années.

Les cristaux photovoltaïques sont périodiquement composés de matériaux diélectriques ou métalliques au niveau nanométrique, et ils affectent le flux d'ondes électromagnétiques de la même manière que les composés semi-conducteurs affectent le flux de potentiel électrique et le mouvement des électrons en déterminant des plages (autorisées et interdites) de niveaux d'énergie.

Fondamentalement, les cristaux de photons contiennent en eux des champs réguliers de matériaux qui diffèrent par le constant diélectrique (constante diélectrique). En outre, la fluctuation et le flux de photons (avec une longueur d'onde) au sein de ces composés dépendent ou non de la longueur d'onde du photon, et les longueurs d'onde qui sont autorisées à circuler dans les cristaux de photons sont connues sous le nom de motifs et l'ensemble de motifs forme ce qui est connu. Sous forme de bandes, tandis que l'ensemble des longueurs d'onde qui sont Ils ne sont pas autorisés à s'écouler. Ils sont connus comme des cristaux à bande interdite photonique. Cette combinaison de cristaux de photons permet à certaines longueurs d'onde d'osciller et de circuler en leur sein, empêche certaines longueurs d'onde en n'oscillant pas et nous donne des phénomènes optiques plus différents tels que l'inhibition de l'émission spontanée, un degré élevé de réflectivité des miroirs multidirectionnels et moins d'énergie. Perte dans le vecteur des formes d'onde, et autres divers phénomènes optiques. Sur la base de ce qui précède, il devient clair que les cristaux de photons dépendent fondamentalement du phénomène physique connu sous le nom de diffraction (diffraction).

Dans le cadre de recherches concernant l'inhibition de l'émission spontanée dans les semi-conducteurs, E. Yablonovitch a montré à la fin des années 80 qu'il était possible d'ouvrir une bande interdite pour les photons en réalisant une alternance périodique de matériaux diélectriques différents tandis que S.

John s'intéressait à la localisation d'Anderson ce qui a conduit à l'émergence du concept de cristal photonique.

Initialement démontrée dans les micro-ondes, la réalisation de cristaux photoniques 2D dans le proche Infrarouge au milieu des années 90 a conduit à l'éclosion d'un champ de recherche Très fertile. Car, même si le principe de bande interdite était connu à une dimension avec Les miroirs de Bragg, la réalisation de cristaux photoniques en 2D et en 3D a conduit au Contrôle de la lumière vers un degré plus avancé, et le champ d'étude des cristaux photoniques a étendu des ramifications au-delà de l'optique classique, comme par exemple en Électrodynamique quantique de cavité (CQED pour Cavité Quantum Electrodynamics) [1]

Ou en opto-mécanique de cavité Bien que l'étude des cristaux de photons sous une forme ou une autre ait lieu depuis 1887 après JC, le terme «cristaux de photons» a été utilisé pour la première fois 100 ans après cette date, c'est-à-dire après que les deux scientifiques (Eli Yablonovitch) et (Sajeev John) ont publié leur articles scientifiques sur les cristaux photoniques en 1987 année [2] [3].

En 1887 après JC, le scientifique (Lord Rayleigh) a commencé ses études et a conclu que les cristaux de photons sont unidimensionnels, ont une bande interdite et ont un spectre à haute réflectivité connu sous le nom de bande d'arrêt [4].

Aujourd'hui, les photos cristaux ont une large gamme d'applications en tant que revêtements réfléchissants pour améliorer l'efficacité des LED. (En anglais: light-emitting diode (en

abrégé: LED) est une source lumineuse constituée de matériaux semi-conducteurs qui émettent de la lumière lorsqu'un courant électrique la traverse)



figure1 : light-emitting diode

En 1991 CE, Yablonovitch avait démontré que la bande interdite photonique tridimensionnelle pouvait être réalisée dans des longueurs d'onde micro-ondes [5]

2. cristaux photoniques naturels :

Les cristaux photoniques existent également à l'état naturel à l'intérieur de complexes Minéraux tels que les opales et à l'intérieur de systèmes biologiques tels que les yeux de Certains céphalopodes sous forme de réseaux périodiques de bâtonnets, les plumes de paon Faites de cristaux de kératines ou encore les ailes de certains papillons

2.1. Les papillons :

Les pigments assurent l'immense majorité des couleurs « chaudes » (du rouge au jaune). Plus une molécule est grande, plus les longueurs d'onde qu'elle peut absorber sont grandes. Pour faire du bleu (petite longueur d'onde), il faut absorber le rouge (grande longueur d'onde), donc de grandes molécules. Ce qui explique que les pigments bleus soient rares dans la nature et difficiles à synthétiser. Chez les papillons, on n'en trouve que chez de très rares espèces, comme les Graphium et certains Nymphalide

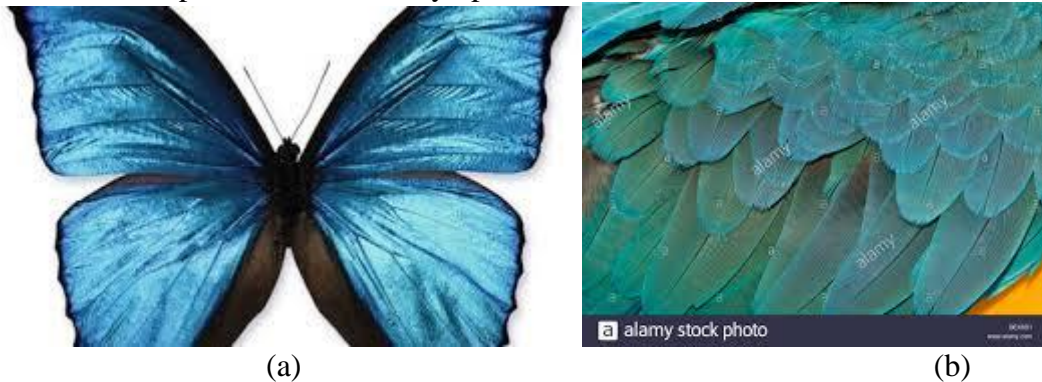


Figure2 : (a) Aile de papillon,(b) Coupe d'une aile de papillon observée au MEB

2.2. La plume de paon :

Les reflets changeants des plumes de la queue du paon ont captivé Plus d'un esprit curieux. Le scientifique anglais Robert Hooke

Les qualifiait en 1665 de « surnaturelles » en constatant que, mouillées, elles perdaient leurs couleurs. À l'aide du microscope inventé depuis peu, il observa ces plumes, et découvrit qu'elles étaient couvertes de stries – qu'il suspecta d'être à l'origine des couleurs. Aujourd'hui, la recherche tente de s'inspirer de ces phénomènes : des applications « bio-inspirées » sont en voie de concrétisation [6]

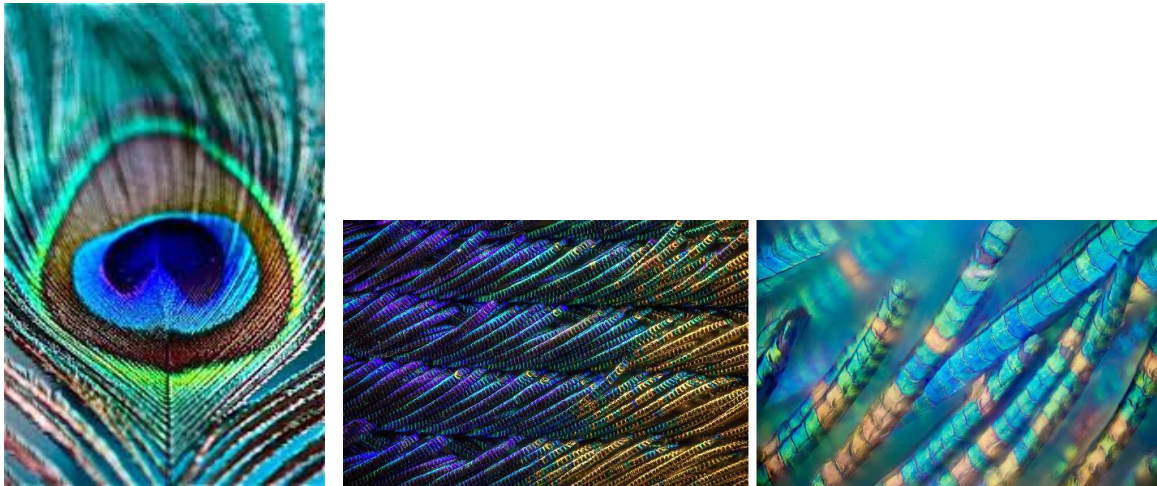


Figure3 : Agrandissement d'une plume de paon au microscope montrant la structure des Barbules. Chaque barbule est divisée en une série de cuvettes (flèche rouge).

2.3. les opales :

Des opales sont obtenues chimiquement par auto-organisation. La première opale à été obtenue par sédimentation de sphères de silice en solution: par sédimentation ces sphères s'arrangent selon un réseau cubique à faces centrées [7]

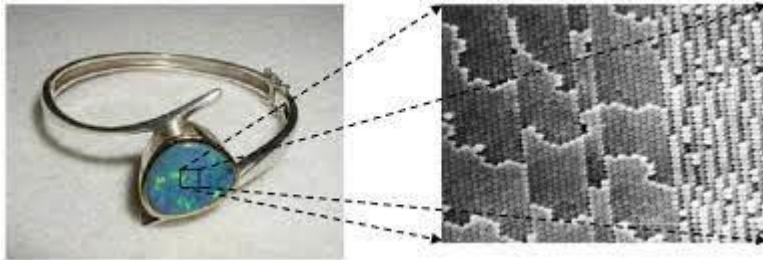


Figure : à gauche on a un Bracelet monté d'une opale naturelle quasi-périodique bille de silice et à droite une Image au microscope électronique d'une opale naturelle.

3. Cristaux photoniques artificiels:

3.1. Les cristaux photoniques unidimensionnels (Miroirs de Bragg) (CPs-1D) :

Remontons à l'année 1887. C'est à cette époque que les toutes premières études portant sur un matériau diélectrique présentant une périodicité suivant une direction ont été menées.

En effet, au cours de cette année, Lord Rayleigh a décrit le comportement des ondes dans un film multicouches pour lequel l'indice de réfraction alternait d'une couche à l'autre [8]

Ce type de structure, appelé réseau de Bragg, est représenté sur la figure :



Figure4 : Schéma d'un miroir de Bragg 1D

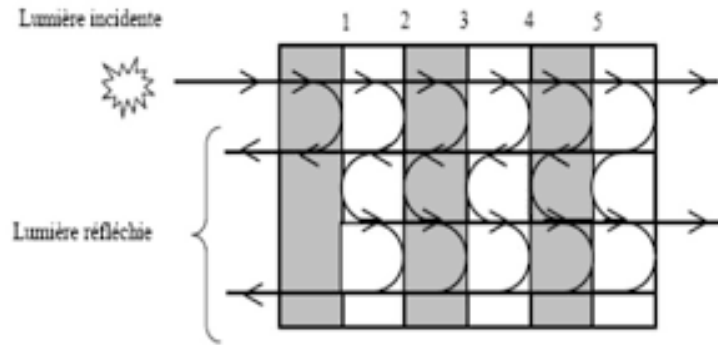


Figure 5 : Représentation schématique de l'interférence des ondes réfléchies par chaque dioptre.

La figure montre le principe d'interférence des ondes réfléchies par chaque couche qui constitue un CP-1D. À chaque interface, subit une réflexion de l'onde se propageant dans la succession de couches. Si l'onde va d'un milieu de faible indice vers un milieu à fort indice, la réflexion crée un changement de phase π et pour le cas contraire, s'effectue sans changement de phase. Quand l'épaisseur des alternances optiques totale est de $\lambda/2$: l'onde qui est réfléchi par l'interface '1' devient en phase avec celles qui sont réfléchies par les interfaces 3, 5 ... Par conséquent, suite à ces interférences constructives, on a fini par avoir une totalité de réflexion. Ce qui nous amène à dire qu'en présence d'une BIP, l'onde ne peut se propager. On remarque que les ondes réfléchies par toutes les interfaces 1, 2 et 3 ... sont en phase, dans le cas où les 2 couches de chaque alternance ont la même épaisseur optique $\lambda/4$ [9]

3.2. Propriétés géométriques et physique d'un CPs-1D :

a. contraste d'indice :

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

$$\delta = \frac{N_h}{N_l} \tag{1.1}$$

Avec :

N_h : L'indice de réfraction du matériau de haut indice.

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

b. facteur de remplissage :

Peut être comparé à la 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.

$$F = \frac{V_i}{A} \tag{1.2}$$

Avec

V_i : Volume occupé par le matériau de permittivité ϵ_i .

A : Volume de la cellule.

c. la période :

La période a est défini par la relation :

$$a = (a_1 + a_2) \tag{1.3}$$

Avec

a_1 : l'épaisseur de la couche de permittivité ϵ_1 et a_2 : l'épaisseur de la couche de permittivité ϵ_2

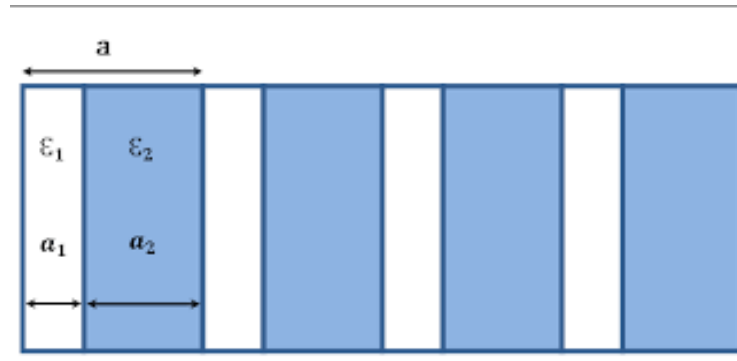


Figure6 :période d'un cristal photonique unidimensionnel

3.3. Les cristaux photoniques bidimensionnels (Cp -2D) et tridimensionnelles (CPs-3D) :

De ce qui précède, il a été montré la possibilité de réaliser une structure qui, dans certaines conditions, présentera des bandes interdites photoniques. Dans le but de pouvoir contrôler ces dernières quelques soit l'angle d'incidence de l'onde électromagnétique, il faut étendre la périodicité de la structure à 2 ou 3 dimensions. R. Zengerle [10] et E. Yablonovitch [11] et S.John [12] ont initié et généralisé ce concept au cours de l'année 1987. La motivation principale de S. John était d'utiliser les cristaux photoniques dans le but de modifier la localisation et le contrôle de la lumière. E. Yablonovitch cherchait, quant à lui, à appréhender la densité d'états photoniques, par analogie à la densité d'états électroniques, dans le but de contrôler.

2D :

Dans ce type de cristal, des trous sont percés dans le substrat sous-jacent et sont transparents à certaines longueurs d'onde censées être protégées par la bande interdite conçue à cet effet. Treillis hexagonal après avoir été chauffé et étiré, et il y a des triangles en forme d'espaces d'air entre les tiges de verre pour créer des espaces qui représentent le confinement des modes [13].

Les CP-2D sont définie comme des plaques, où la période cristallographique du cristal photonique est du même ordre de grandeur que son épaisseur.

Il existe deux types de structures périodiques diélectriques :

-Les motifs élémentaires dont l'indice n 1 est inférieur à l'indice n 2 de la matrice diélectrique, appartiennent aux caractéristiques d'une structure « connecté »figure

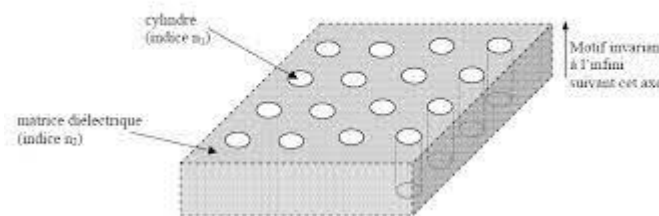


Figure 7: Structure périodique 2D connectée.

- Les motifs dont l'indice n 1 est supérieur à l'indice n 2 correspondent au structures dites« déconnectées » (Figure 8) formé de tiges alignées, de façon périodique dans l'air[14]



Figure 8 : Structure périodique 2D déconnectée.

3D :

Il existe plusieurs formations et types construits de ce type

- Sphères dans un réseau de diamant
- La structure du tas de bois
- Yablonovite

Ce type est construit au moyen de tiges en double gravées avec une lithographie par faisceau et remplies de nouveau matériau, et ce processus est répété sur la couche suivante avec la création de canaux gravés et perpendiculaires à la couche ci-dessous, et parallèles à la couche suivante en dessous avec deux couches, mais pas avec elle. Au même niveau. Nous répétons ce processus jusqu'à ce que nous obtenions la hauteur souhaitée. Ensuite, seul le mastic est dissous sans affecter le bâtiment obtenu. Il est difficile de défauts dans ce bâtiment structurel. La technologie des BIP 3D a été fabriquée en 1993 par E. Yablonovitch [15]

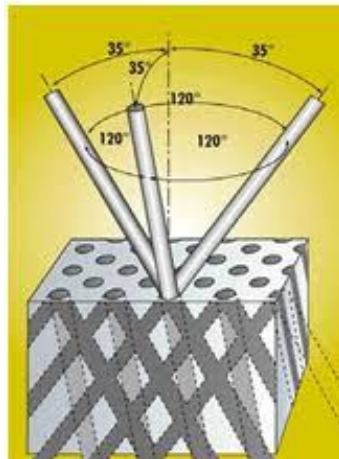


Figure 9 : Structure « La Yablonovite »

Il y a 2 méthodes de fabrication de structure 3D :

- Structures Tas de bois :

Ces structures 3Ds sont obtenues en déposant par couches successives des rubans de silicium polycristallin dans des tranchées de silice.

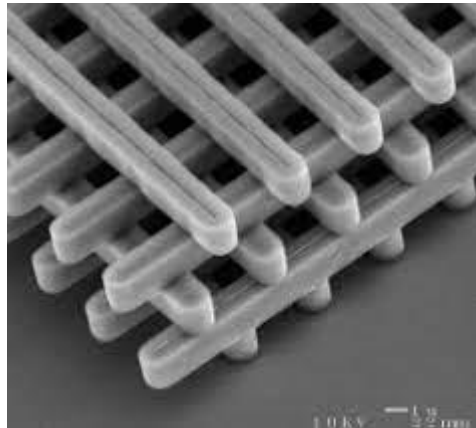


Figure10 : Image MEB (Microscopie Electronique à Balayage) d'un cristal photonique du type tas de bois fabriquée par lithographie UV dans du silicium.

-les opales :

Les opales sont des structures qui forment une famille originale de cristaux photoniques 3Ds qui est constituée de microbilles de silice.



Figure 11: une opale.

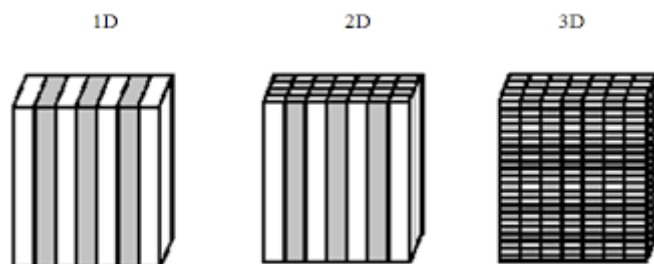


Figure12 : Schéma montrant le principe des arrangements pour des cristaux photoniques unidimensionnels (1D), bidimensionnels (2D) et tridimensionnels (3D).

3.4. Propriétés géométriques et physique d'un CPs-2D :

Réseau directe et réciproque :

•réseau direct :

Se regroupe principalement suivant 3 familles :

-le réseau carré :

La maille primitive est un carré de côté « a ». Ce réseau est très sensible à l'angle d'incidence des ondes électromagnétiques. Sa zone de Brillouin est un triangle isocèle délimité par les points de hautes symétries Γ XM [16]

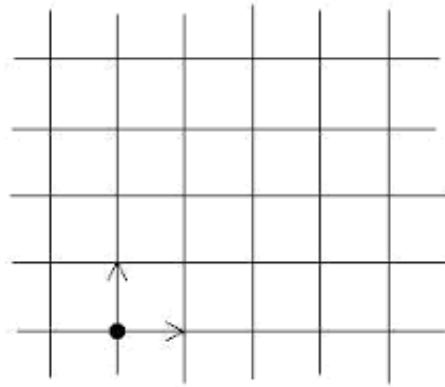


Figure13 : réseau carré

-réseau triangulaire :

Cette structure comme son nom l'indique est un réseau où les mailles sont en forme de triangles symétriques équilatéraux distancés de « a ». Contrairement au réseau carré le réseau triangulaire est moins sensible à l'angle d'incidence, tandis que c'est difficile d'obtenir une bande interdite totale.

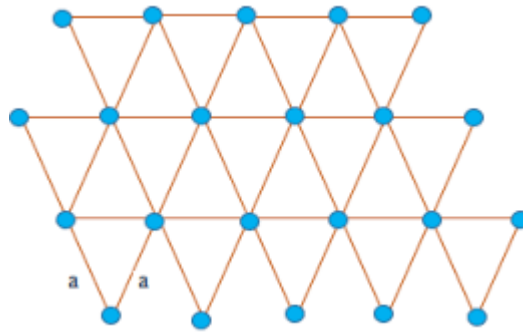


Figure14: réseau triangulaire

- le réseau hexagonal :

Sur un réseau hexagonal, si tous les nœuds sont identiques et espacés de «a», alors on appelle cette structure « graphite » car elle est similaire à la structure cristalline du graphite. À la différence du réseau triangulaire, il s'agit d'un réseau à deux «atomes» par maille. Le réseau réciproque est aussi un réseau hexagonal et la zone de Brillouin irréductible est la même que pour le réseau triangulaire avec les directions principales notées $K\Gamma$ et $M\Gamma$ [16]. La possibilité d'une bande interdite complète avait été prédite pour la première fois dans le cas d'un réseau de tiges diélectriques cylindriques.

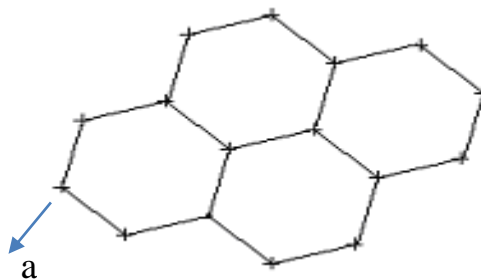


Figure15 : le réseau hexagonal

•réseau réciproque :

Beaucoup de propriétés des cristaux photoniques (CPs) sont directement compréhensibles par l'étude de leur diagramme de bandes. Pour les étudier, on utilise les notions de réseau réciproque et de zones de Brillouin. Le réseau réciproque d'un CP 2D est défini à partir du réseau réel par la relation suivante [17]

$$a_i b_j = 2\pi \delta_{ij} \quad (1.4)$$

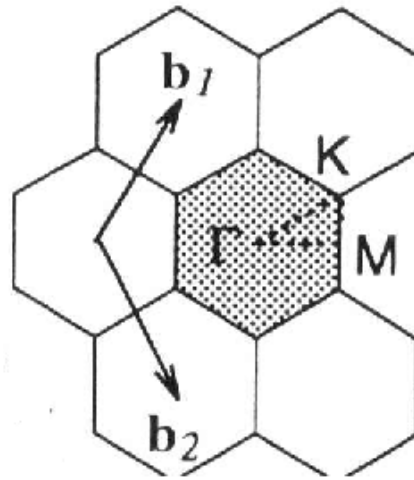


Figure16 :réseau

réciproque

•**Zone de Brillouin :**

En mathématiques et en physique du solide, la première zone de Brillouin est définie de manière unique comme la maille primitive dans l'espace réciproque. Elle est définie par la même méthode que la maille de Wigner-Seitz dans le réseau de Bravais, et s'identifie à celle-ci dans l'espace réciproque. L'importance de cette première zone de Brillouin provient de la description en ondes de Bloch des ondes dans un milieu périodique, dans lequel il est démontré que les solutions peuvent être complètement caractérisées par leur comportement dans cette zone.

La première zone de Brillouin d'un atome est définie comme le volume délimité par des surfaces issues de l'ensemble des points équidistants de l'atome et de ses plus proches voisins¹. Une autre définition possible est que la première zone de Brillouin est l'ensemble des points de l'espace-k pouvant être atteints depuis l'origine sans croiser de plan de Bragg.

Il existe des zones de Brillouin d'ordre supérieur (2^e, 3^e, etc.) correspondant à la série de régions disjointes de l'espace (toutes de même volume) à des distances croissantes de l'origine, mais moins fréquemment utilisées. La première zone de Brillouin est par conséquent souvent appelée simplement *zone de Brillouin*. La définition de la n-ième zone de Brillouin est la suivante : ensemble des points pouvant être atteint depuis l'origine en croisant $n - 1$ plans de Bragg.

Un des concepts liés à la zone de Brillouin est celui de zone de Brillouin irréductible, comparable au concept de maille primitive, qui est la zone de Brillouin réduite par les symétries du groupe ponctuel de symétrie de la maille.

Le concept de zone de Brillouin fut développé par le physicien Léon Brillouin. [18]

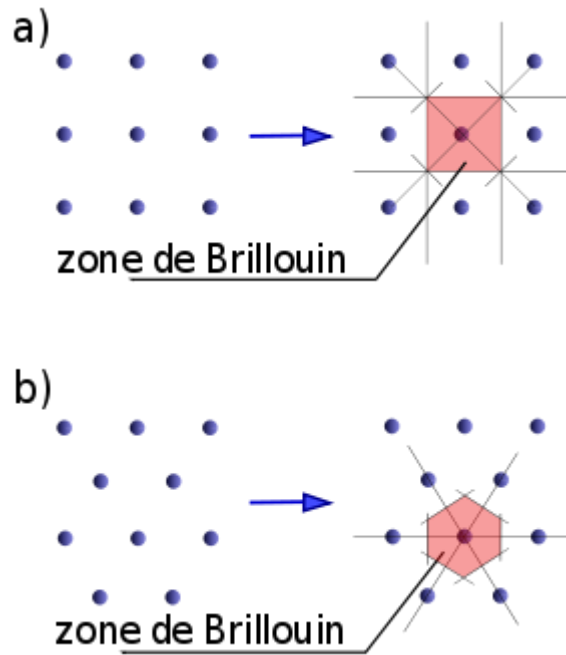


figure17 : zone de Brillouin

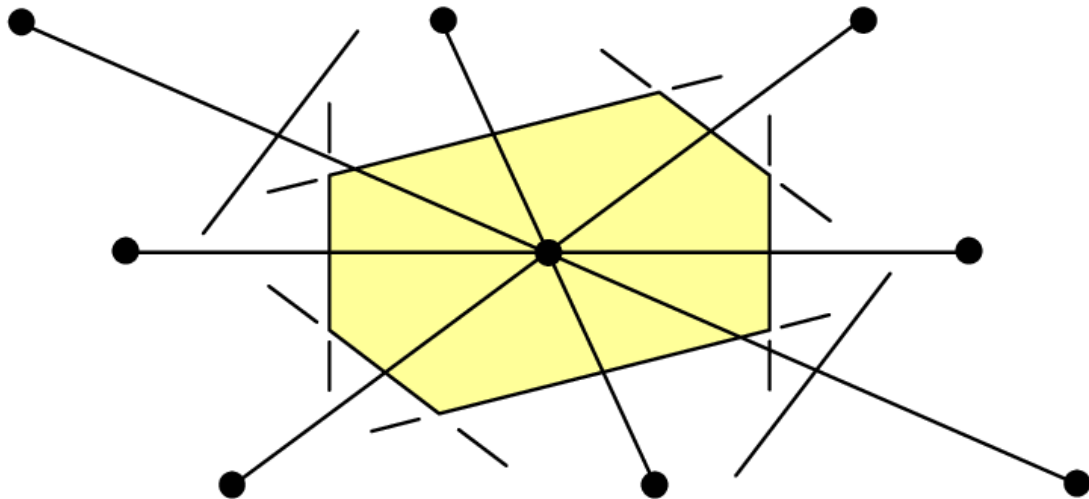
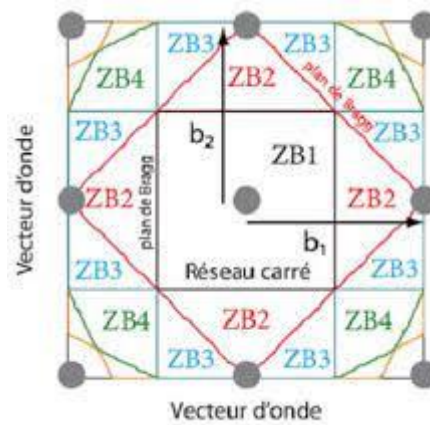


Figure 18 : La maille de Wigner- Seitz. a) On trace toutes les directions de

Figure 18 : La maille de Wigner- Seitz.

Premières zones de Brillouin (ZB) d'un réseau carré. Les plans de Bragg sont tracés en différentes couleurs. La ZB n°3 est atteinte en traversant 2 plans de Bragg (droite noire puis droite rouge).



La figure19 : illustre la zone de Brillouin irréductible pour un réseau carré et triangulaire.

4. méthode des ondes planes(PWE) :

La méthode des ondes planes est très bien adaptée pour des structures périodiques supposées de dimensions infinies pour la détermination des modes propres et du diagramme de dispersion de la structure.

Les équations de Maxwell :

Les équations de Maxwell sont des lois fondamentales de la physique. Elles constituent, avec l'expression de la force électromagnétique de Lorentz, les postulats de base de l'électromagnétisme. Les équations de Maxwell sont :

• Dans le vide :

- a. Loi de Faraday :

$$\nabla \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1.5)$$

- b. Loi d'Ampère :

$$\nabla \wedge \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (1.6)$$

- c. Loi de Gauss pour le champ électrique :

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad (1.7)$$

- d. Loi de Gauss pour le champ magnétique :

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (1.8)$$

• Dans un milieu matériel :

- a. Loi de Faraday :

$$\nabla \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1.9)$$

- b. Loi d'Ampère :

$$\nabla \wedge \vec{H} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + \vec{j} \quad (1.10)$$

- c. Loi de Gauss pour le champ électrique :

$$\nabla \cdot \vec{E} = \rho \quad (1.11)$$

- d. Loi de Gauss pour le champ magnétique :

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (1.12)$$

5. diagramme de bande d'un CP 2D:

Chaque cristal photonique est caractérisé par son diagramme de bandes. La méthode de décomposition en onde plane nous a permis de voir les diagrammes de bandes des modes TE et TM d'un cristal photonique pour un réseau triangulaire gravé dans une hétéro-structure sur un substrat de GaAs dont le facteur de remplissage est $f=30\%$ Pour la polarisation TE on observe une bande interdite en $u=0.21_0.27$ tandis que pour la polarisation TM on remarque aucune bande interdite [19]. En effet les bandes interdite TE s'ouvrent généralement pour les structures connectés tandis que l'ouverture des bandes interdite TM sont plutôt favorisé pour les structures isolées comme c'est le cas pour les piliers entourés par l'air.

Dans le cas du réseau triangulaire, une bande interdite photonique (BIP) est observée pour la polarisation TE pour $a/\lambda = 0,21-0,27$. Pour la polarisation TM, aucune bande interdite n'apparait. Cependant le réseau carré présente l'absence de la bande interdite photonique pour les deux polarisations TE et TM. En effet, la plus grande BIP est obtenue avec un réseau triangulaire de trous d'air dans un diélectrique en polarisation TE [20]

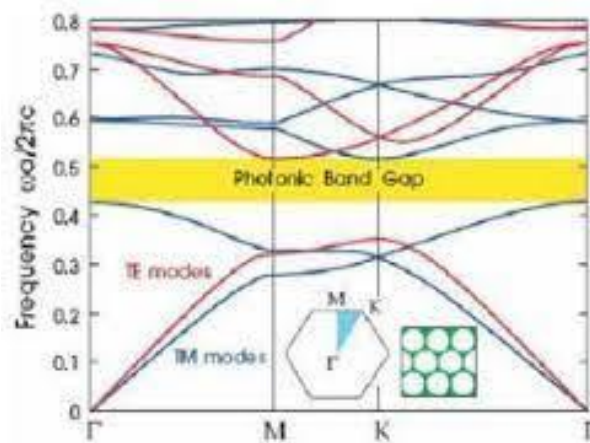


Figure 20 : Diagramme de bande d'un BIP 2D en polarisation TM et TE.

6. diagramme de bande d'un CP-3D :

La réalisation technologique des BIP 3D sont destinés à fonctionner dans le visible.

Les techniques généralement mises en œuvre sont particulièrement difficile.

La figure montre le diagramme de bande CP-3D présentant bande interdite

Omnidirectionnelle de 21% avec un gap complet TE et TM qui sont assez complexe et le coin de la zone de Brillouin irréductible marqué dans l'encadré.

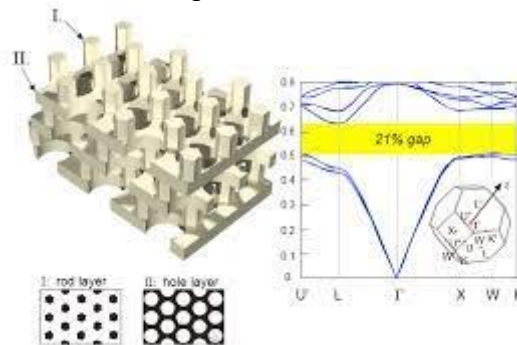


Figure 21 :diagramme de bande CP 3D

7. diagramme de dispersion :

Dans le vide, en prenant comme solution à l'équation d'onde, une onde plane se propageant avec le vecteur d'onde kV , on a :

$$E(r,t) = E_0 \cdot \exp(i(kv \cdot r - \omega t)) \tag{1.13}$$

Où E représente le champ électrique et ω la pulsation de l'onde se propageant suivant la direction du vecteur d'onde kV . On peut alors résoudre l'équation d'onde :

$$-K_v E + \omega^2 \epsilon_0 \mu_0 E = 0 \tag{1.14}$$

Où ϵ_0 est la permittivité du vide et μ_0 la perméabilité du vide. De cette équation, découle l'équation de dispersion dans le vide

$$k^2 v = \omega^2 \epsilon_0 \mu_0 \tag{1.15}$$

Dont on peut tirer l'expression du module du vecteur d'onde dans le vide

$$|k_v| = \omega/c = 2\pi/\lambda_v \tag{1.16}$$

Où $c = 1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \approx 3 \cdot 10^8$ m/s est la vitesse de propagation de la lumière dans le vide,

$\lambda_v = c/v = c \cdot T$ est la longueur d'onde dans le vide, v la fréquence et T la période

Dans un milieu, la forme de la relation de dispersion est identique

$$k^2 = \omega^2 \epsilon' \mu \tag{1.17}$$

Il faut noter que si le matériau considéré présente des pertes, les composantes ϵ' et μ seront complexes, ce qui aura pour conséquence que le vecteur d'onde k le sera également. La propagation de l'onde est alors décrite par la partie réelle de ce vecteur. Quant à la partie imaginaire, elle traduit l'atténuation que subit l'onde dans le milieu.

8. Carte de bande :

Afin d'obtenir la structure de bandes de ce matériau pseudo périodique, il faut qu'on replie la relation de dispersion dans la zone de Brillouin du moment qu'on introduit deux couches diélectriques différentes avec une périodicité la structure de bandes commencera à s'ouvrir aux bords de la zone de Brillouin : la bande interdite apparaît. Ces états, aux bords de la zone de Brillouin, correspondent aux ondes stationnaires. La fréquence la plus basse concentre son énergie dans la zone avec ϵ haut et inversement. Dans la bande interdite, il n'existe aucun état qui se propage, au contraire chaque état est évanescent et caractérisé par un nombre d'onde complexe :

$$k = \alpha + i\beta$$

Matériel uniforme diélectrique

périodicité artificielle

contraste

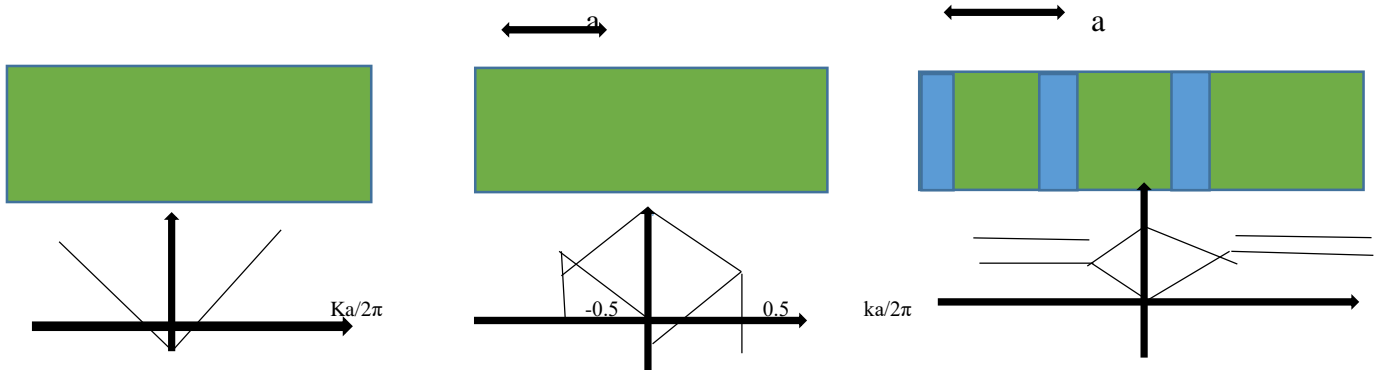


Figure 22 : Création d'une bande interdite dans une structure à multicouches.

Dans une dimension, une bande interdite apparaîtra toujours du moment qu'il y existe un contraste diélectrique périodique. Plus grand sera le contraste, plus grande sera la taille de la bande interdite [20]

9. L'état de polarisation des ondes électromagnétique :

9.1. polarisation TE :

Considérons deux milieux notés 0 et 1, l'onde incidente issue du milieu 0 est polarisée rectilignement. Les faisceaux incidents, réfléchis et transmis ainsi que la direction de leurs champs \vec{E} et \vec{H} et leurs vecteurs d'onde \vec{k} respectifs. Seules les composantes des champs

électriques (incident, réfléchi et transmis) suivant l'axe y sont non nulles, elles sont de la forme :

$$\begin{cases} E_{iy} = E_i \exp(j(\omega t - \vec{k}_i \vec{r})) \\ E_{ry} = r E_i \exp(j(\omega t - \vec{k}_r \vec{r})) \\ E_{ty} = t E_i \exp(j(\omega t - \vec{k}_t \vec{r})) \end{cases}$$

A l'interface, les conditions de continuité sur \vec{E} et \vec{H} s'écrivent : $E_{iy} + E_{ry} = E_{ty}$ soit :

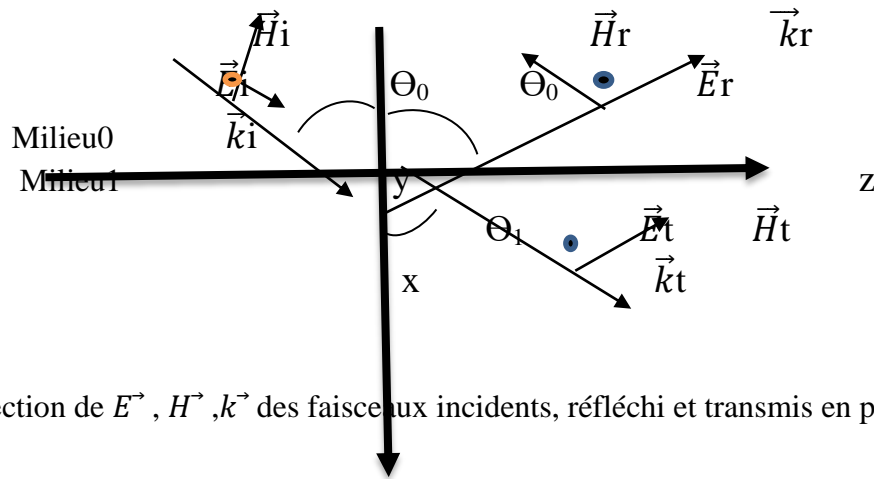


figure 22 : Direction de \vec{E} , \vec{H} , \vec{k} des faisceaux incidents, réfléchi et transmis en polarisation TE.

$$1+r=t \tag{1.18}$$

Et $H_{iz} - H_{rz} = H_{tz}$ soit :

$$n_0 \cos \theta_0 - n_0 r \cos \theta_0 = n_1 t \cos \theta_1 \tag{1.19}$$

En résolvant les équations, on obtient les coefficients de Fresnel :

$$r = \frac{n_0 \cos \theta_0 - n_1 \cos \theta_1}{n_0 \cos \theta_0 + n_1 \cos \theta_1} \tag{1.20}$$

$$t = \frac{2 n_0 \cos \theta_0}{n_0 \cos \theta_0 + n_1 \cos \theta_1} \tag{1.21}$$

9.2. Polarisation TM :

Comme dans le cas précédent les directions de $\vec{E}, \vec{H}, \vec{k}$ et sont représentées sur la figure $E_{iz} - E_{rz} = E_{tz}$

Soit :

$$E_i \cos \theta_0 - r E_i \cos \theta_0 = t E_i \cos \theta_1 \tag{1.22}$$

et $-H_{iy} - H_{ry} = -H_{ty}$ soit :

$$n_0 E_i + n_0 r E_i = n_1 t E_i \tag{1.23}$$

En résolvant les équations, on obtient les coefficients de Fresnel :

$$r = \frac{n_1 \cos \theta_0 - n_0 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_0 + n_0 \cos \theta_1} \tag{1.24}$$

$$t = \frac{2 n_0 \cos \theta_0}{n_1 \cos \theta_0 + n_0 \cos \theta_1} \tag{1.25}$$

10. les défauts :

On a 2 types de défauts :

10.1. les défauts ponctuels :

Ces défauts se comportent comme des micro-résonateurs. Les défauts ponctuels sont obtenus en modifiant les caractéristiques d'une cellule du réseau. Pour les cristaux photoniques

composés de cylindres diélectriques, le constant diélectrique d'un cylindre peut être changé. Le cylindre peut être enlevé, ce qui crée une lacune dans le cristal. Cela correspond à une microcavité à l'intérieur du cristal photonique. Pour les cristaux photoniques constitués de trous dans un matériau diélectrique, ces trous peuvent être modifiés géométriquement [21]. Par suite, on distingue deux types de défauts, lacunaires et de substitution

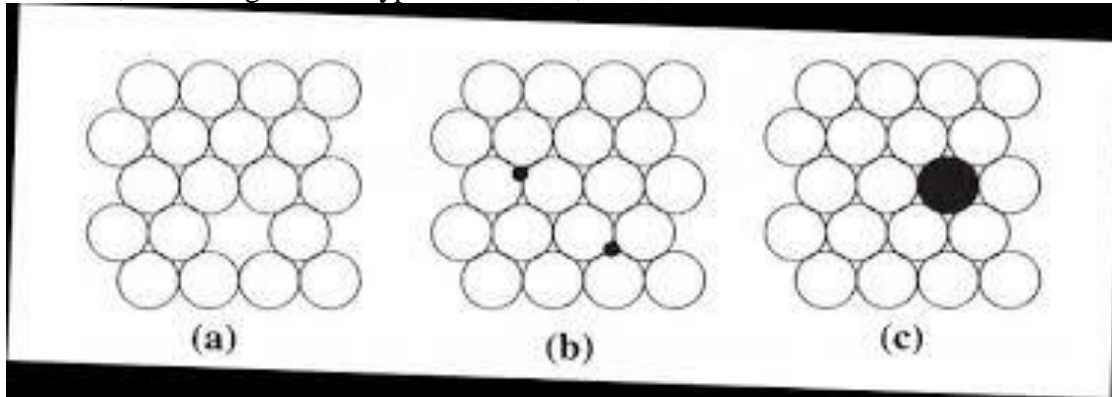


Figure 12 : les défauts ponctuels : (a) défauts substitution, (b) et (c) défauts de lacunaire

10.2. Les défauts linéaires :

Ces défauts permettent de réaliser un guidage diffractif des ondes appelé aussi défauts étendus, de dimension 1, 2 ou 3, ne peuvent évidemment être obtenus que dans les cristaux de dimension au moins équivalente. Parmi ces défauts, les défauts 1D (W1), sont certainement ceux qui ont suscité le plus grand nombre d'études car ils ont vocation à être utilisés comme guides de lumière au sein d'un cristal donné. On peut d'ailleurs imaginer des défauts 2D (W2) ou 3D (W3) constitués d'une suite de guides W1, mis bout à bout et orientés dans les directions différentes, de façon à véhiculer la lumière sur tous les chemins possibles à l'intérieur du cristal. L'exemple de base est celui du guide d'onde linéaire W1 dans un cristal photonique 2D. Une façon de réaliser un tel guide consiste à placer des défauts ponctuels, couplés et régulièrement espacés, dans une direction du cristal 2D. Le couplage entre une infinité de résonateurs conduit à une bande de propagation permise dans la direction de l'alignement. Ce type de guide à résonateurs couplés a été proposé en 1999 [22].

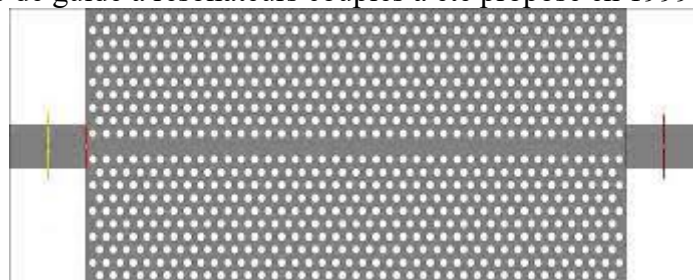


Figure 24 : Exemple de guide W1 à cristal photonique triangulaire de trous d'air sur un substrat de silicium sur isolant.

11. les méthodes d'analyse des cristaux photoniques :

11.1. La méthode FDTD (Finite-Difference Time-Domain) :

Cette méthode est particulièrement intéressante pour connaître la réponse spectrale d'un système non nécessairement périodique et pour calculer les distributions de champ dans des structures de dimensions finies [23][24].

Un maillage dans l'espace réel est réalisé afin de discrétiser les champs et de pouvoir estimer leurs dérivées. Les champs sont propagés dans le temps de proche en proche à partir d'une certaine distribution de départ donnée par l'utilisateur et pendant un certain temps T . On peut donc observer le régime transitoire du système et voir le régime permanent s'établir. De plus,

il est possible de remonter à la réponse fréquentielle de la structure. En effet, connaissant l'évolution temporelle des champs en tous points du système, le calcul du spectre en ces points peut être effectué par transformée de Fourier. Le spectre d'un point « intéressant » du système sera alors divisé par celui de la source. (Il faudra ici utiliser une source impulsionnelle afin d'avoir un spectre en fréquence relativement large.)

Les conditions aux limites constituent un point très important dans cette méthode du fait du traitement presque exclusif de structures finies. Il est possible d'utiliser à la fois des conditions périodiques et des conditions absorbantes sur une même structure. Ceci est intéressant, par exemple, pour la simulation d'un guide à cristal photonique. Parmi les conditions absorbantes, les plus utilisées sont les conditions de Mur [25] ou de PML (Perfectly Matched Layer) [26].

Dans ce travail, les calculs bidimensionnels de FDTD ont été en partie réalisés avec un code écrit par X. Letartre.² Un fichier source d'un code FDTD développé en Fortran 90 peut aussi être téléchargé sur l'Internet.³

11.2. La méthode de matrice de transfert (TMM):

Elle est souvent utilisée pour déterminer les coefficients de réflexion et de transmission des empilements unidimensionnels [27], mais a été adaptée au cas bidimensionnel par Pendry [28][29]. La structure est divisée en une succession de couches et une matrice de transfert permet de relier les champs dans une couche à ceux de la couche précédente [30]. La fréquence est ici une variable, et non plus une inconnue comme dans le cas des ondes planes. Ainsi, il est aussi possible, par cette méthode, de remonter à la structure de bande puisque l'on calcule les éventuels vecteurs d'onde de propagation en fonction de la fréquence. De plus, l'éventuelle dépendance en fréquence de la constante diélectrique sera plus facilement prise en compte. Le fichier source du programme développé dans le laboratoire de Pendry [31] est disponible sur l'Internet.³ Un exécutable Windows basé sur ce programme et écrit par Reynolds, de l'Université de Glasgow, est également en libre accès.⁴ Nous utiliserons cette technique, dans un programme commercial, pour le calcul de la transmittance et du champ électrique dans des structures multicouches unidimensionnelles.

Nous utiliserons cette technique, dans un programme commercial, pour le calcul de la transmittance et du champ électrique dans des structures multicouches unidimensionnelles.

11.3. La Méthode des éléments finis FEM :

Une des premières étapes dans les méthodes FEM consiste au maillage de la structure; c'est-à-dire à la division de l'espace de travail en petits éléments. La taille des éléments ainsi découpés est fonction du détail de la géométrie de la structure. Pour chaque élément fini, une simple loi de variation de champ est exprimée. Le but de l'analyse consiste à calculer le champ aux différents nœuds (coins de chaque élément découpé). La plupart des méthodes d'éléments finis utilisent des techniques variationnelles formulées à partir des équations de Maxwell [32][33]. Ces techniques consistent à minimiser ou maximiser une expression qui est connue pour être stationnaire autour de la solution. Généralement, les méthodes d'éléments finis recherchent l'expression des champs électriques en minimisant la fonction d'énergie. Les champs magnétiques pourront être obtenus à partir des champs électriques ainsi calculés. Un grand avantage de cette technique par rapport aux autres techniques numériques est que les propriétés électriques et géométriques de chaque élément peuvent être définies indépendamment les unes des autres. Cela peut se traduire par un maillage différent entre une partie du système où la géométrie est plus complexe et le reste de l'espace à analyser.

Une des premières étapes dans les méthodes FEM consiste au maillage de la structure ; C'est-à-dire à la division de l'espace de travail en petits éléments.

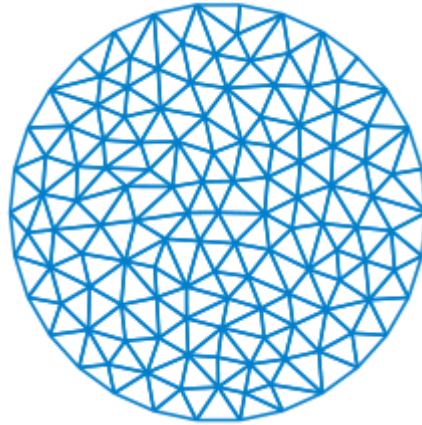


Figure 25 :exemple de maillage triangulaire.

11.4. La méthode des réseaux de diffraction :

Elle est basée sur une description du cristal photonique comme un ensemble de réseaux de diffraction successifs. Les champs sont décomposés dans chaque région séparant ces réseaux et la théorie des réseaux est appliquée pour relier les coefficients de cette décomposition d'une région à l'autre. Le système de relations matricielles obtenu permet d'établir la matrice de diffusion $[S]$ qui caractérise le milieu [34][35][36]. L'intérêt de cette méthode est qu'elle donne non seulement les modes guidés et les résonances (ce sont les pôles de la matrice de diffusion), mais aussi les pertes intrinsèques de ceux-ci.

11.5. La méthode des liaisons fortes :

On développe ici le champ électromagnétique sur une base de fonctions d'onde localisées, par analogie avec la description des liaisons fortes pour les orbitales électroniques des solides cristallins. La base des fonctions d'onde localisées est déterminée en calculant les fonctions de Wannier du cristal photonique parfait [37]. Cette méthode semble être particulièrement rapide pour la détermination des états liés à des défauts dans le cristal.

12. les applications :

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 :

12.1. Guides d'onde :

L'idée des guides d'ondes est apparue en 1994 sous l'impulsion de Joannopoulos, Meade et al mais les premières réalisations ont été effectuées en 1999[38].

En introduisant un défaut linéaire (omission d'une ou plusieurs rangées de motifs élémentaires), il est possible de guider la lumière selon une direction choisie. La lumière va se propager le long de ce guide avec une fréquence appartenant à la bande interdite photonique du cristal. Des guides d'ondes classiques à base de matériaux diélectriques sont réalisés depuis longtemps. L'onde se propage dans le diélectrique d'indice fort et se réfléchit totalement sur les bords qui sont constitués d'un diélectrique d'indice plus faible. L'intérêt des guides d'ondes BIP par rapport à ceux traditionnels c'est qu'ils présentent de faibles pertes au niveau des courbures. Le fait de recourber l'un de ces guides sur lui-même permet d'obtenir un anneau et seuls quelques modes peuvent rester dans cet anneau.

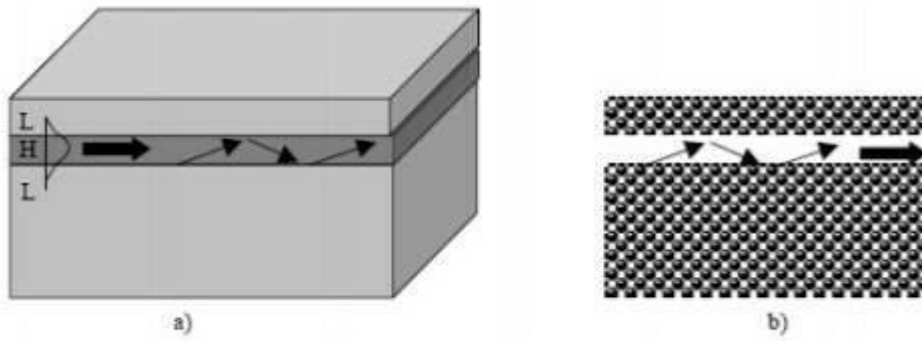


Figure 26: Guide réfractif : modèles de rayons en zig-zag avec réflexions totales et ondes évanescentes b) Guidage par bande interdite photonique.

Un Guide d'onde de la structure GaAs dans l'air à motif carrée ou l'on peut obtenir un anneau à cause de la courbure de l'un de ces guides sur lui-même.

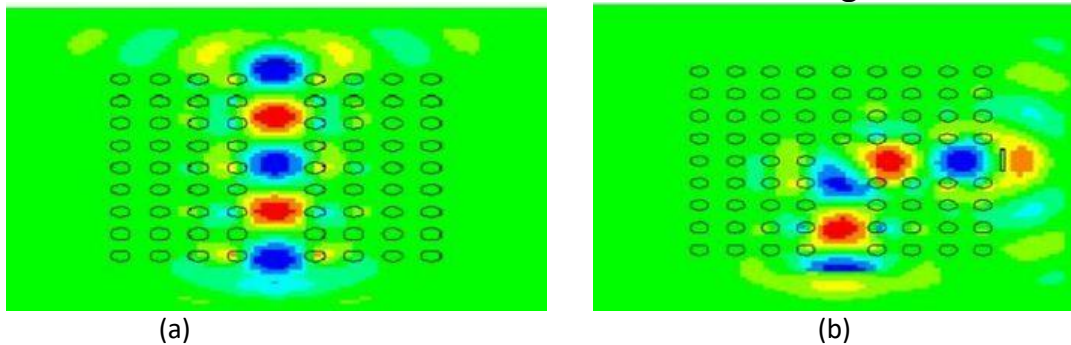


Figure 27: la distribution du champ est autour du défaut en polarisation. (a) Rectiligne (b) Courbures 90° (simulée par le logiciel Rsoft).

12.2. guide en termes de transmission :

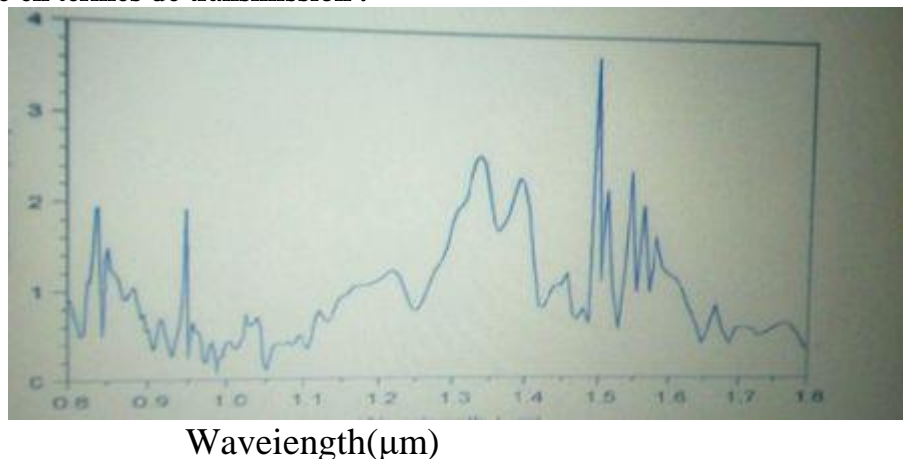


Figure 28 : Spectre de transmission en mode ΓK et ΓM d'une structure W5 du réseau triangulaire de trou d'air de facteur de remplissage $r/a = 0.27$ dans Ti : LiNbO₃.

On remarque sur la figure que la transmission est favorisée autour de 1.55 μm et qu'aucune bande interdite n'est apparue.

12.3. Filtre add / drop :

Le filtre add/drop est composé de 2 guides d'ondes couplés par un ou deux résonateurs

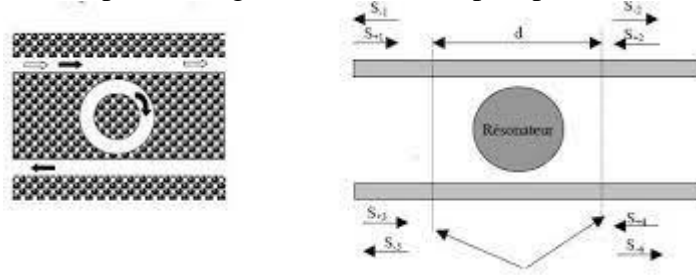


Figure 29 :(a) Représentation d'un filtre add / drop,(b) Principe de fonctionnement. Système à 4 accès constitué d'un résonateur en anneaux et de deux guides d'ondes.

Une réalisation expérimentale, a montrer près de 80% de puissance transférée vers l'avant dans le guide d'onde drop. Le résonateur est une cavité linéique de dix trous manquants dont la conception fine et l'exploitation de modes optiques lents a permis d'accéder à deux modes dégénérés dans la cavité dont les symétries étaient compatibles pour un fonctionnement de type add-drop [39]

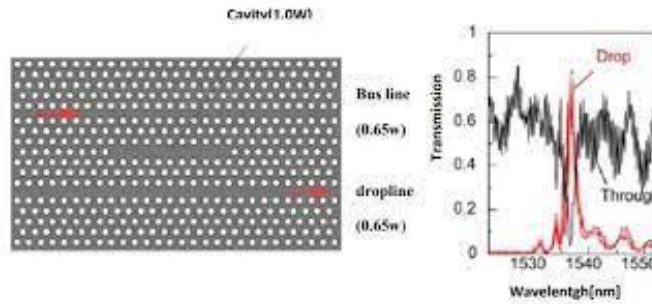


Figure 30 : Exemple de réalisation expérimentale d'un filtre add-drop constitué de deux guides d'onde diffractifs et d'une cavité linéique dans un cristal photonique membranaire. Un peu plus de 80% de la puissance se propageant dans le guide d'onde bus a été transférée dans le guide d'onde drop, vers l'avant, autour de 1.537 μm

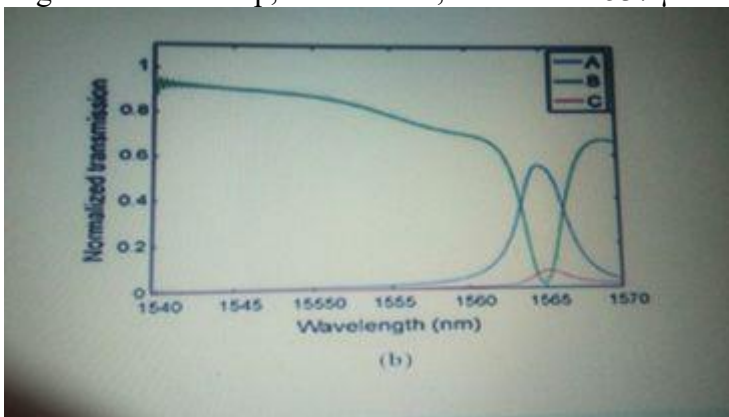


Figure 31 : spectre de transmission normalisé à base d'un résonateur hexagonal [40]

12.4. Cavité de résonante :

La présence de défauts dans un cristal permet l'existence de modes localisés dans une bande de fréquence très étroite, un défaut dans un cristal photonique peut donc servir de cavité résonante puisqu'il piège la lumière dans une bande de fréquence très étroite. Une simple modification d'une des propriétés du matériau (par application d'un champ électrique par exemple) permettra de « libérer » la lumière [41]. Dans le cas de cristaux photoniques bidimensionnels réalisés dans un réseau triangulaire de trous d'air, il y a plusieurs types de

cavités à cristaux photoniques et permet ces types en a le Cavitité à défaut ponctuel. On peut réaliser une cavité en modifiant les paramètres d'un ou plusieurs trous dans un cristal photonique soit en changeant le rayon des trous, soit en déplaçant des trous de leurs positions originales, soit en remplissant complètement les trous. Ces cavités sont généralement de deux types : le type Hn et le type Ln [42].

La cavité de type Hn est une cavité hexagonale dont chaque côté présente une omission de n trous. La cavité de type Ln est une cavité linéique qui est réalisée par omission de n trous dans la direction ΓK

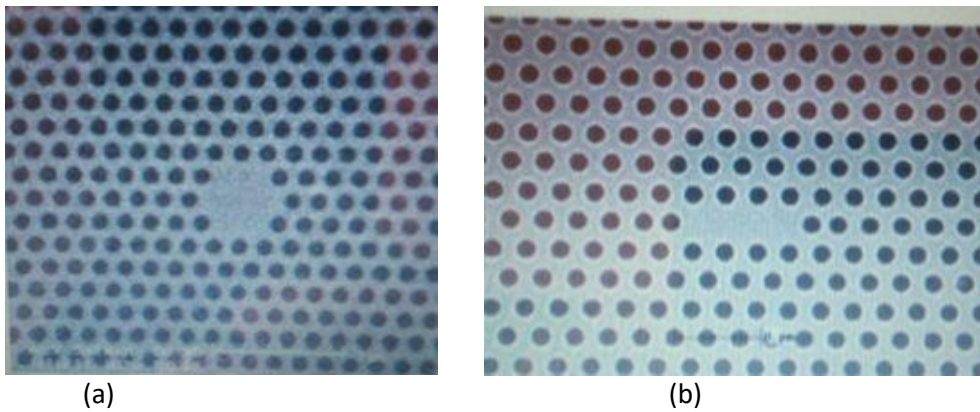


Figure 32: Images MEB des cavités de type H2 (a), et de type L3 (b)fabriquées dans la salle blanche de l'IEF.

L'approche la plus intuitive est de garder un très faible volume de cavité, et augmenter le facteur de qualité de manière conséquente, en aménageant l'environnement électromagnétique.

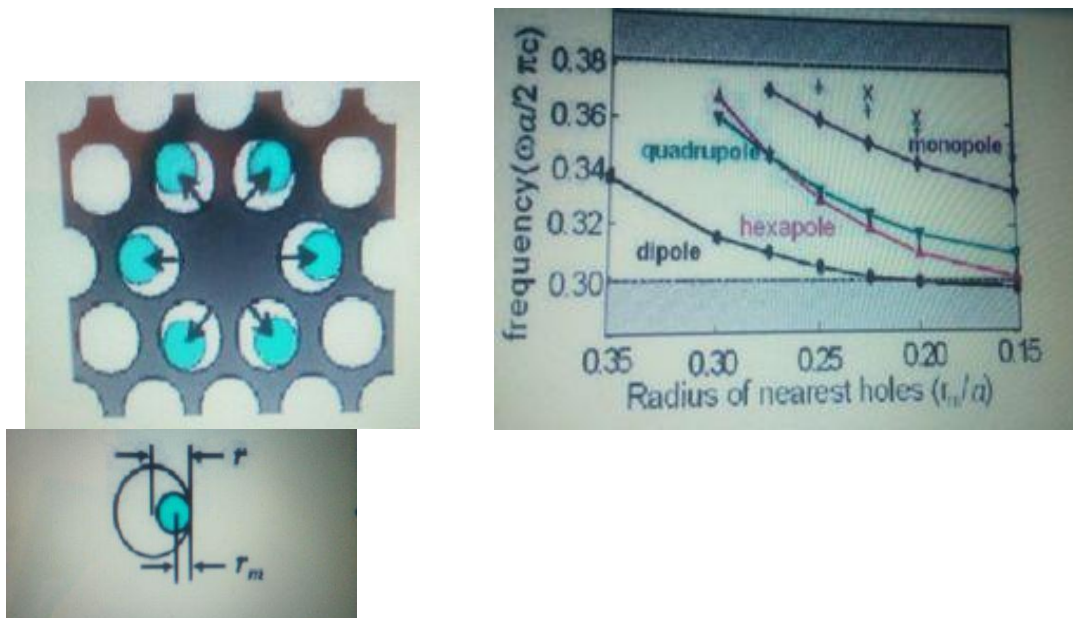


Figure 33 : Exemple d'ingénierie de défauts. Une cavité H1 modifiée.

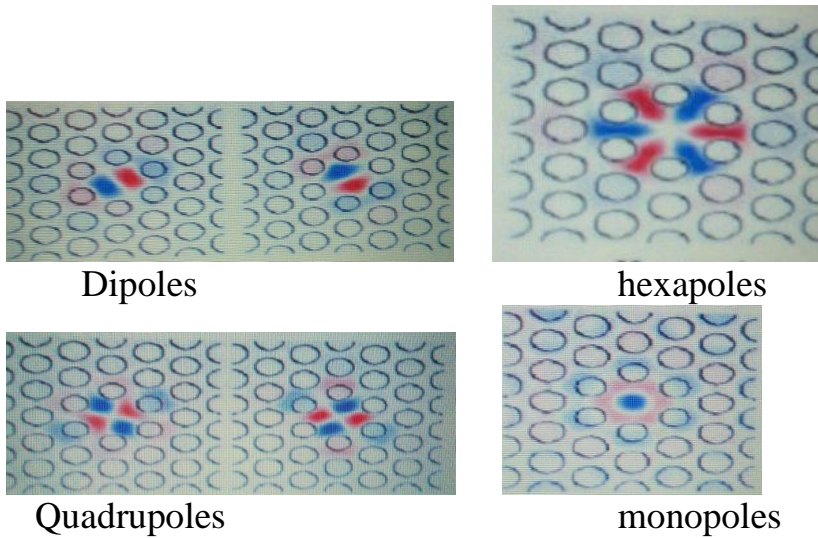


Figure 34: Distribution de la composante H_z du champ magnétique pour les différents modes de cavité.

12.5. Démultiplexeurs :

La large bande passante du canal de transmission optique, permet de transporter plusieurs signaux à des longueurs d’ondes différentes dans le même canal via un multiplexeur optique. Chaque porteuse est transmise indépendamment des autres, dans la mesure où les canaux sont espacés. Cet espacement est l’un des paramètres qui rend mieux l’utilisation de la capacité de la fibre. A la fin du canal de transmission, avant la détection, les signaux sont séparés à l’aide d’un démultiplexeur.

Les équipements de multiplexage en longueur d’onde sont des éléments passifs, souvent de type réseau de diffraction. Ils agissent comme des filtres en sélectionnant le signal dans une zone de longueur d’onde [43].

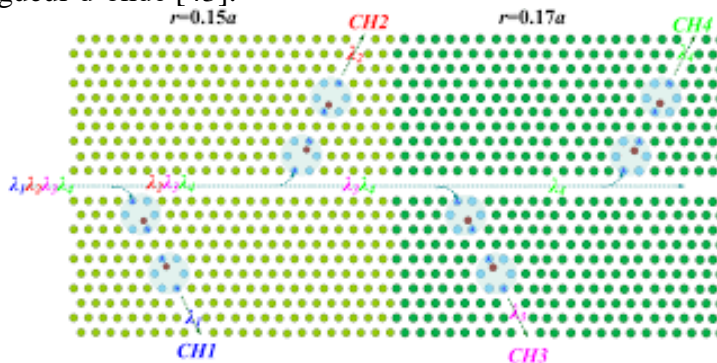


Figure 35 : schéma d’un démultiplexeurs [44]

12.6. Diviseur de puissance :

Le diviseur de puissance permet donc de séparer et de distribuer simultanément la lumière dans les différentes parties de la structure. Un diviseur à cristaux photoniques peut produire une rangée à une dimension de faisceau ($1 \times N$) ou une matrice à deux dimensions de faisceau ($M \times N$), selon le modèle diffractif sur l’élément, donc la structure de jonction en forme de T à une dimension de faisceau (1×2).

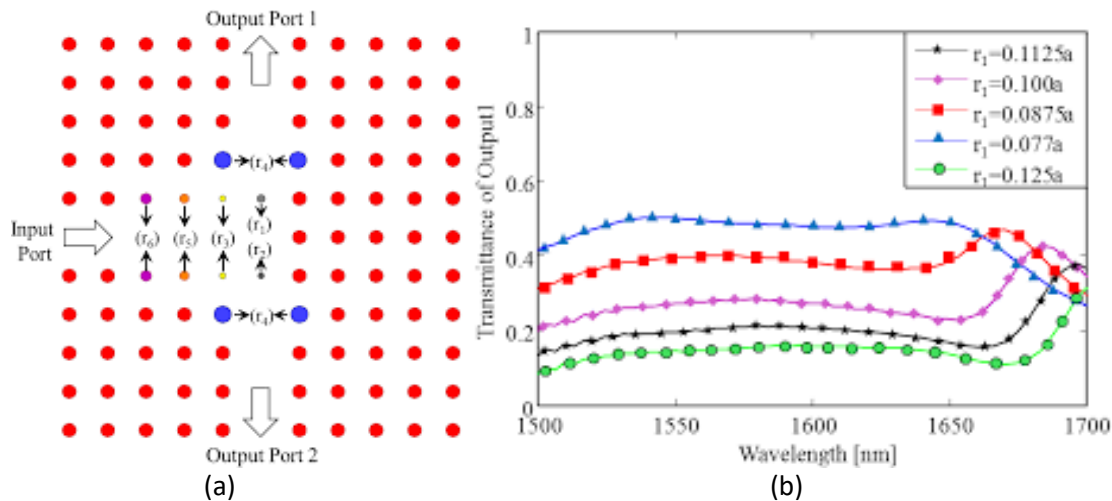


Figure 36 : Diviseur de puissance à CPh 2D[45].(a)- Structure de réseau carrée en forme T avec une seule entrée et deux sorties(b)-Spectre de transmission de la puissance de sortie en fonction de longueur d'onde

Des diviseurs de puissance à cristal photonique de différentes configurations ont été étudiés dans la littérature [46]

Dans la figure , un séparateur à jonction T a été proposé pour transmettre la lumière incidente à la longueur d'onde de 1550 nm avec une large bande interdite de 51 nm et une réflexion de moins de 10%. Un des avantages des topologies présentées est que le partage de puissance dirigé vers chaque port de sortie peut être déterminé en modifiant les rayons de certaines tiges et de certains trous spécifiés dans leurs structures.

Cette modification fournit une bande passante beaucoup plus large et une fonction de rapport de puissance plus linéaire. Dans notre propre structure, nous avons l'intention d'optimiser la distribution du champ de sortie avec une plus grande planéité du spectre de transmission. Pour que le simulateur calcule l'énergie de sortie dans chaque port et pour que la transmission spectrale atteigne 100%, certains rayons des tiges de guide seront optimisés.

Dans le chapitre suivant nous interpréterons en détail les résultats de cette modélisation à l'aide de Rsoft-simulator, en utilisant les structures guidantes à cristaux photoniques bidimensionnelles.

12.7. DEMUX-coupler :

Les propositions de démultiplexeurs à cristaux photoniques tendent à favoriser des cavités très petites (quelques périodes) et la fonctionnalité « add-drop », la plus exigeante, Le principe du dispositif proposé est de se servir du couplage par diffraction de Bragg entre un mode fondamental rapide pour la propagation du signal et un mode d'ordre supérieur, lent, pour l'extraction latérale du signal. Pour des guides à cristaux photoniques (CP) "W3" ou "W5", formés de 3 ou 5 rangées manquantes, ce couplage correspond à une mini stop band[51], dont la largeur typique est de 3-20 nanomètres à 1500 nm, tout fait adaptée au coarse WDM (CWDM), et donc aux réseaux métropolitains.

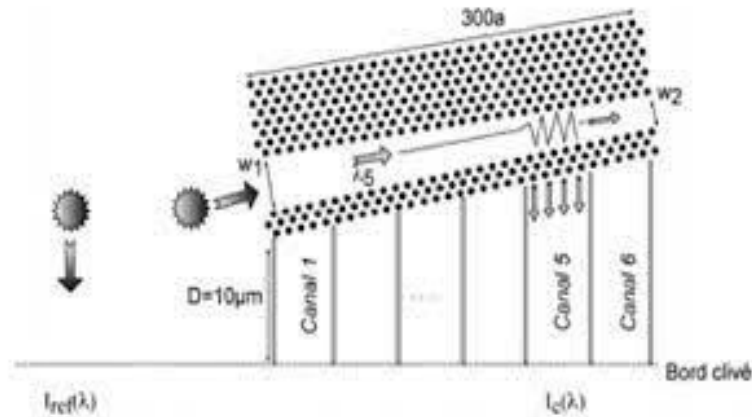


Figure 37: Principe de démultiplexeur spectrographe : le guide PC de largeur proche de «W3» couple le mode fondamental au mode d'ordre supérieur uniquement dans la section où la diffraction de Bragg entre les deux modes est autorisée. Ce mode est ensuite extrait latéralement à travers les trois rangées de trous.

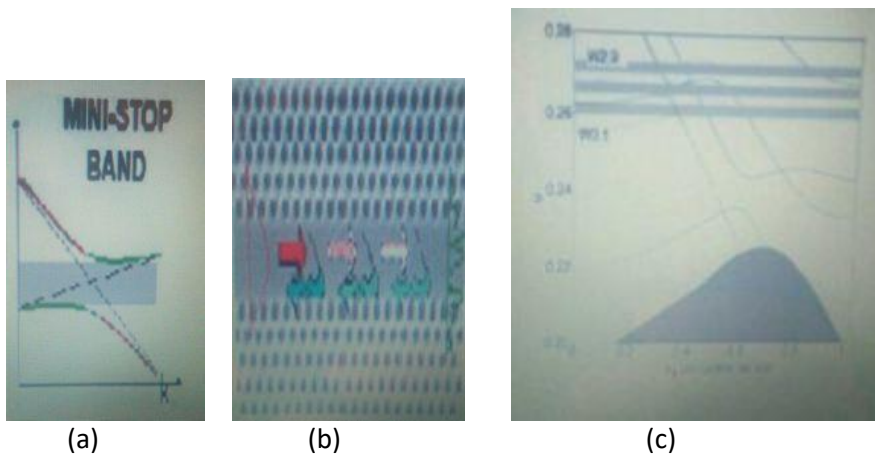


Figure 38 : illustration de l'utilisation de la mini-stopband : (a) relation de dispersion locale, le mode fondamental étant le plus raide, le mode d'ordre supérieur le moins raide ; (b) schéma du couplage de mode dans le guide W3, (c) superposition des relations de dispersion pour des guides dont la largeur est modifiée de 0.1 rangée en plus ou moins comparé à W3. On voit que ce changement de largeur de 40 nm, dans un cas typique, conduit à des mini-stop band bien séparés

La figure illustre le couplage de mode de W3 de façon générique. Dans le dispositif, la position de la mini-stopband évolue avec la largeur du guide.

13. conclusion:

Un cristal photonique est un matériau artificiel constitué d'un arrangement périodique dans lequel la constante diélectrique est périodiquement modulée dans une deux ou trois directions de l'espace, permettant ainsi de contrôler la lumière à l'échelle de la longueur d'onde .ce nouveau type de matériaux est capable de bloquer la propagation des ondes optiques, élastiques ou acoustiques dans certaines directions de propagation.

Dans ce chapitre nous avons abordé une description générale et les notions de bases associées aux CPs, nous avons défini aussi la notion de bande interdite photonique.

Chapitre 2

Les filtres add-drop en cristaux
photoniques

2.1. Introduction :

Le filtre optique add-drop (ADF) est l'un des blocs de construction fondamentaux pour les multiplexeurs add-drop optiques (OADM), les OADM reconfigurables, les modulateurs optiques et les commutateurs optiques nécessaires pour la photonique au silicium, les circuits intégrés photoniques (PIC) et le multiplexage par division de longueur d'onde (WDM)) systèmes de communication optique [47,48].

Des progrès significatifs ont été réalisés sur les dispositifs basés sur ADF dans les domaines de la compacité, de la sélectivité spectrale élevée, accordabilité spectrale, commutation rapide et commutation de faible puissance [49,50].

L'une des conceptions les plus prometteuses pour les ADF guidés d'ondes est le résonateur à micro-anneau à bande (ou à nervure) [51, 52, 53], dans lequel un mode de circulation dans l'anneau est excité par le couplage de l'onde de propagation directe dans un guide d'ondes de bus à proximité. Une sélectivité spectrale très élevée peut être obtenue en raison du facteur de qualité Q élevé du résonateur et de la nature monomode intrinsèque de l'anneau. Un abaissement vers l'arrière ou vers l'avant des modes de résonance dans la cavité annulaire peut être réalisé par l'ingénierie appropriée du schéma de couplage bus / anneau et en choisissant le nombre d'anneaux dans l'ADF. Pour obtenir une plage spectrale libre (FSR) plus grande que la fenêtre de communication optique ($FSR > 30$ nm pour une couverture spectrale complète en bande C), un rayon d'anneau en silicium inférieur à $5 \mu\text{m}$ est nécessaire [52].

Cependant, dans les anneaux SOI à base de bandes, la perte de rayonnement augmente de façon exponentielle avec la réduction du rayon de l'anneau, ce qui fixe en pratique une limite au rayon de l'anneau de quelques micromètres (par exemple $3 \mu\text{m}$).

De plus, les performances des résonateurs micro-anneaux à guide-bande sont très sensibles à la rugosité de surface et à l'espace nanométrique entre le résonateur annulaire et le guide d'ondes de bus, qui crée un autre défi dans la fabrication [54].

Les structures à cristal photonique (PC), en revanche, peuvent surmonter ces défis car, comme discuté ici, ils ont le potentiel de réaliser des résonateurs à Q élevé et à faibles pertes dans cavités ultra-compactes qui sont $2x$ à $4x$ plus petites que la taille minimale utilisable à base de bande anneaux. Les structures PC offrent une sélectivité spectrale élevée [55, 56,57].

Actif sélectif en longueur d'onde et des dispositifs PC passifs ont été proposés sur la base de divers points et défauts de ligne photoniques cavités de guide d'ondes de plaque de cristal [55, 58,59,60].

Le premier rapport d'un anneau de cristal photonique résonateur (PCRR) était dans une cavité laser à anneau de guide d'ondes hexagonale [61], où la conception de mode flexible et le couplage efficace ont été discutés. Plus tard, les caractéristiques spectrales des résonateurs à anneau rectangulaire couplés au guide d'ondes dans les cristaux photoniques ont été étudiées par Kumar et al. [62], où un grand anneau quasi-rectangulaire unique a été introduit comme éléments de chute sélectifs en fréquence.

Nous proposons et étudions ici un nouveau type d'ADF optique basé sur l'ultra-compact PCRR. Nous nous concentrons sur la structure PC en treillis carré de tiges diélectriques. Cependant, nous prévoyons que les tendances découvertes ici s'appliqueront à d'autres symétries de réseau, telles que le trou d'air treillis triangulaires. Dans cet article, les ADF utilisent une combinaison de PC à défaut de ligne (W1) guides d'ondes et PCRR simples ou doubles. Nous constatons qu'une sélectivité élevée en longueur d'onde est obtenue en introduisant des diffuseurs diélectriques aux coins des résonateurs «annulaires» carrés. La rétrogradation a été réalisée dans des PCRR à un seul anneau avec une efficacité de chute supérieure à 96%.

Étonnamment, des chutes vers l'avant et vers l'arrière ont été démontrées dans la PCRR à double anneau structures, avec sélection vers l'avant ou vers l'arrière en contrôlant le couplage

des modes de cavité avec une symétrie et une dégénérescence différentes. Une sélectivité spectrale élevée avec une cavité Q élevée apparaît faisable, ce qui fait de ces ADF basés sur la PCRR des éléments de base prometteurs pour modulateurs et commutateurs contrôlés.

Les propriétés de base des PCRR sont présentées dans la Sec. 2, suivi de la conception de ADF PCRR à un seul anneau en Sec. 3. Conception et transmission de l'ADF basées sur la PCRR à double anneau les caractéristiques seront discutées dans la Sec. 4, à la fois pour la descente vers l'avant et vers l'arrière.

2.2. description géométriques des filtres add-drop :

D'une façon générale, les filtres add-drop à base de cristaux photoniques étudiés dans la littérature sont généralement en configuration planaire et les guides d'onde sont diffractifs planaire et à l'utilisation de guides d'onde diffractifs. La configuration choisie pour la réalisation du add-drop est donnée figure 2.1. Dans la suite, nous appellerons le guide du dessus (celui où l'on place le dipôle d'injection), le guide "BUS" tandis que le second guide sera le guide "DROP".

La distance de couplage du guide au résonateur est identique pour le guide Bus et le guide Drop.

Les deux guides ont les mêmes dimensions et sont constitués du même matériau, du silicium, le dispositif étant totalement englobé dans la silice. Nous prendrons largeur des guides de 240nm, épaisseur de 200nm.

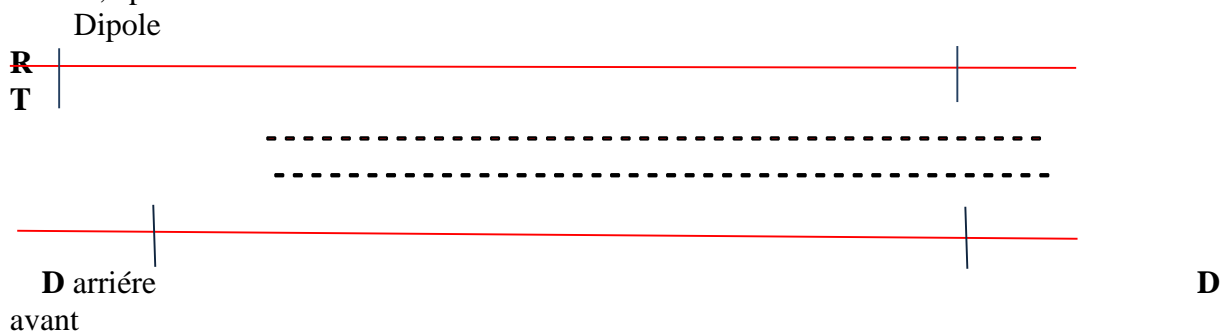


Figure 2.1 : Filtre add-drop vertical composé d'un résonateur à double cristaux photoniques 1D et de deux guides identiques situés de part et d'autre de la cavité. La position du dipôle d'excitation est donnée par "x" et les symboles R, T, Davant et Darrière désignent respectivement les puissances transmises et réfléchies dans le guide Bus et les puissances transmises vers l'arrière (Backward) et vers l'avant (Forward) dans le guide Drop.

2.3. fonctionnement physiques des filtres add-drop :

Le démultiplexeur proposé est basé sur un ensemble de filtres add-drop QSRR qui sont continuellement d'un grand intérêt en tant qu'éléments de base des démultiplexeurs, le filtre réalisé est un deux guides d'ondes perpendiculaires couplés à travers un noyau en forme de diamant QSRR

conçu sur des PhC en réseau carré avec une constante de fond $a_{back} = 0,53 \text{ m}$ et un rayon relatif de tiges $r = 0,21 \times a$ comme indiqué dans Fig(a), pour réaliser le circuit proposé, une rangée entière de DR a été supprimée pour créer le guide d'ondes de bus principal W1 (guide d'ondes à une rangée) et le guide d'ondes de sortie a été obtenu en retirant dix tiges de la 14e colonne et en ajoutant deux réflecteurs tiges, avec un constante de réseau $a_{ref} = 0,5 \times a$ et dont la valeur de rayon du premier est la moitié de celle des tiges de fond et la valeur du rayon du second est le même que celui des tiges d'arrière-plan comme indiqué sur la figure(b), nous pouvons obtenir une énergie maximale réfléchissante vers la sortie.

Le résonateur en anneau, quant à lui, est conçu en créant une cavité en supprimant un réseau 5×5 de DR séparés par deux rangées du guide d'onde du bus principal, la cavité est ensuite

Chapitre 2

remplie par un noyau de réseau en forme de losange 3×3 d'une constante de réseau intérieure $a_{in} = 0,3747$ m au centre, cependant, un rayon relatif interne variable "rin" a été introduit via une mise à l'échelle intégrée COMSOL fonction où $r_{in} = s \times a$ avec "a" est la constante de réseau de fond et "s" varie entre 0,18, 0,19, 0,20, 0,21, 0,225, 0,24, 0,255 et 0,27 pour obtenir une commutation de résonance aux longueurs d'onde correspondantes de $r = 1,523, 1,531, 1,536, 1,541, 1,547, 1,551, 1,555$

et 1,561 m respectivement, ce qui est possible grâce à une option de balayage paramétrique.

Un nouveau concept de miroir réfléchissant a été conçu et introduit dans ce résonateur annulaire où il a été réalisé par la combinaison de deux DR de rayon $r_{rod} = 0,0835$ m qui sont distancés par un espacement de treillis $a_{rod} = 0,729$ m et un diélectrique rectangulaire de largeur

$w = 0,167 \mu\text{m}$ et longueur $l = a_{rod}$, ce processus permet de créer un miroir de forme rectangulaire avec des bords incurvés, les miroirs sont positionnés aux quatre coins du résonateur pour obtenir un confinement maximal de la puissance aux longueurs d'onde de résonance présélectionnées.

La transmission normalisée pour différentes longueurs d'onde est représentée sur la figure (c).

Dans notre cas, il est évident d'après la figure (d) que le couplage entre les guides d'ondes et l'anneau est très efficace en raison de l'existence de

un mode guidé. Ceci est dû au couplage de la puissance du guide d'ondes à l'anneau.

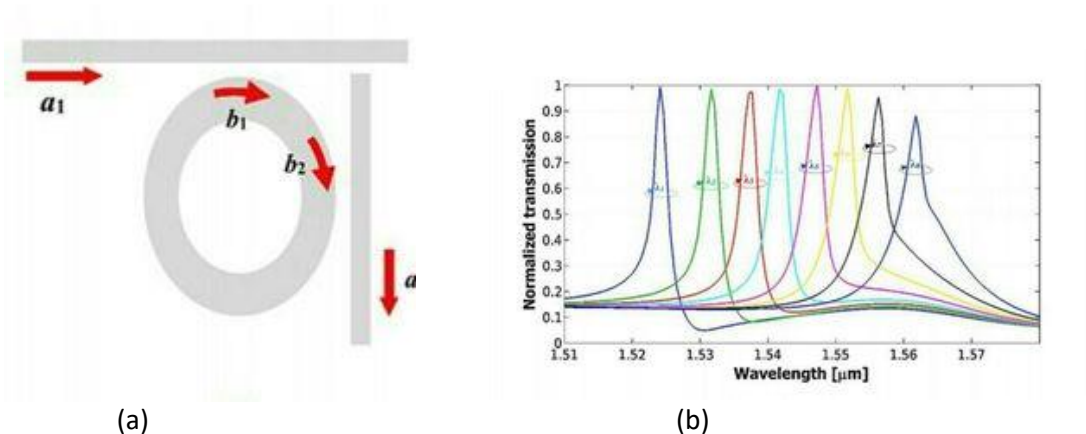
La résonance a d'abord été atteinte autour de 1,55 m, mais une modification paramétrique a été appliquée pour changer la résonance à

environ 1,31 m, dont la constante de réseau de fond $a_{1.31} = 0,45$ m, la constante de réseau du noyau du résonateur en anneau

$a_{in1.31} = 0,3181$ m et l'espacement des barreaux du miroir réfléchissant $a_{rod1.31} = 0,619$ m, au contraire le rayon des barreaux/constante du treillis

les ratios sont les mêmes que ceux précédemment mis en évidence où :

$$\frac{r_{1.31}}{a_{1.31}} = \frac{r_{rod1.31}}{a_{rod1.31}} = 0.21 \quad (2.1)$$



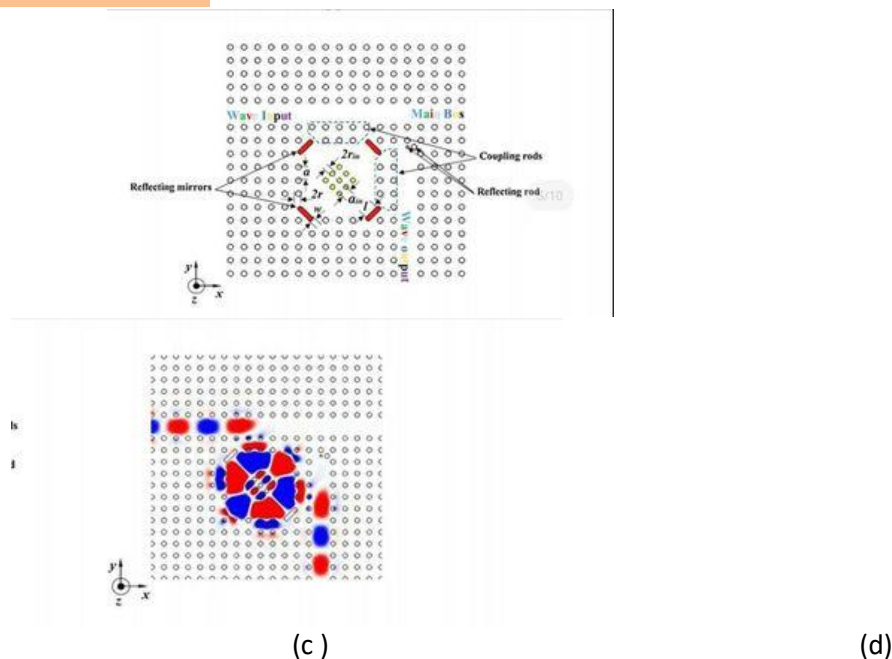


Figure 2.2 : Conception schématique et simulation du résonateur à anneau quasi carré QSRR proposé. (a) principal de couplage. (b) L'esquisse finale du conception proposée. (c) Les résultats de transmission simulés QSRR pour tous les rayons relatifs intérieurs et les constantes de réseau donnés $a=0,53$ m et $a_{in}=0,3747$ m. (d) Distribution du champ électrique à la longueur d'onde $1,523 \mu\text{m}$ avec $r_{in} = 0,18 \times a$.

Et

$$\frac{r_{in.31}}{a_{in.31}} = s \quad (2.2)$$

Avec "s" est des mêmes valeurs que précédemment introduites pour obtenir une résonance aux longueurs d'onde correspondantes de $r = 1,296, 1,304, 1,308, 1,312, 1,316, 1,320, 1,324$ et $1,328$ m comme le montre la figure .

La simulation de diffusion de champ d'onde QSRR autour de $1,55$ m montre une similitude avec celle de la figure (d) précédemment montrée cependant la seule différence notable est sa dimension qui est corrélée à la constante de fond a et aux rayons de fond r des tiges, tandis que la variation des rayons relatifs r_{in} de l'anneau intérieur permet d'acquérir le déplacement de la longueur d'onde de résonance.

D'après les résultats obtenus, il est clair que la largeur spectrale est approximativement d'environ $\Delta\lambda_r = 2,5$ nm à $\Delta\lambda_r = 3$ nm, cependant, l'espacement des canaux varie entre $\Delta\lambda_{ij} = 4$ nm et $\Delta\lambda_{ij} = 8$ nm.

En conséquence, nous pouvons supposer que le fonctionnement mutuel du QSRR adjacent avec une faible diaphonie entre les sorties est possible lorsque regroupés pour créer l'esquisse finale du démultiplexeur.[63]

2.4. les applications des filtres en cristaux photoniques:

Depuis 1998, les composants optiques basés sur les 2 DPC tels que : filtrage ,démultiplexage, les diviseurs de puissances en CP ,commutation optique, les portes logiques , etc., sont conçus pour des applications commerciales.

2.4.1. filtrage :

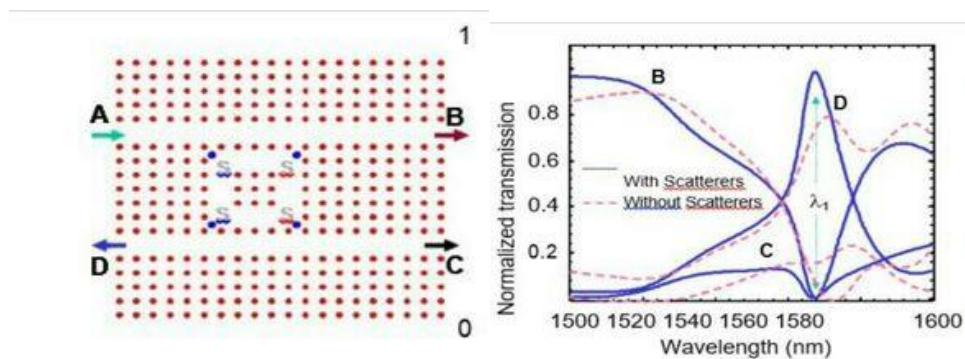
On va citer deux exemples de filtrage.

2.4.1.1. Filtre Add-Drop à base de PCRR à anneau unique :

Chapitre 2

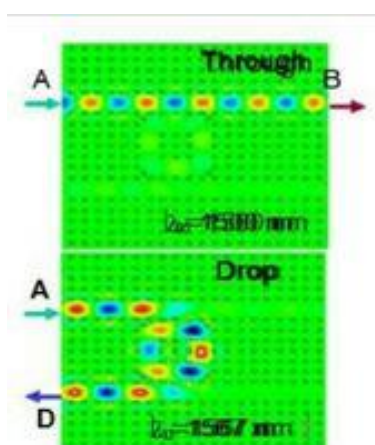
Afin d'améliorer l'efficacité d'extraction et la sélectivité spectrale en supprimant les modes de contre-propagation qui peuvent provoquer des oscillations parasites dans le spectre de transmission, les tiges de couleur bleue dites tiges de dispersion, symbolisées par « s » sur la figure . Ces tiges de dispersion ont exactement les mêmes diamètres et les mêmes indices de réfraction que toutes les autres tiges diélectriques dans la structure photonique. L'ADF optique à anneau unique est représenté schématiquement sur la figure II. Toutes les densités de puissance spectrale transmises ont été normalisées à la densité de puissance spectrale de la lumière incidente à Partir du port d'entrée A. Sur la figure , nous avons présenté les spectres de transmission normalisés pour les trois ports de sortie du filtre ADF à un seul anneau.

Nous constatons que pour un résonateur sans tiges de dispersion, on obtient une faible efficacité d'extraction avec une sélectivité spectrale . En introduisant simplement quatre diffuseurs, une sélectivité spectrale nettement améliorée, avec une efficacité d'extraction proche de 100% , peut être obtenue à la fréquence de résonance . Q et la diminution de l'efficacité d'extraction.[64]



(a)

(b)



(c)

Figure :2.3 : (a) structure schématique, (b) spectres de transmission normalisés au niveau de trois ports de sortie B, C, D pour les PCRR avec et sans diffuseurs ; (c) Les modèles de champ électrique pour les canaux de passage (résonance : $\lambda_0 = 1500$ nm) et de chute (sur résonance : $\lambda_1 = 1567$ nm).

2.4.1.2 : 2. Filtre Channel drop en forme de T à base de PCRR :

Le filtre proposé est contient trois ports, un port d'entrée et deux ports de sortie. C'est un système à trois ports dans lequel un PCRR est situé entre deux guides d'ondes, un horizontal appelé guide bus et l'autre vertical connu sous le nom de guide drop.

En plaçant un guide d'onde à côté d'un résonateur en anneau, l'énergie électromagnétique se propageant dans le guide d'onde sera piégée dans le résonateur en raison du couplage à la fréquence de résonance. Autrement dit, lors de la résonance, le résonateur en anneau extrait la lumière du guide horizontal et la transfère au guide vertical. Dans le cas ordinaire, lorsque l'anneau ne résonne pas, toute la puissance reste dans le guide bus et passe par le port de sortie.

La figure (a) représente la structure schématique d'un CDF en forme de T à base d'un PCRR . Dans cette structure, le résonateur en anneau est créé en supprimant un carré de dimension 7×7 de tiges diélectriques puis en le remplaçant par une structure quasi-cristalline.

Les ondes optiques pénètrent dans la structure par le port A et sortent par le port B, mais lors de la résonance, les longueurs d'onde optiques seront transférées au guide drop via l'anneau résonnant et sortent par le port C. A $\lambda = 1551$ nm (résonance), l'efficacité d'extraction dépasse 90 % avec un facteur de qualité de 387 (figure I(b))[65]

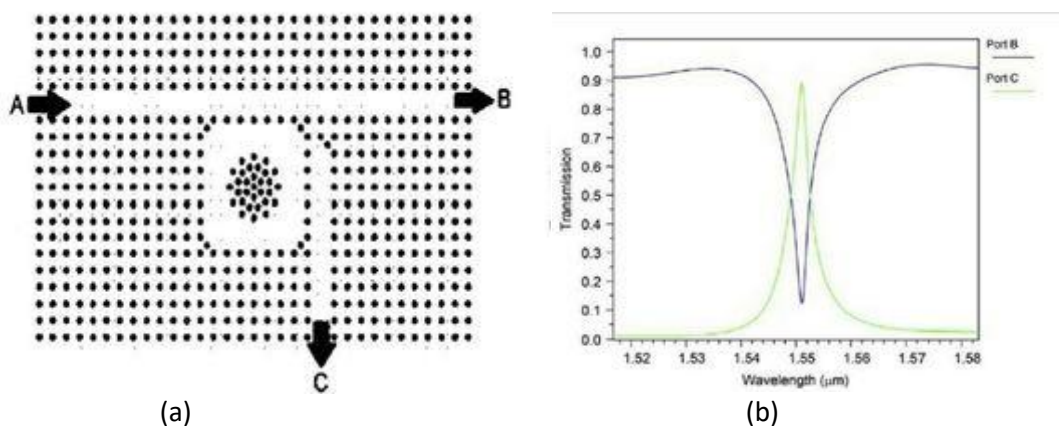


Figure2.4 : (a) Structure schématique et (b) spectres de transmission normalisée d'un CDF en forme de T.

2.4.2. demultiplexage :

Le démultiplexeur proposé est basé sur des PhCs bidimensionnels, avec une structure en treillis carré de tiges noyées, les tiges sont de la gallium arsenic GaAs matériau semi-conducteur proposé par Skauli et al en 2003 , les propriétés de cette substance sont intégrées dans COMSOL Multiphysics sous la sous-famille des matériaux inorganiques sous la famille des matériaux optiques, où l'indice de réfraction des valeurs sont $n_{1.31} = 3.404$ autour de $1.31 \mu\text{m}$ et $n_{1.55} = 3.370$ autour de $1.55 \mu\text{m}$ à une température de 22°C ce qui nous donne un plus pratique approche pour notre simulation par rapport à d'autres études qui ont utilisé un indice de réfraction constant, le COMSOL Multiphysics qui est basé sur la méthode des éléments

finis FEM a été utilisé pour simuler la distribution et la transmission des ondes électromagnétiques à travers les structures PhCs pour différentes valeurs de longueur d'onde.

Au début, nous présentons la phase de conception du démultiplexeur mentionné qui consistede trois blocs qui sont le démultiplexeur à large bande comme bloc principal, le résonateur en anneau quasi carré QSRR comme base de notre proposé la première bande autour de $\lambda = 1,55$ m démultiplexeur identique à la deuxième bande autour de $\lambda = 1,31$ m.

2.4.2.1 Bande-gapanalyse :

Dans cette section, nous analysons le diagramme de bande afin de déterminer les paramètres des quatre cristaux photoniques du démultiplexeur. Ici, le diagramme est tracé en utilisant le procédé d'expansion d'onde plane PWE sous COMSOL Multiphysics logiciel, la Fréquence ω / λ normalisée par rapport au vecteur $(\Gamma-XM-\Gamma)$. $n = 3,370$, $r = 0,21 \times a$, et $a = 0,53$ m, respectivement.

la structure PhC supporte une photonique et un gap dans la région $0 < a/\lambda < 0,45$, $0,52 < a/\lambda < 0,54$ et $0,68 < a/\lambda < 0,75$ for TE mode [63]

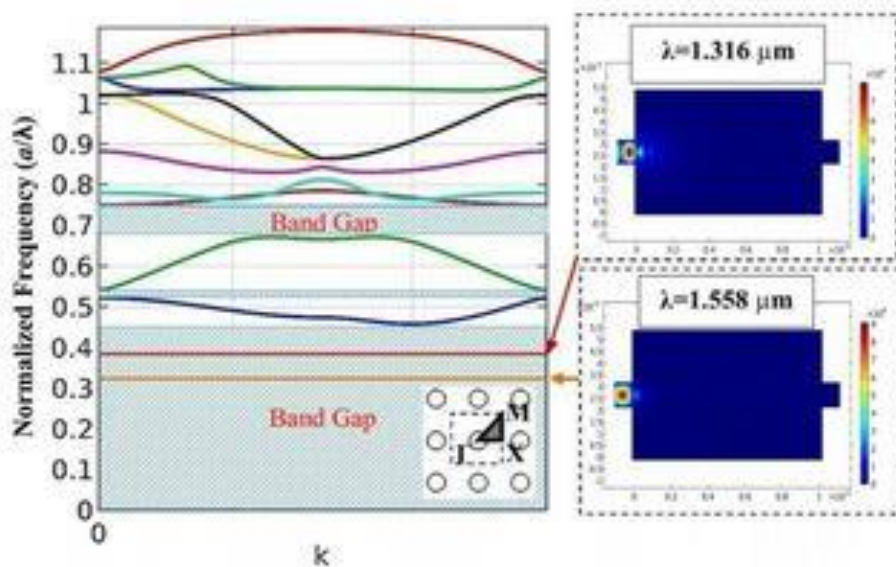


figure2.5 : Diagramme de bande carrée PhC sans défaut et distribution du champ électrique aux longueurs d'onde 1,316 μm et 1,558 μm . Les paramètres sont fixés tels que : $n=f(\lambda)$ [40], $r = 0,21 \times a$, et $a = 0,53$ m.

2.4.2.2. Démultiplexeur large bande :

Le démultiplexeur à deux canaux proposé est un diviseur en T formé d'un guide d'ondes à une rangée dans la structure en treillis carré PhCs, comme le montre la figure 2.5, la dalle de PhCs utilisée est constituée de tiges de cylindre GaAs en réseau d'air avec une constante de fond de $a=0,53\mu\text{m}$, un rayon relatif $r=0,21 \times a$ et une résolution de 21 tiges horizontalement et 20 tiges verticalement, en gardant six tiges dans le guide d'ondes horizontal et en changeant leur rapport de rayons, nous obtenons une séparation de longueur d'onde comme le montre la figure sur le plan Oxyz.

La figure 2.6 montre la simulation du démultiplexeur à large bande du séparateur en T à l'aide de COMSOL Multiphysics où la figure 2.6 représente la conception schématique du séparateur en T qui a été réalisée en supprimant partiellement deux rangées de tiges diélectriques, dont la première consiste à retirer verticalement quinze DR de la 11ème colonne, et la seconde est en supprimant horizontalement quatorze DR de la 15ème rangée tout en conservant six DR comme indiqué sur la Fig 2.6, dont leurs rayons doivent être modifiés pour arriver aux résultats souhaités, les trois DR sur le côté gauche de le séparateur a un rayon $r_1 = 0,245 a$ pour obtenir un couplage d'onde au port 1 autour de 1,31 μm , tandis que sur le côté droit, les deux rayons

DR latéraux sont de $r_2 = 0,327 a$ tandis que celui du milieu est de rayon $r_3 = 0,42 a$ pour atteindre couplage d'onde au port 2 autour de $1,55 \mu\text{m}$ comme le montre le graphique de la Fig , les résultats représentent le coefficient de transmission entre l'entrée et à la fois le port 1 et le port

$|S_{31}| = 0,9$ à leurs longueurs d'onde correspondantes = $1,30 \mu\text{m}$ et = $1,525 \mu\text{m}$ respectivement, qui font partie des bandes souhaitées cependant aux bandes de longueurs d'onde centrales = $1,31 \mu\text{m}$ et = $1,55 \mu\text{m}$ les valeurs de transmission sont $|S_{21}| = 0,95$ $|S_{31}| = 0,80$ qui sont les meilleurs résultats que nous avons obtenus pour le démultiplexage large bande jusqu'à présent, dans la Fig et la composante transversale de l'onde électromagnétique E_z est présentée autour des longueurs d'onde = $1,31 \mu\text{m}$ et = $1,55 \mu\text{m}$ respectivement où les impulsions positives sont en rouge et les impulsions négatives sont en bleu[63]

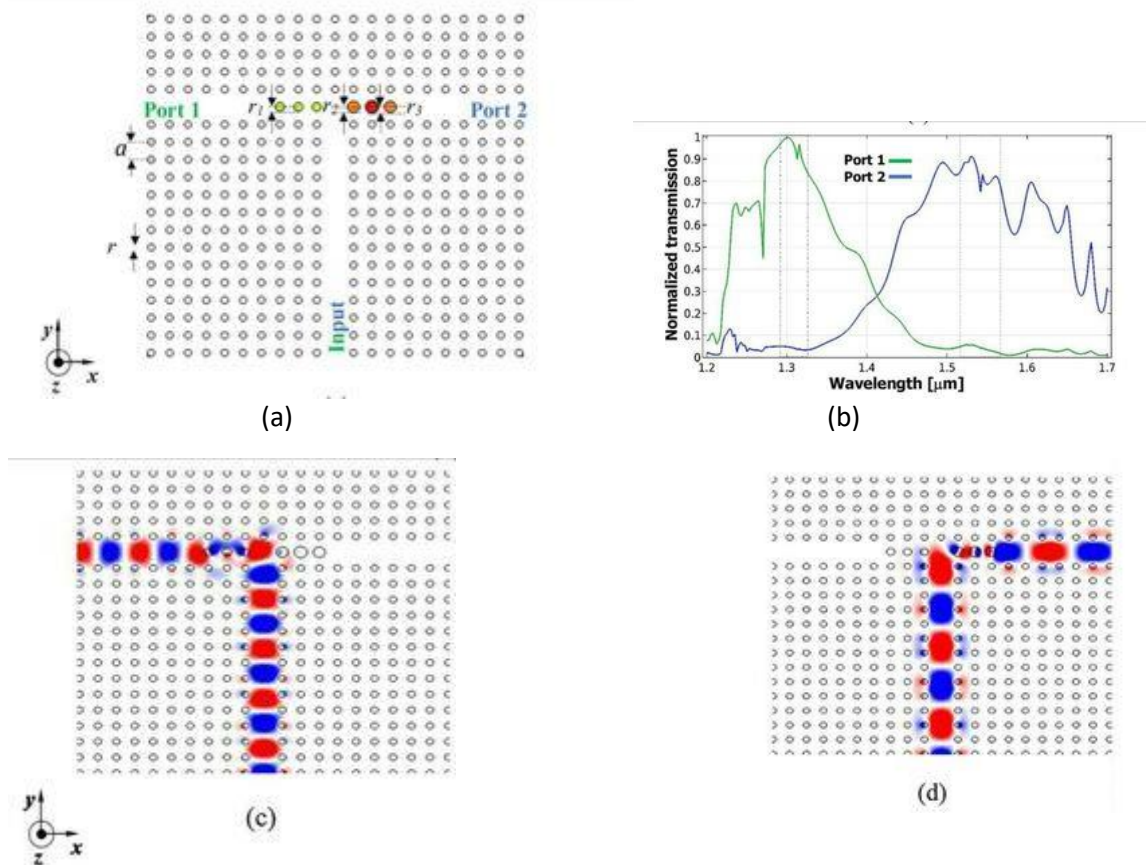


Figure 2.6 : simulation du démultiplexeur large bande splitter T. (a) La conception schématique des séparateurs où $r_1 = 0,245 \times a$, $r_2 = 0,327 \times a$ et $r_3 = 0,42 \times a$. (b) Les résultats de la simulation représentant le coefficient de transmission entre l'entrée et les ports 1 et 2. (c) Le champ électromagnétique diffusé pour la longueur d'onde correspondante $1,3106 \mu\text{m}$. (d) Le champ électromagnétique diffusé pour la longueur d'onde correspondante $1,5518 \mu\text{m}$.

2.4.2.3. Le démultiplexeur double bande 16 canaux :

Le démultiplexeur proposé est conçu sous une forme rectangulaire, occupant une superficie de $752,25 \text{ m}^2$ il se compose de 59×27 tiges espacées par une constante de réseau de $1,55 = 0,53 \text{ m}$ représentant à la fois le bloc principal en tant que démultiplexeur large bande et le premier bloc

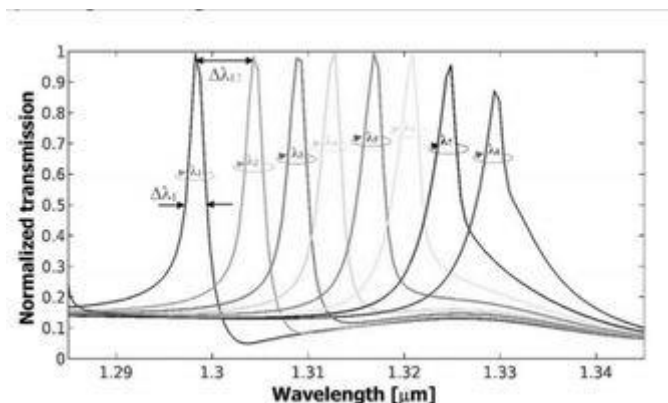


Figure 2.7 : Les résultats de transmission simulés QSRR pour tous les rayons relatifs intérieurs donnés, la constante de réseau de fond $a=0,53$ m et la constante de réseau intérieur $a_{in}=0,3747$ m.

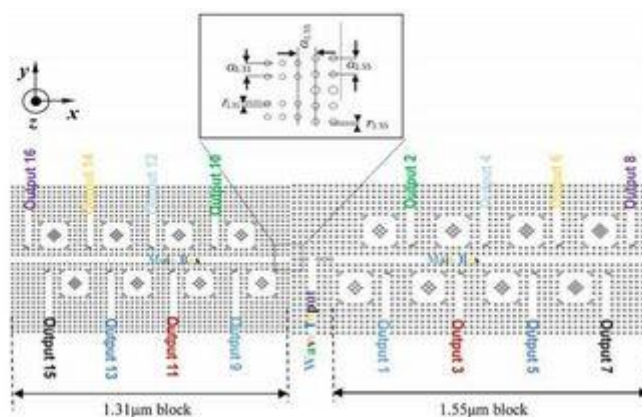
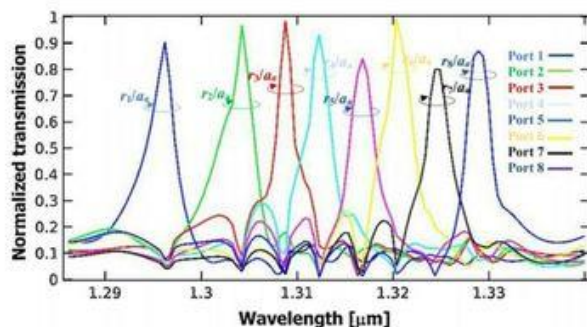
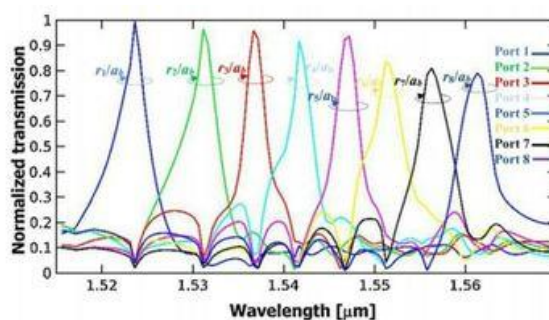


Figure 2.8 : L'esquisse finale du démultiplexeur multicanal bibande.

démultiplexeur (environ 1,55 m), et 53×31 tiges espacées d'une constante de réseau de $a_{1,31} = 0,45$ m représentant le deuxième bloc démultiplexeur (environ 1,31 m), ce qui donne une longueur totale de $l = 54,59$ m et une largeur équivalente de $w = 13,80$ μm . Le démultiplexeur tel qu'illustré à la figure sur le plan Oxyz se compose de trois blocs, dont le premier bloc est le démultiplexeur à large bande situé au milieu du circuit avec une constante de réseau de $a = 0,53$ m avec un guide d'onde d'entrée résultant en deux guides d'onde de sortie de lequel le droit est couplé au bus principal du premier bloc autour de $\lambda = 1,55$ μm de la même constante de réseau, tandis que dans la sortie de gauche, il est couplé au deuxième bloc autour de $\lambda = 1,31$ μm avec une constante d'espacement de réseau de $a_{1,31} = 0,45$ m, la connexion entre les deux guides d'ondes avec des constantes de réseau différentes invoque un défi mais elle est modifiée par la centralisation mutuelle des deux guides d'ondes autour du même axe tandis que les deux blocs sont espacés par un réseau



(a)



(b)

Figure 2.9 : Spectre de transmission normalisé du circuit proposé. (a) La transmission normalisée du deuxième 2e bloc (environ $1,31 \mu\text{m}$) où $a_{1,31} = 0,45 \text{ m}$ et $r_{in}(\lambda_r)/a_{1,55} = s(\lambda_r)$. (b) La transmission normalisée du premier 1er (bloc autour de $1,55 \text{ m}$) où $a_{1,55} = 0,53 \text{ m}$ et $r_{in}(\lambda_r)/a_{1,55} = s(\lambda_r)$. Avec λ_r est la valeur de longueur d'onde de résonance et "s" est donné comme vecteur linéaire comme $s(\lambda_r) = [0,18, 0,19, 0,20, 0,21, 0,225, 0,24, 0,255, 0,27]$.

2.4.3 : les diviseurs de puissances en CP :

Le diviseur de puissance en jonction T est un simple réseau à trois ports qui peut être utilisé pour la division ou la combinaison de puissance.

Après de nombreuses recherches sur les diviseurs à base de cristaux photoniques, des travaux ont déjà été réalisés. Par conséquent, nous nous sommes inspirés de ce travail pour étudier nos problèmes en termes de méthodes et de résultats de simulation obtenus, et enfin pour tirer quelques idées utiles pour la conception de séparateurs d'énergie à base de cristaux photoniques 2D avec un type triangulaire

Dans un premier temps, nous avons découvert une étude comparative entre la jonction T et la jonction Y sur les diviseurs 1×2 et 1×4 par la méthode FDTD-2D



(a)



(b)

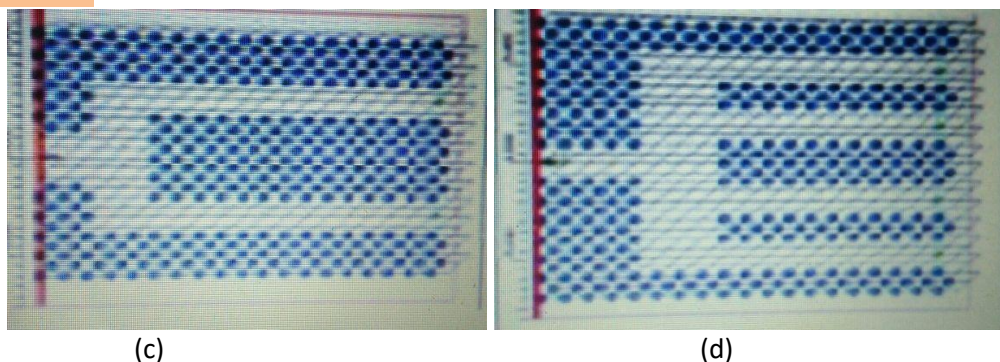


Figure 2.10: structure d'un diviseur : (a) 1x2 avec une jonction Y, (b) 1x4 avec une jonction Y, (c) 1x2 avec une jonction T, (d) 1x4 avec une jonction T.

Après optimisation, les paramètres géométriques des quatre structures sont les suivantes: la constante de réseau $a = 0.435 \mu\text{m}$, le rayon de trous du cristal photonique $R = 0,128 \mu\text{m}$, le diamètre du port d'entrée optimisé $D = 1,02 \mu\text{m}$. Les résultats de simulation des diviseurs optimisés sont prélevés uniquement sur la longueur d'onde $\lambda_1 = 1,55 \mu\text{m}$ (mode TE).

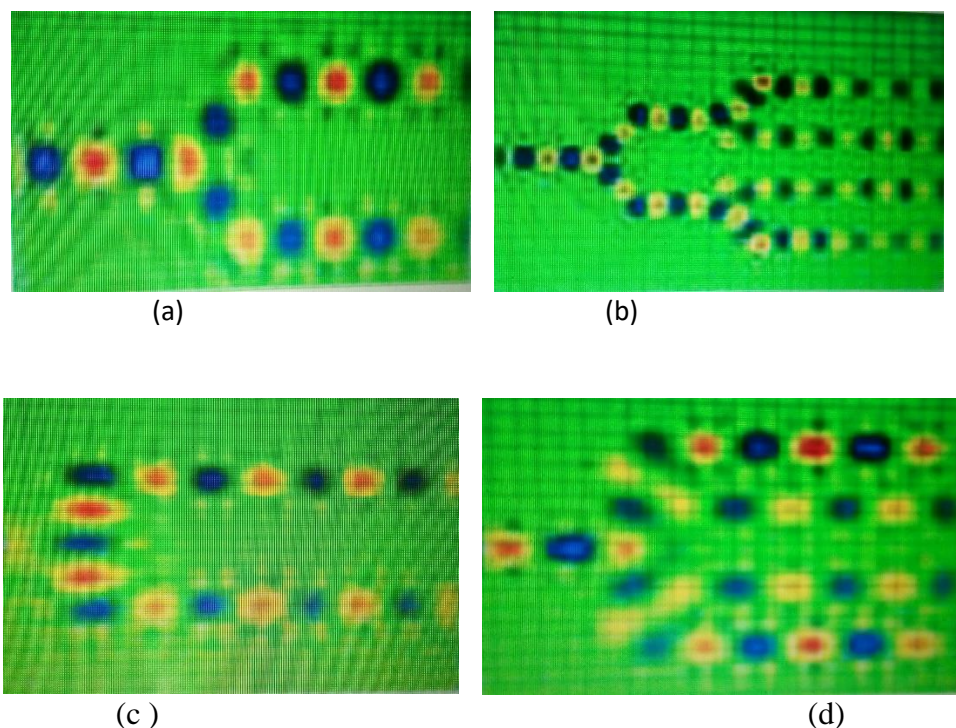


Figure 2.11: Répartition du champ magnétique Hz : (a) diviseur en Y (1x2), (b) diviseur en Y (1x4), (c) diviseur en T (1x2), (d) diviseur en T (1x4).

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

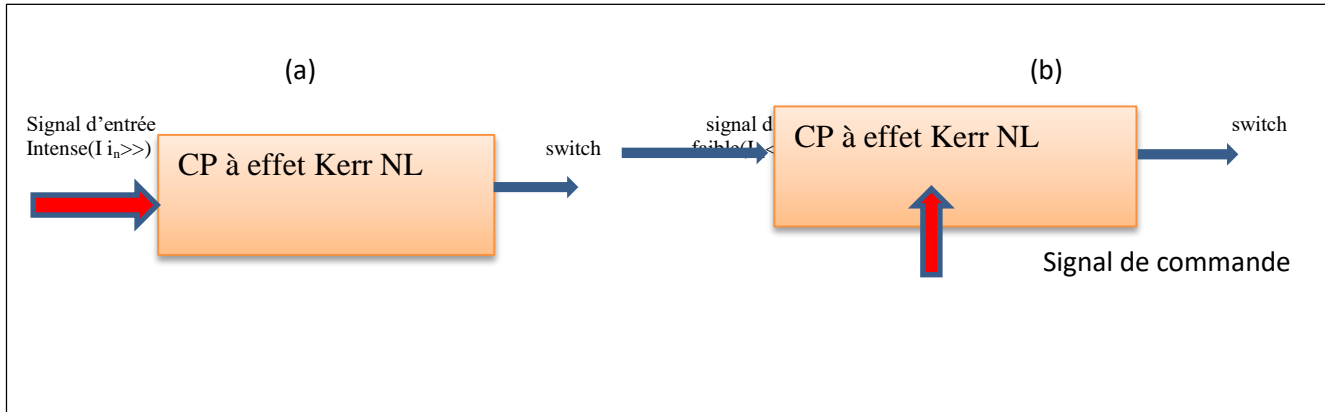
Pour la jonction en Y, les résultats sont nettement mieux par rapport à la jonction en T. En effet la somme des intensités à la sortie des ports a atteint les 100% pour le diviseur (1x2) et 86% pour le diviseur (1x4)[67].

2.4.4. Commutation optique :

Chapitre 2

D'une manière générale, la commutation tout optique dans les cristaux photoniques non-linéaire peut être classée en 2 catégories [67]

Pour la première, la commutation exploite la non-linéarité du matériau en contrôlant l'intensité du signal d'entrée, c'est une sorte d'auto commutation où l'impulsion d'entrée déclenchera la commutation optique par elle-même. Pour la seconde catégorie, la non-linéarité est exploitée par l'excitation par un faisceau commande (Pompe) qui sert à déclencher la commutation optique pour le signal d'entrée qui peut maintenir un niveau d'intensité relativement faible [68]



Commutation par un signal de commande.

2.4.4.1. Mécanismes de la commutation tout optique :

Les cristaux photoniques non-linéaires fournissent de nouveaux mécanismes afin de réaliser une commutation tout optique. Dans ce qui suit, ces mécanismes utilisés seront analysés.

a. Décalage du bord de la bande interdite :

Selon la théorie fondamentale de l'électromagnétisme dans les CPs, la bande interdite dépend fortement de l'indice de réfraction des matériaux qui les composent.

Lorsque le signal se trouve juste au bord de la bande interdite, son énergie de transmission changera de façon dynamique en fonction du faisceau « pompe ». En absence du signal pompe, le signal est en bande passante avec une transmission élevée est le switch est à l'état « ON ». Dans le cas non-linéaire, en présence d'une excitation à intensité élevée, l'indice de réfraction du milieu Kerr non-linéaire augmente ce qui entraîne le décalage de la BIP vers les basses fréquences (Red shift). Le signal d'entrée se trouve dans la BIP et ne peut plus se propager dans la structure, le switch tout optique est à l'état « OFF ».

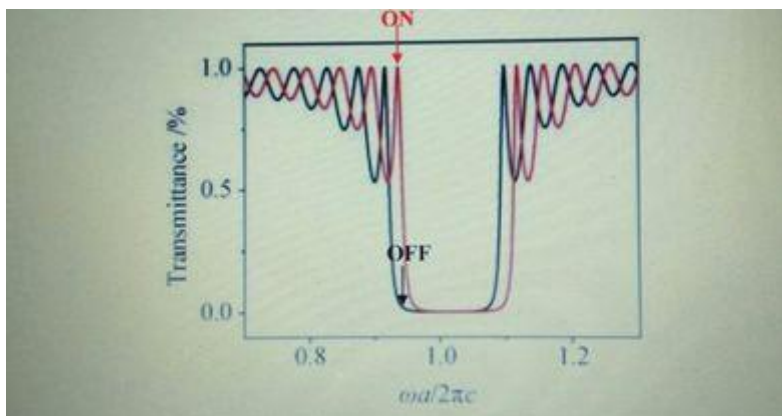


Figure2.13 : Schéma représentant une commutation optique utilisant le décalage du bord de la BIP, Les courbes rouges et noires correspondent aux spectres de transmission avant et après le signal de pompe respectivement.

b. Décalage du mode défaut :

Il existe une autre propriété, unique pour les CPs, à savoir l'existence de modes localisés de défaut qui sont facile à contrôler et à commander [69]. Lorsqu'un défaut est introduit dans une structure périodique de manière appropriée, un état de transmission élevé apparaît dans la bande interdite avec un pic de résonance étroit, et cela correspond au mode défaut.

Par une conception appropriée, le mécanisme du décalage du mode défaut peut être fait pour être beaucoup plus sensible que le décalage du bord de la bande interdite, de sorte qu'un petit changement de l'indice de réfraction peut entraîner la commutation. Cela peut être utile pour réduire la puissance de la pompe nécessaire à la commutation.

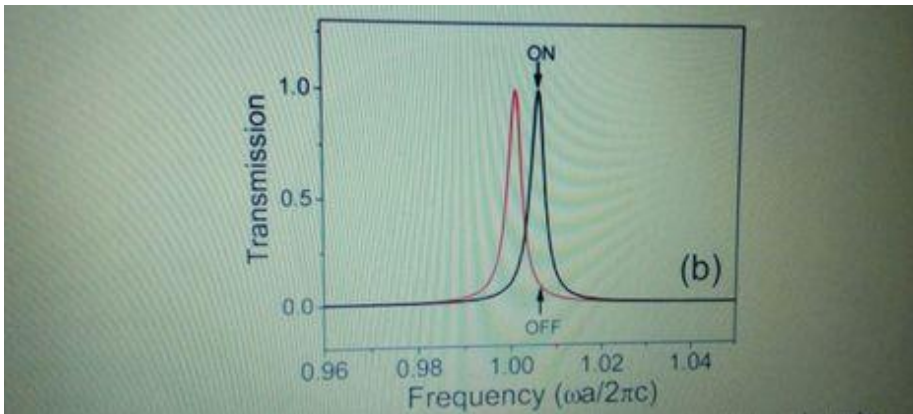


Figure2.14 : Schéma représentant une commutation optique utilisant le décalage du mode résonant. Les courbes noire et rouge correspondent aux spectres de transmission avant et après le signal de pompe, respectivement.

c. La bistabilité optique :

La bistabilité optique est un effet important pour de nombreux composants tout-optiques. Lorsque cet effet est combiné à des cristaux photoniques, il présente des perspectives prometteuses pour la commutation tout optique. Un système à bistabilité optique possède deux états de transmissions résonnants et stables, dépendant de l'entrée et de l'état antérieur, et cette caractéristique peut être utilisée pour servir à la commutation optique, qui appartient essentiellement à la catégorie de systèmes à auto-commutation. Deux facteurs devraient être satisfaits dans un système non-linéaire bistable :

- Une interaction non-linéaire entre le matériau et le signal d'entrée.
- Le procédé de rétroaction.

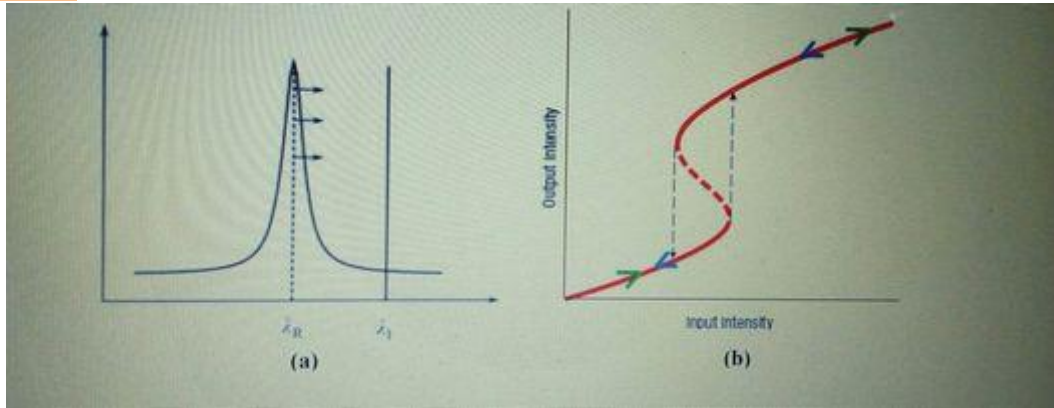


Figure 2.15 : (a) Principe de la bistabilité optique, (b) Courbe de bistabilité optique, représentée par une boucle d'hystérésis qui lie deux états d'équilibre, qui fonctionnent aux intensités inférieure et élevée. la courbe à tiret correspond à un mode instable du système.

La condition de résonance du système est : [70]

$$(n_0 + n_2)I = k\lambda_R \quad (2.3)$$

Où : n_0 est l'indice de réfraction linéaire, I : intensité local de la lumière, et k est un entier.

2.4.5. les portes logiques :

Les portes logiques optiques sont des composants essentiels requis pour le traitement du signal optique et les réseaux de communication optiques. Saidani et al. Une porte logique multifonctionnelle a été proposée dans la structure de guide d'ondes des ordinateurs 2D en utilisant le concept d'interférence multimode. En commutant le signal optique sur différents guides d'ondes d'entrée, différentes fonctions telles que les portes XOR, OR, NOR et NOT ont été obtenues. Une porte NOR entièrement optique a été proposée par Isfahani et al.

Avec nous avons utilisé le PCRR présenté pour réaliser la logique de porte pour les fonctions OU et XOR, et il est présenté en étudiant la distribution électrique du cristal photonique 2D du signal lumineux de $1,553 \mu\text{m}$ [71].

2.4.5.1 .OU Porte :

La structure de grille OU proposée est formée de deux guides d'ondes et de deux résonateurs en anneau avec une résolution de 38 tiges horizontalement et de 23 tiges verticalement. Deux guides d'ondes optiques symétriques, AY et BY, sont formés le long de la direction Γ -M en supprimant deux rangées de tiges de GaAs, et deux résonateurs en anneau sont placés entre eux. L'indice de réfraction, le rayon et la constante de réseau de la structure sont les mêmes que ceux de la structure PRCC. Le schéma final de notre structure de porte OU proposée est montré [71].

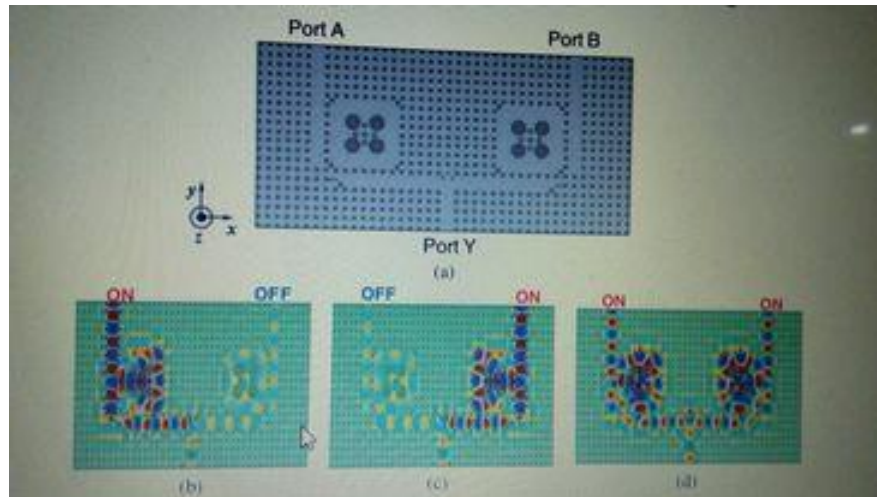


Figure 2.16. (a) OR structure de porte. (b) $1 \text{ OR } 0 = 1$. (c) $0 \text{ OR } 1 = 1$. (d) $1 \text{ OR } 1 = 1$. The OR les paramètres de la structure de la porte sont définis tels que: $n = 3.28$, $r = 0.188 \times a$ and $a = 640 \text{ nm}$.

Le fonctionnement de la porte logique OU tout optique est présenté en étudiant la distribution du champ électrique du cristal photonique 2D pour le signal lumineux de $1,553 \mu\text{m}$, et les résultats calculés sont présentés sur la figure 44. Si un signal est injecté dans le port d'entrée A, alors le signal lumineux peut être transmis à travers le guide d'ondes optique AY et être émis depuis le port Y, comme illustré sur la figure 44(b). Si un seul faisceau est injecté dans le port d'entrée B, alors le signal lumineux peut être transmis à travers le guide d'ondes optique BY et être sorti du port Y, comme illustré sur la figure 44(c). Si deux faisceaux sont injectés dans les ports d'entrée A et B simultanément, alors le signal la lumière peut être transmise à travers les guides d'ondes optiques AY et BY, comme illustré sur la figure 44(d). Ainsi, une porte logique OU tout optique peut être réalisée très facilement

2.4.5.2. Porte XOR :

Pour étudier la fonction de porte logique XOR tout optique, la même structure que la structure photonique 2D de la porte OU est utilisé en ajoutant une colonne de tiges après le premier résonateur annulaire et est présenté sur la Fig.45. L'optique

Le fonctionnement de la porte logique XOR est présenté en étudiant la distribution du champ électrique du dispositif PCRR 2D pour une longueur d'onde particulière = $1,553 \mu\text{m}$.

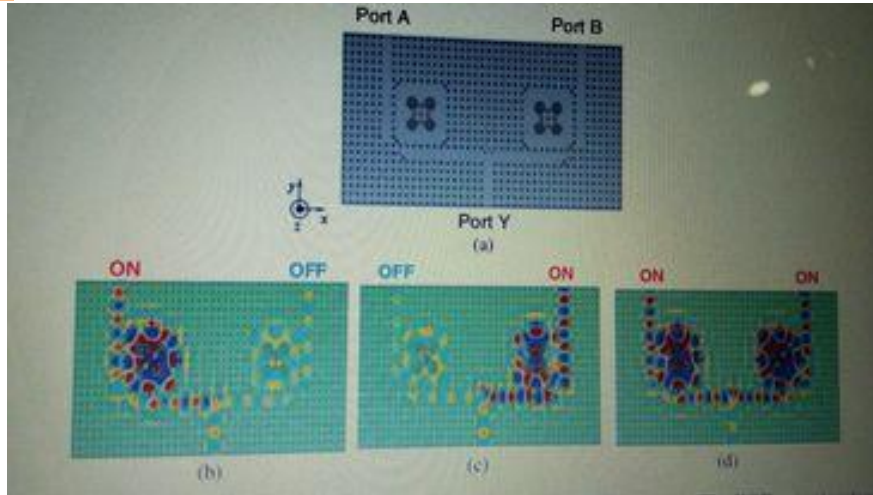


Figure 2.17: (a) XOR structure de porte. (b) $1 \oplus 0 = 1$. (c) $0 \oplus 1 = 1$. (d) $1 \oplus 1 = 0$. The XOR les paramètres de la structure de la porte sont définis tels que : $n = 3.28$, $r = 0.188 \times a$ and $a = 640$ nm.

Tout d'abord, nous insérons un signal lumineux dans le seul port A du guide d'ondes d'entrée. Une grande partie de ce signal se déplace vers le port Y à travers le guide d'onde du résonateur en anneau. Ceci est identifié comme le phénomène logique « 1 0 donne 1 », et cela est illustré à la figure 45(b).

Une situation similaire se produit, lorsque le signal est incident sur le port B uniquement, et nous obtenons une sortie en tant que 1. Cela correspond à l'opération logique « 0 1 donne 1 » comme le montre la figure 45(c).

Lorsque les signaux transmis aux ports d'entrée A et B simultanément, une différence de phase se produit entre ces deux signaux en raison de la différence de chemin, et nous obtenons une interférence destructive. À la suite de cela, il est approximativement nulle en sortie sur le port Y. Cela correspond à l'opération logique « 1 1 donne 0 » comme illustré à la figure 45(d). Lorsque les deux signaux d'entrée sont identiques ("0", "0" ou "1", "1"), la sortie de la porte XOR est zéro "0", et lorsqu'ils sont différents ("0", "1" ou "1", "0"), la sortie est un "1".

2.5. conclusion :

dans ce chapitre nous avons étudié le principe de fonctionnement de filtre add-drop et quelques applications de filtre en cristaux photoniques : le filtrage, le diviseur de puissance, la communication optique et le démultiplexage en longueur d'onde de 16 canaux autour de 1.31 et 1.5 μm basé sur un résonateur en anneau quasi-carré et par combinaison de deux résonateurs en anneau nous avons proposé des portes OU et XOR.

Chapitre 3

Résultats et Interprétations

3.1.introduction :

Les cristaux photoniques (PhC) sont une nouvelle classe de supports optiques représentés par des structures naturelles ou artificielles avec des modulations de l'indice de réfraction. De tels supports optiques ont des propriétés particulières qui permettent de mettre en œuvre un certain nombre d'applications sur leur base. Au cours des dernières années, une grande attention a été accordée aux cristaux photoniques bidimensionnels (2D). Ces cristaux ont de nombreuses applications potentielles en raison de leur capacité à contrôler la propagation des ondes lumineuses et parce que les guides d'ondes optiques à base de PhC peuvent être intégrés dans des circuits optiques. La périodicité est rompue par l'introduction de quelques défauts dans les cristaux. Il a été montré que les PhC dopés permettent de guider des ondes dans deux chemins géométriques différents pour deux gammes de longueurs d'onde distinctes [72]. De telles structures peuvent être utilisées pour concevoir de nouveaux dispositifs optiques hautement efficaces. Des guides d'ondes optiques dans des PhC bidimensionnels (2D) produits par insertion de défauts linéaires dans des structures PhC avaient été proposés [73-74].

Par exemple, il a été démontré dans les PhCs l'interdiction des modes de propagation à certaines régions de fréquence (la bande interdite photonique), l'inhibition de l'émission spontanée et la localisation des ondes EM dans les cavités [75-76]. Il pourrait très bien être possible de créer des circuits intégrés photoniques (PIC) à grande échelle basés sur PhCs pour améliorer les performances et la rentabilité des systèmes photoniques. Un PhCW est construit en introduisant un défaut de ligne dans un PhC parfait pour créer des modes de défaut dans la bande interdite photonique ; ainsi, l'onde EM se propageant dans le PhCW est guidée par la bande interdite, au lieu d'être guidée par indice comme dans les guides d'ondes traditionnels. Les PCW ont diverses caractéristiques inégalées telles qu'une vitesse de groupe extrêmement lente et une perte nulle dans les virages serrés. De nombreux dispositifs photoniques compacts basés sur des PhCW ont été proposés, par exemple des coudes, des séparateurs, des démultiplexeurs et des coupleurs [77-78].

L'un des éléments clés des dispositifs optiques intégrés recevant une grande attention est un filtre résonant car ils peuvent agir comme un démultiplexeur pour sélectionner un canal particulier ou plusieurs canaux dans le système de communication DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexed). De nombreux articles ont étudié différents types de filtres afin d'améliorer ses caractéristiques de transmission [79-80].

Dans cet article, nous présentons différentes stratégies de conception, que nous avons utilisées pour améliorer les performances de divers filtres résonants. Les propriétés de ces structures PhC sont étudiées numériquement en utilisant la méthode du domaine temporel aux différences finies bidimensionnelles (FDTD).

3.2.Présentation de logiciel COMSOL Multiphysics :

Le logiciel COMSOL Multiphysics est créé en 1986 par l'entreprise « COMSOL », qui est spécialisé dans le domaine de développement de logiciel de support technique et de formation spécialisé et conseil, Ce logiciel est utilisé par plusieurs grandes entreprises à travers le monde puisqu'il permet de simuler de nombreuses applications en ingénierie, et tout particulièrement les phénomènes Couplés ou simulation multi-physiques[81].

COMSOL Multiphysics est un logiciel d'analyse structurelle, de résolution et de simulation par éléments finis permet de simuler de nombreux problèmes de physique et de l'ingénierie tels que: mécanique des Structures, électromagnétisme haute et basse Fréquence, écoulement, transfert de Chaleur, réactions chimiques, optique, acoustique et plus encore, en particulier les phénomènes couplés ou multi physiques.

COMSOL Multiphysics est un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis. Un élément fini est la donnée d'une cellule élémentaire et de fonctions de base

de l'espace d'approximation dont le support est l'élément, et définies de manière à être interpolantes.

Le logiciel COMSOL est un des simulateurs les plus utilisés par les chercheurs afin de simuler les phénomènes liés aux matériaux et les différentes techniques utilisées pour la technologie de la photolithographie.

Le logiciel COMSOL version 5.4a est utilisé pour la simulation des phénomènes liés aux matériaux, ainsi que pour la technologie de la photolithographie[81].

3.3. Etude des structures bidimensionnelles sans défaut :

Nous avons consacré ce paragraphe à étudier les structures bidimensionnelles déconnectées planaires CPs-2D sans défaut dans un réseau carré de tiges diélectriques en GaAs plongées dans l'air.

cette structure fait 20 rangés de longueur et 15 rangés de large.

Cette structure de CP a été excitée à l'entrée en polarisation TE.

($X=20$ tiges et $Y=15$ tiges).

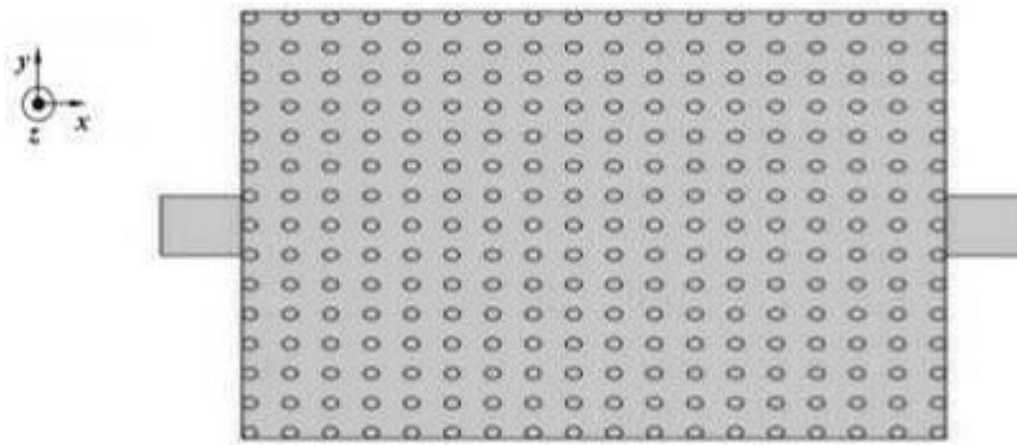


Figure3.1 : Structure déconnectée sans défaut.

Sur la figure 3.1, on donne la répartition de champ électrique E_z dans le CP. On remarque qu'il y a une réflexion totale à l'entrée de notre structure. Ceci démontre clairement l'absence du phénomène de guidage dans la structure sans défaut.

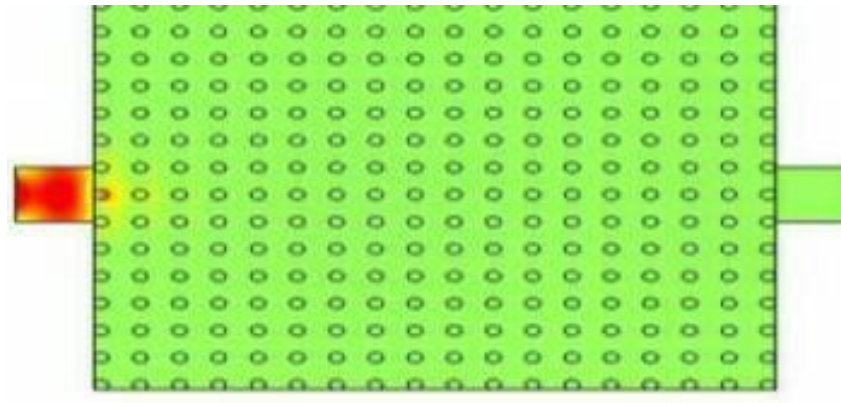


Figure 3.2 : La propagation de champ électrique E_z dans la structure sans défaut.

Le résultat de la simulation sous logiciel Comsol permet de tracer les spectres de transmission et de réflexion présentés sur la figure 3.3.

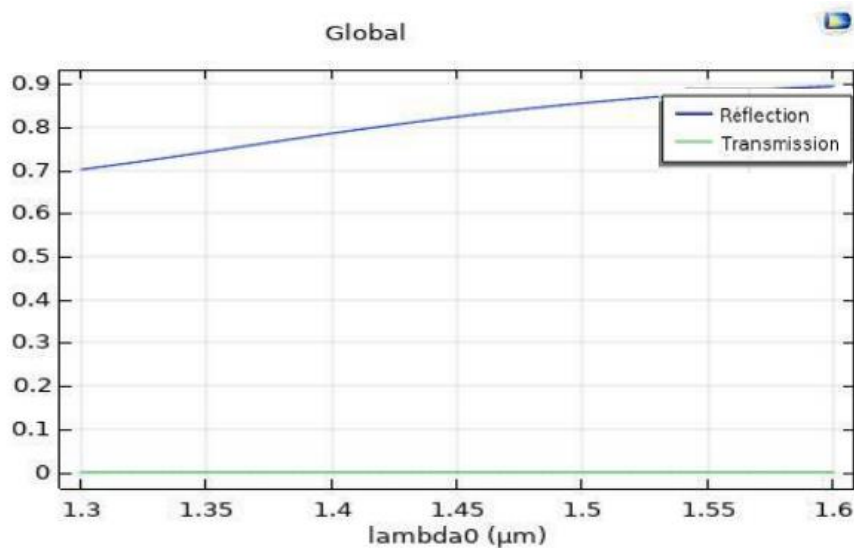


Figure 3.3 : Réponse spectrale de transmission et de réflexion dans une structure sans défaut.

Il apparaît bien que la structure CP sans défaut présente un coefficient de transmission nul s'étalant sur la bande de longueur d'onde $[1.3-1.6] \mu\text{m}$. Par contre, la réflexion est croissante sur le même intervalle de longueur d'onde. Absence du phénomène de guidage.

3.4. Etude d'une structure bidimensionnelle carré avec défaut :

La fonction de guidage repose essentiellement sur l'idée d'introduction du défaut linéique qui consiste à enlever une rangée ou plus dans le cristal photonique d'un réseau triangulaire ou carré de tiges diélectrique à base de GaAs plongées dans l'air, donc la périodicité du cristal photonique est rompue et une direction privilégiée de la lumière est imposée c'est celle du guide.

3.4.1. Conception du guide:

Comme il représentée sur la figure ci-dessous (figure 3.4), en introduisant un défaut linéaire (omission d'une rangée de motifs élémentaires) du CP, nous obtenons la structure CP-2D du guide ainsi la lumière sera guidée selon la direction de défaut.

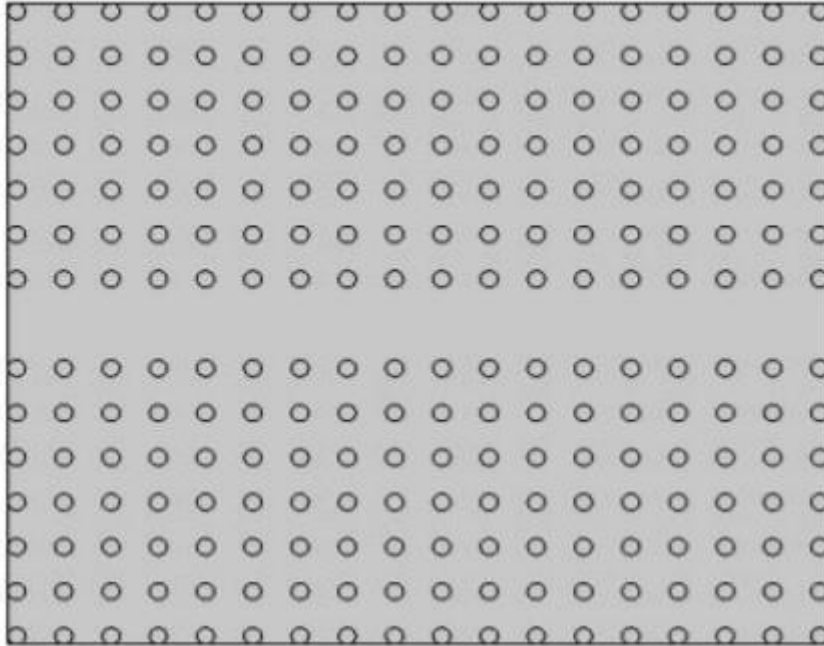


Figure3.4 :La structure du cristal photonique formée par un réseau carré, avec un défaut de ligne.

Sur la figure 3.5,nous reportons la distribution spatio-temporelle du champ électrique à l'intérieur du guide. Nous constatons clairement que la lumière se propage à travers le défaut linéaire. La lumière est parfaitement guidée dans le guide d'onde.

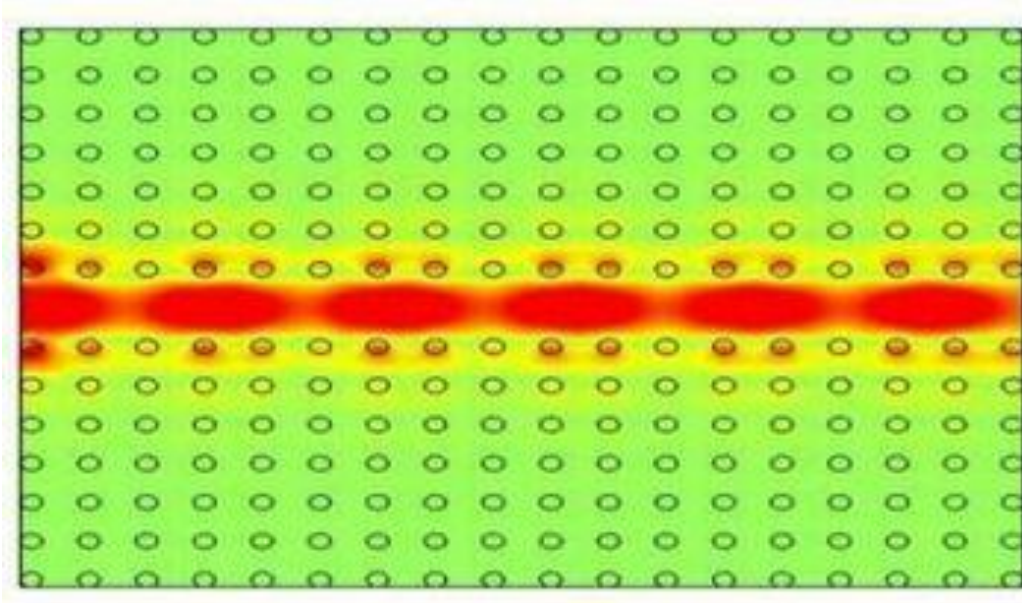


Figure 3.5 :Répartition du champ électrique E_z d'un guide d'onde.

La figure 3.6 illustre les résultats de la simulation obtenus en termes des coefficients de transmission d'un guide d'onde à base d'un CP-2D. Le spectre simulé est dans l'intervalle de longueur $[1.2, 1.8] \mu\text{m}$.

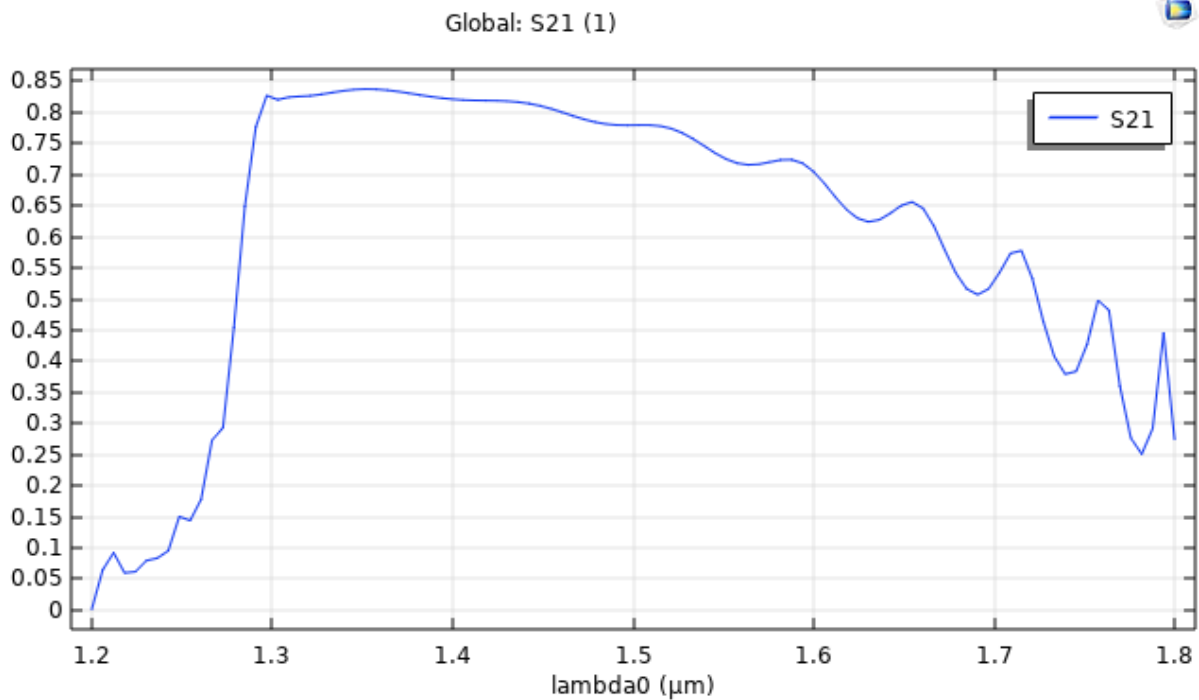


Figure 3.6 : La réponse spectrale en transmission du guide.

On remarque que la réponse spectrale atteint son maximum au niveau de l'ordre de 84% pour une longueur d'onde de 1.351 μm . Ce maximum résulte l'apparition d'un mode guidé sans pertes qui existe à cette longueur d'onde. Donc on peut confirmer que l'introduction des défauts engendre l'ouverture d'une bande de fréquence autorisée à l'intérieur de la bande interdite photonique.

La figure 3.7 représente les répartitions spatiales temporelles du champ électrique E_z du guide en structure carrée, où on remarque clairement la propagation de l'onde électromagnétique injectée à l'entrée de la structure et l'apparition du phénomène de guidage de la lumière qui suit le défaut linéique formé :

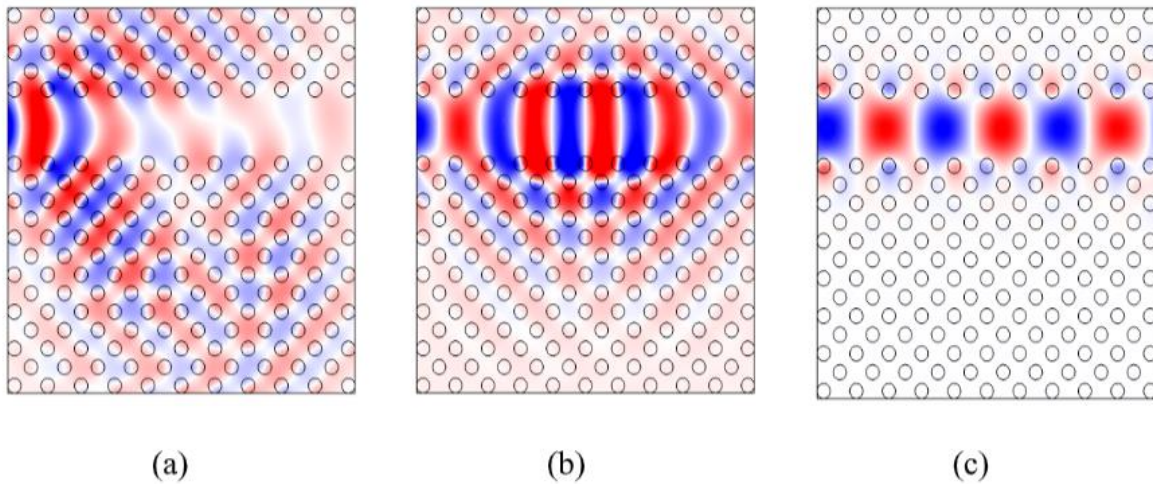


Figure 3.7 : Répartition du champ électrique E_z d'un guide d'onde à base d'un CP-2D déconnecté à maille carré pour différentes longueurs d'ondes en mode TE : (a) pour $\lambda=1.299 \mu\text{m}$ et (b) pour $\lambda= 1.35 \mu\text{m}$. (c) pour $\lambda= 1.55 \mu\text{m}$.

3.5. Simulation d'un filtre en anneau :

3.5.1. Conception d'un filtre Channel drop à base de CPs avec un seul résonateur (PCRR) : système à trois ports autour de $1.5 \mu\text{m}$:

L'étude est sur un filtre chanel drop, avec 15 rangées de longueur et 15 rangées de largeur. Cette structure comporte : un résonateur en anneau qui est l'élément de couplage avec deux guides d'onde (un guide drop et un guide bus).

Il est composé de trois ports :

Les ports 1 et 2 sont les terminaux de sortie du guide bus, et le port 3 est le terminal du guide drop

Les paramètres sont toujours : $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ Le rayon $r = 0,11 \mu\text{m}$; Le déplacement $a = 0.56 \mu\text{m}$, par la

suite, La fréquence normalisée vaut : $a/\lambda = 0.361 \mu\text{m}$.

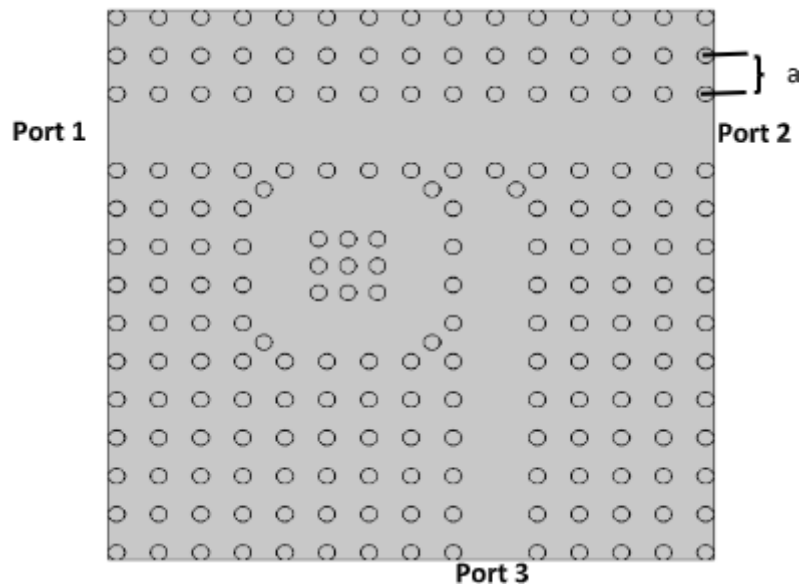


Figure 3.8 : Représentation schématique du filtre.

Les spectres de la transmission normalisée du filtre ont été obtenus à l'aide du simulateur COMSOL Multiphysics comme est montré sur la figure 3.9.

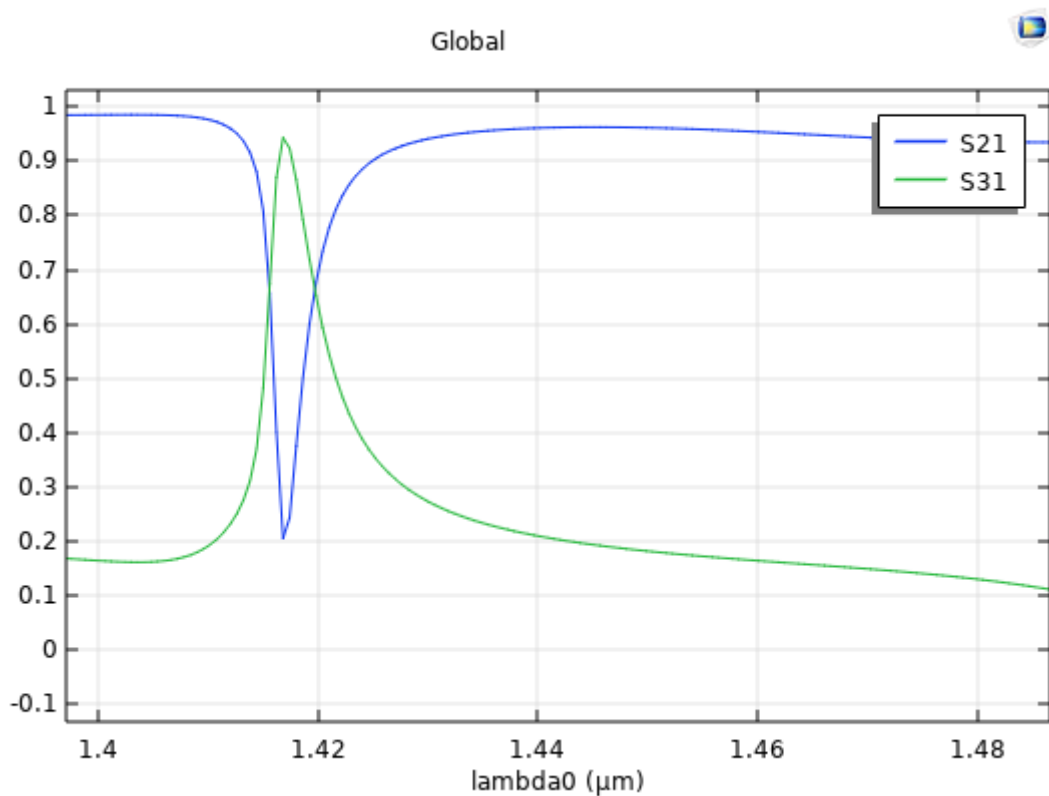


Figure 3.9 : Représentation de la réponse spectrale en transmission dans la bande [1.4-1.48] μm .

Notre but est d'adapter le filtre autour de $1.55 \mu\text{m}$. Cela se fait en utilisant la fonction « Scale » sur le logiciel COMSOL, et d'augmenter le facteur de qualité, afin de décaler le pic vers la longueur d'onde désirée (vers la droite). Après redimensionnements, on obtient le résultat suivant :

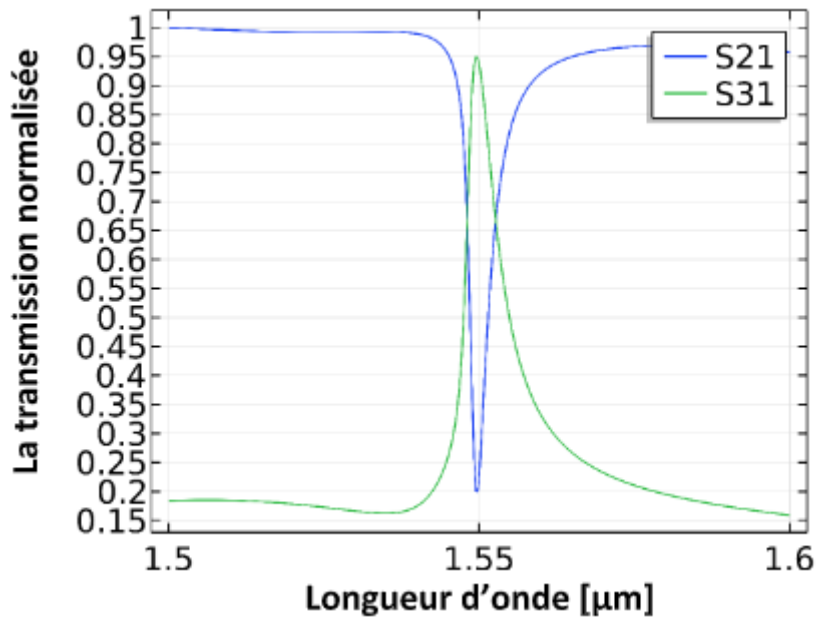


Figure 3.10: La réponse spectrale après redimensionnements entre $[1.54-1.56] \mu\text{m}$.

On remarque bien que l'efficacité de notre structure est élevée, qui atteint les 95% pour le port 3 et 20 % pour le port 2 autour de la longueur d'onde $1.55 \mu\text{m}$.

Sur la figure 3.11 nous schématisons la distribution spatiale de la composante E_z du champ électromagnétique.

Nous remarquons qu'il y a un transfert de la lumière vers le port 3, le signal est complètement extrait du guide d'onde bus et transféré ensuite au guide d'onde drop via le résonateur.

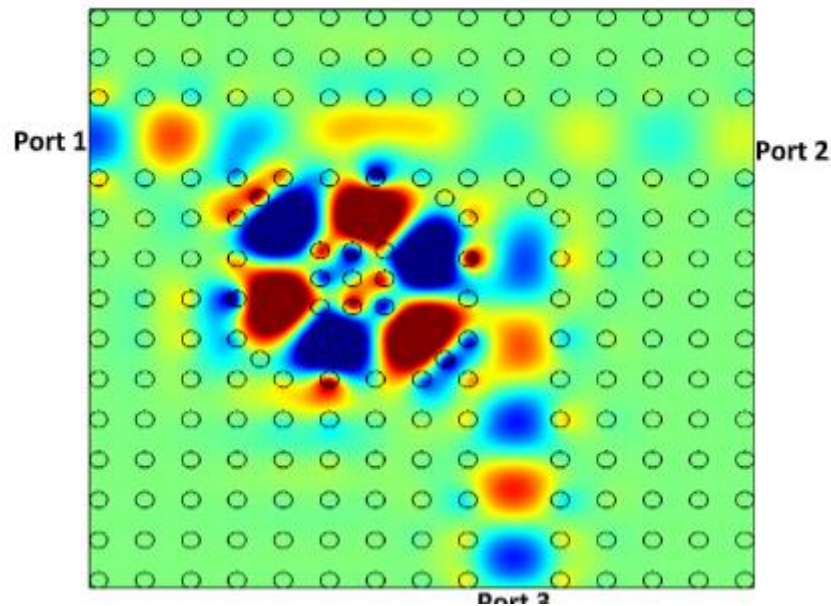


Figure 3.11 : Répartition de champ électrique E_z dans un filtre en anneau proposé.

La longueur d'onde de résonance est de $1.55 \mu\text{m}$ ($\lambda_r = 1.55 \mu\text{m}$)

* L'efficacité de transmission est de 95%

* La largeur de bande : $\Delta\lambda = 7.3 \text{ nm}$

* Le facteur de qualité : $Q = \lambda_r / \Delta\lambda = 1.55 \times 10^3 / 7.3 = 212.32$

3.6. Conclusion :

L'objectif principale de ce chapitre était la conception des filtres à base des cristaux photoniques bidimensionnels.

Nous avons présenté les résultats de simulation à travers le logiciel COMSOL des différents composants optiques à base de CP-2D déconnecté planaires gravées sur GaAs.

En premier lieu, nous avons réalisé des guides d'onde, puis nous avons conclu que l'introduction de défauts étendus assure un bon guidage de la lumière au sein de ses structures.

Dans la seconde partie du chapitre, nous avons proposé des filtres Channel drop à base de CP-2D avec un seul résonateur en anneau adapté autour de $1.55 \mu\text{m}$ qui est la longueur d'onde désirée.

Conclusion générale

Conclusion

Les cristaux photoniques (CPs) sont des structures artificielles ou naturelles, diélectriques, semi-conducteurs ou métallo-diélectriques dont l'indice de réfraction est modulé de façon périodique à l'échelle de la longueur d'onde, selon plusieurs directions de l'espace avec un contraste d'indice suffisamment élevé, ce qui affectent la propagation des ondes électromagnétiques à l'intérieur de la structure.

Du fait de cette périodicité, les CPs présentent une propriété optique unique : la bande interdite photonique(BIP).

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

Au cours de ce travail, nous avons cherché à concevoir quelques éléments qui trouveraient leur place dans un circuit intégré optique, tels que le filtre ultra sélectif à hauts facteur de qualité à base de CPs-2D. Le but est d'extraire l'onde ultra courte (1.55 μm) utilisée dans la Télécommunication par fibre optique. Notre simulation est effectuée sur la base de la méthode des éléments finies temporelles en utilisant le simulateur commercial Comsol Multiphysics qui nous a permis de nous donner les réponses spectrales en termes de transmission et de réflexion, et de calculer les composantes du champs électriques.

Notre étude a été composée de trois chapitres :

Nous avons commencé notre premier chapitre par des concepts généraux de base des cristaux photoniques dans le domaine d'optique linéaire photoniques et plus particulièrement les notions de bande interdite photonique et de diagramme de bande ainsi que les défauts dans les CP-2D suivis par quelques applications des cristaux bidimensionnels dans lesquelles sont utilisées les structures périodiques tels que : les démux, les filtres add drop...etc.

Le second chapitre, était dédié au principe de fonctionnement des filtres à base des cristaux photoniques et donné des notions sur le démultiplexage.

Nous avons aussi donné comme applications : Filtre Add-Drop à base de PCRR à anneau unique, . Filtre Channel drop en forme de T à base de PCRR et Démultiplexeur

Le dernier chapitre a été consacré à la simulation et la réalisation des structures à cristaux photonique bidimensionnels sans défauts et avec défaut, comme les guides d'ondes à mailles carré Les réponses spectrales en transmission et en réflexion Nous avons conçu des filtres et des avec des paramètres géométriques différentes afin d'examiner la performance de ces derniers et nos résultats étaient satisfaisants et avec des facteurs de qualité élevés pour les deux longueurs d'ondes étudiées.

Ce mémoire reste une étude préliminaire à compléter et à améliorer ses résultats par d'autres simulations dans le proche futur.

Donc dans le prolongement de ce travail, nous proposons améliorer les résultats obtenus surtout pour les deux dernières topologies de filtre sélectif en choisissant les bonnes valeurs de paramètres physiques et géométriques des tiges diélectriques qui constituent les structure CPs2D utilisée pour la conception des filtres sélectifs Ceci ne sera possible qu'après une analyse rigoureuse de la carte de bande interdite de la structure déconnectée du GaAs.

En conclusion, au-delà des nombreux résultats présentés dans ce mémoire ont permis de mieux capturer de large gamme des possibilités offertes par l'exploitation des cristaux photoniques pour contrôler la lumière et par suite réaliser plusieurs fonctions selon les besoins de l'utilisateur.

Références

Références bibliographiques

- [1] : mémoire Charles CAËR (https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00954411/file/VA2_CAER_CHARLES_16092013.pdf).
- [2] :E. Yablonovitch (1987), "Inhabited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Électroniques" (PDF), Physical Review Letters 58 (20): 2059–2062, Bib code 1987PhRvL..58.2059Y.
- [3] : S. John (1987), "Strong localisation of photons in certain disordered diélectriques superlattices" (PDF), Physical Review lettres 58 (23): 2486–2489, Bib code, 1987PhRvL..58.2486J, doi:10.1103/PhysRevLett.58.2486.
- [4] : J. W. S. Rayleigh (1888), "On the remarquable phénomène of Crystal line réflexion described by Prof. Stokes" (PDF), Phil.Mag 26: 256–265.
- [5] : E. Yablonovitch, T.J. Gmitter, K.M. Leung, E; Gmitter, TJ; Leung, KM (1991), "Photonic band structure: the face-centered-cubic case employing nonspherical atoms" (PDF), Physical Review Letters 67 (17): 2295–2298, Bibcode 1991PhRvL..67.2295Y, doi:10.1103/PhysRevLett.67.2295.
- [6] : : « LES NANOSTRUCTURESPOUR CRÉER DE LA COULEUR » un art inspiré par la nature
Extrait de Photoniques, hors-série Année internationale de la Lumière (2015)
D’après les travaux de Philip BALL
auteur de Naturels colores tricks
(Sci. Am. 306, 74-79, 2012).
- [7] : J.D.Joannopoulos. Nature 414(6861), 257–258(2001).
- [8] : L. Rayleigh. On the maintenance of vibrations by forces of double fréquence, andon the propagation of waves through a medium endowed with a periodic structure. Philosophical Magazine, 24(147) :145–159, 1887.
- [9] : MASSY, Sandrine, «Contribution à la réalisation de fonctions optiques à base de cristaux photoniques sur LiNbO₃,» thèse de doctorat,Université de LIMOGES, 2004.
- [10] : R. Zengerle. Light propagation in singly and doubly periodic planar waveguides. Journal of Modern Optis, 34 :1589–1617, 1987.
- [11] : E. Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics. Phys. Rev. Lett., 58 :2059–62, 1987.
- [12] : S. John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices. Phys. Rev. Lett., 58 :2486–9, 1987.
- [13] : <https://onshr.nrme.net>.
- [14] : V. VIGNERAS, H. ROUSSEL, J.P. PARNEIX, W. TABBARA, «Modélisation et mesure de la réponse électromagnétique de structures BIP bidimensionnelles,» JNM 2001 Poitiers, 16-18 mai 2001.
- [15] : Yablonovitch, T. J. Gmitter et K.M. Leung,, «Photonic band structure: the facecentered-Cubic case employing non-spherical atoms,» Physical Review Letters, vol. 67, n° %12259-2298, p. 17, 1991.
- [16] : Ahlem.BENMERKHI<> ,thèse de doctorat, université mentouri – Constantine , mai 2012
- [17] :thèse << Etude et Simulation de la Propagation des Ondes Electromagnétiques dans les guides à Cristaux Photoniques-Application aux Fibres Optiques>>, Benaïssa Fatima, UNIVERSITE ABOU-BAKR BELKAÏD – TLEMCEM 2012-2013
- [18] : Wikipédia.
- [19] : Barbara WILD « Etude expérimentale des propriétés optiques des cristaux photoniques bidimensionnels et de leur accordabilité », Thèse de doctorat, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (2006).

Références

- [20]: Stage du Master 2 « Nouvelles structures a bande interdite photonique pour applications antennaires » Dave Stewart.
- [21] : Yassine Benachour << Optimisation de cristaux photoniques pour l'optique non linéaire>> Université de Paris Sud 11, avril 2008.
- [22] : j.m.lourtioz,d.mayster,h.benisty,v.berger,j.m.grerard,a. Techelnkov «les cristaux photonique ou la lumière en cage», GET et lavoisier, Paris,2003.
- [23] : A. Taflove et S. C. Hagness, Computational Electrodynamics : The Finite-Difference Time-Domain Method, deuxième édition, Artech House, Norwood, (2000).
- [24] C. T. Chan, Q. L. Yu et K. M. Ho, Order N spectral method for electromagnetic waves, Physical Review B 51, p. 16635 (1995).
- [25] G. Mur, Absorbing boundary conditions for the finite-difference approximation of the time-domain electromagnetic field equations, IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility 23, p. 377 (1981).
- [26] J.-P. Berenger, A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves, Journal of Computational Physics 114, p. 185 (1994).
- [27] : P. Yeh, Optical Waves in Layered Media (Wiley, New York, 1988).
- [28] : J. B. Pendry, Calculating photonic band structure, Journal of Physics : Condensed Matter 8, p. 1085 (1996).
- [29] J. B. Pendry, Photonic band structures, Journal of Modern Optics 41, p. 209 (1994).
- [30] : [18] D. Cassagne, Matériaux à bandes interdites photoniques, Ann. Phys. Fr. 23, n°4 (1998). Références bibliographiques 126.
- [31] : P. M. Bell, J. B. Pendry, L. Martin Moreno et A. J. Ward, A program for calculating photonic band structures and transmission coefficients of complex structures, Computer Physics Communications 85, p. 306 (1995).
- [32] :F. Fernandez and Y Lu. Microwave and optical waveguide analysis by the Finite Element Method. Research studies press Ltd (1996).
- [33] :G. L. Maile. Three-Dimensional Analysis of Electromagnetic Problems by FiniteElement Methods. These de doctorat, université de Cambridge (1979).
- [34] :D. Maystre, Electromagnetic study of photonic band gaps, Pure and Applied Optics 3, p. 975 (1994).
- [35] : M. Nevière, E. Popov et R. Reinisch, Electromagnetic resonances in linear and nonlinear optics : Phenomenological study of grating behavior through the poles and zeros of the scattering operator, Journal of the Optical Society of America A 12, p. 513 (1995).
- [36] :M. Le Vassor d'Yerville (GES, Université Montpellier II, France), Losses of linear waveguides in photonic crystal slabs, Workshop on two-dimensional photonic crystals, Ascona, Suisse, 25-30 août 2002
- [37] : J. P. Albert, C. Jouanin, D. Cassagne et D. Bertho, Generalized Wannier function method for photonic crystals, Physical Review B 61, p. 4381 (2000).
- [38] :J.-c.Tolédano, « bases physique de la plasticité des solides»,livre, Ecole polytechnique France,11.juillet2007.
- [39] : Bouanati mohammed, Bellaredj nabil , « conception des filtres à base des cristaux photoniques bidimensionnels par l'analyse de la bip modelisation par la ftdt-2d », mémoire master, université tlemcen , Juin 2013.
- [40] : HADJ-KADDOUR Sarah, TABET-DERRAZ Radia<<Contribution à la conception des nouvelles topologies de demultiplexeurs en cristaux photoniques à plusieurs canaux pour télécommunications optiques>> université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen,le27/08/2020.
- [41] : S. Noda, K. Tomoda, N. Yamamoto, A. Chutinan Science, 289, 604-606 (2000).

- [42] : H. Benisty, J.M.Lourtioz, A. Chelnokov, S. Combrie, et X.Checoury, "Recent advances toward optical devices in semiconductor based photonic crystals," *Proceedings Of The IEEE*, vol. 94, N°5, p. 997–1023, 2006.
- [43] : Kévin Lenglé, « traitement tout optique de signal à base de composants à cristaux photoniques en matériaux semi-conducteurs », these de doctorat, université de Rennes ,19 juin 2013.
- [44] : L.Weijia, Y. Daquan, S. Guansheng , T.Huiping, J. Yuefeng, Optimization transmission.
- [45] : M. Danaie, R. Nasirifar, A. Dideban, "Design of adjustable T-shaped and Y-shaped photonic crystal power splitters for TM and TE polarizations", *Turk J Elec Eng & Comp Sci*, Vol. 25,
- [46] : M. Masruf Khan, "Nano structure based power splitter design by using 2D photonic crystals",*Journal of Modern Science and Technology*", Vol. 1, p: 176-187, 2013.
- [47] : R. A. Soref, "Silicon-based optoelectronics," *Proc. IEEE* 81, 1687-1706 (1993).
- [48] : S. Fan, P. R. Villeneuve, and J. D. Joannopoulos, "Channel drop filters in photonic crystals," *Opt. Express* 3, 4-11 (1998).
- [49] : M. Lipson, "Guiding, Modulating and Emitting Light on Silicon - Challenges and Opportunities (Invited)," *IEEE J. Lightwave Technol.* 23, 4222-4238 (2005).
- 50 : M. Notomi, A. Shinya, S. Mitsugi, E. Kuramochi, and H. Y. Ryu, "Waveguides, resonators and their coupled elements in photonic crystal slabs," *Opt. Express* 12, 1551-1561 (2004).
- [51] : B. E. Little, S. T. Chu, H. A. Haus, J. Foresi, and J. P. Laine, "Microring resonator channel dropping filters," *J. Lightwave Technol.* 15, 998-1005 (1997).
- [52] : B. E. Little, J. Foresi, G. Steinmeyer, E. R. Thoen, S. T. Chu, H. Haus, E. Ippen, L. C. Kimberling, and W. Greene, "Ultra-compact Si-SiO₂ microring resonator optical channel dropping filters," *IEEE Photon. Technol. Lett.* 10, 549-551 (1998).
- [53] : T. Barwicz, M. Popovic, P. Rakich, M. Watts, H. Haus, E. Ippen, and H. Smith, "Microring-resonatorbased add-drop filters in SiN: fabrication and analysis," *Opt. Express* 12, 1437-1442 (2004).
- [54] : B. E. Little, J. P. Laine, and S. T. Chu, "Surface-roughness-induced contradirectional coupling in ring and disk resonators," *Opt. Lett.* 22, 4-6 (1997).
- [55] : S. Noda and T. Baba, *Roadmap on Photonic Crystals*, 1st ed. (Springer, 2003).
- [56] :J. D. Joannopoulos, P. R. Villeneuve, and S. Fan, "Photonic crystals: putting a new twist on light," *Nature* 386, 143-149 (1997).
- [57] :W. Bogaerts, D. Taillaert, B. Luyssaert, P. Dumon, J. Van Campenhout, P. Bienstman, D. Van Thourhout, R. Baets, V. Wiaux, and S. Beckx, "Basic structures for photonic integrated circuits in Silicon-on-insulator," *Opt. Express* 12, 1583-1591 (2004).
- [58] : S. G. Johnson, S. Fan, P. R. Villeneuve, J. D. Joannopoulos, and L. A. Kolodziejski, "Guided modes in photonic crystal slabs," *Phys. Rev. B* 60, 5751-5758 (1999).
- [59] :Z. Zhang and M. Qiu, "Compact in-plane channel drop filter design using a single cavity with two degenerate modes in 2D photonic crystal slabs," *Opt. Express* 13, 2596-2604 (2005).
- [60] : S. McNab, N. Moll, and Y. Vlasov, "Ultra-low loss photonic integrated circuit with membrane-type photonic crystal waveguides," *Opt. Express* 11, 2927-2939 (2003).
- [61] : S.-H. Kim, H. Y. Ryu, H. G. Park, G.-H. Kim, Y.-S. Choi, and Y. H. Lee, "Two-dimensional photonic crystal hexagonal waveguide ring laser," *Appl. Phys. Lett.* 81, 2499-2501 (2002).
- [62] : V. Dinesh Kumar, T. Srinivas, A. Selvarajan, "Investigation of ring resonators in photonic crystal circuits", *Photonics and Nanostructures* 2, 199-206 (2004).

- [63] : Abdelbasset Mougara, Hadjira Badaouib, Mehadji Atrib, 16-Channels wavelength efficient demultiplexing around 1.31/1.55 μm in 2D photonic crystal slab, *optik international journal for light and electron optics* 193(2019).
- [64] : BETTOUCHE Hanane’’ Conception des filtres ultra-sélectifs hauts débits pour les systèmes DWDM’’ univ aboubekr belkaid le 4-07-2019.
- [65] : H. Alipour-Banaei, M. Jahanara, F. Mehdizadeh, “T-shaped channel drop filter based on photonic crystal ring resonator,” *Optik*, vol. 125, pp. 5348–5351, 2014.
- [66] : DRISS Imad-Eddine, badaoui hadjira’’ SIMULATION ET OPTIMISATION D’UN DIVISEUR 1X8 À BASE DE CRISTAUX PHOTONIQUES BIDIMENSIONNELS. MODELISATION PAR LA METHODE FDTD-2D’’ unpv aboubekr belkaid 2014.
- [67] : Y.Liu, F.Qin, F. Zhou, Q.Meng, D.Zhang, Z. Li, "Ultrafast optical switching in Kerr nonlinear photonic crystals", *Front. Phys. China*, Vol.5(3), p.220–244, 2010.
- [68] : Mme ouhab imane, naoum « Contribution à la conception des Switches tout optique dans les cristaux photoniques nonlinéaires », univ Djillali Liabes de Sidi- Bel-Abbes 2016-2017.
- [69] : Faraz Monifi, Mehrdad Djavid, Afshin Ghaffari, and M. S. Abrishamian, "Design of efficient photonic crystal bend and power splitter using super defects" , *Journal of the Optical Society of America B* , Vol. 25(11), pp. 1805-1810, 2008.
- [70] : Y.Liu, F.Qin et al., "Ultrafast optical switching in Kerr nonlinear photonic crystals", *Front. Phys. China*, Vol.5(3), pp.220-244, 2010.
- [71] : Lila Mokhtari, Hadjira Badaoui*, Mehadji Abri, Abdelbasset Mougara, Farah Lallam, and Bachir Rahmi ‘’ Proposal of a New Efficient OR/XOR Logic Gates and All-Optical Nonlinear Switch in 2D Photonic Crystal Lattices’’ *Progress In Electromagnetics Research C*, Vol. 106, 187–197, 2020.
- [72] : E. Centeno, and D. Felbacq, "Guiding waves with photonic crystals", *Opt Commun*, Vol. 160, 1999, pp. 57-60.
- [73] : A. Ghaffari, F. Monifi, M. Djavid and M. S. Abrishamian, "Analysis of Photonic Crystal Power Splitters with Different Configurations", *Journal of Applied Sciences*, Vol. 8, 2008, pp. 1416-1425.
- [74] :] N. Nozhat, and N. Granpayeh, "Analysis and Simulation of a Photonic Crystal Power Divider", *Journal of Applied Sciences*, Vol. 7, 2007, pp. 3576-3579.
- [75] : V. Tabatadze, Jr. A. Bijamov, D. Kakulia, G. Sapparishvili, D. Kakulia, R. Zaridze, Ch. Hafner and D. Erni, "Design and Analysis of Planar Photonic Band Gap Devices", *Int J Infrared Milli Waves*, Vol. 29, 2008, pp. 1172–1185.
- [76] : S. Olivier, H. Benisty, C. Weisbuch, C. J. M. Smith, T. F. Krauss and R. Houdré, "Coupled-mode theory and propagation losses in photonic crystal waveguides", *Optics Express*, Vol. 11, 2003, pp. 1490.
- [77] : L. Dekkiche, and R. Naoum, "Optimal Design of 90° Bend in Two Dimensional Photonic Crystal Waveguides", *Journal of Applied Sciences*, Vol. 8, 2008, pp. 2449-2455.
- [78] : L. Dekkiche, and R. Naoum, "A Novel All-Optical Switch Based on a Photonic Crystal Coupler", *Journal of Applied Sciences*, Vol. 7, 2007, pp. 3518-3523.
- [79] : C. Chao, H. Li, X. Li, K. Xu, J. Wu and J. Lin, "Band pass filters based on phase-shifted photonic crystal waveguide gratings", *Opt Express*, Vol. 15, 2007, pp. 11278-11284.
- [80] : L. Scolari, T. T. Alkeskjold and A. Bjarklev, "Tunable gaussian filter based on tapered liquid crystal photonic bandgap fibre", *Electron Lett*, Vol. 42, 2006, pp. 1270-1271.
- [81] : BENMALEK Nadra Manel, BENLADGHEM Nawal, «Conception des Démultiplexeurs en Cristaux Photoniques 2D pour les Système DWDM,» mémoire, 04 juillet 2019.

- [82] : Z. Wu, K. Xie, H. Yang, Band gap properties of two-dimensional photonic crystals with rhombic lattice, *Opt. Int. J. Light Electron Opt.* 123 (2012) 534–536 <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijleo.2011.05.020>.
- [83] : H. Alipour-Banaei, S. Serajmohammadi, F. Mehdizadeh, A. Andalib, Band gap properties of two-dimensional photonic crystal structures with rectangular lattice, *J. Opt. Commun.* 36 (2015), <http://dx.doi.org/10.1515/joc-2014-0049>.
- [84] : H. Alipour-Banaei, F. Mehdizadeh, Significant role of photonic crystal resonant cavities in WDM and DWDM communication tunable filters, *Opt. Int. J. Light Electron Opt.* 124 (2013) 2639–2644, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijleo.2012.07.029>.
- [85] : Y. Wang, D. Chen, G. Zhang, J. Wang, S. Tao, A super narrow band filter based on silicon 2D photonic crystal resonator and reflectors, *Opt. Commun.* 363 (2016) 13–20, <http://dx.doi.org/10.1016/j.optcom.2015.10.070>.
- [86] M.A. Mansouri-Birjandi, M.R. Rakhshani, A new design of tunable four-port wavelength demultiplexer by photonic crystal ring resonators, *Opt. Int. J. Light Electron Opt.* 124 (2013) 5923–5926, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijleo.2013.04.128>.
- [87] E. Centeno, B. Guizal, D. Felbacq, Multiplexing and demultiplexing with photonic crystals, *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 1 (1999) L10–L13, <http://dx.doi.org/10.1088/1464-4258/1/5/103>.
- [88] : Y. Zhang, Y. Zhang, B. Li, Optical switches and logic gates based on self-collimated beams in two-dimensional photonic crystals, *Opt. Express* 15 (2007) 9287, <http://dx.doi.org/10.1364/OE.15.009287>.
- [89] ; [21] Y.J. Jung, S. Yu, S. Koo, H. Yu, S. Han, N. Park, et al., Reconfigurable all-optical logic AND, NAND, OR, NOR, XOR and XNOR gates implemented by photonic crystal nonlinear cavities, *Conference on Lasers Electro-Optics/Pacific Rim*, Optical Society of America (2009), p. TuB4 3.
- [90] : Hadjira, ABRI née BADAOU, «étude et conception des micro composants à base des cristaux photoniques bidimensionnels,» thèse de doctorat, université de TLEMCEM, Décembre 2012.