

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث 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 : Technologie des Systèmes de Télécommunications

Par :

HADJ-KADDOUR Sarah

TABET-DERRAZ Radia

Sujet

Contribution à la conception des nouvelles topologies de démultiplexeurs en cristaux photoniques à plusieurs canaux pour télécommunications optiques

Soutenu publiquement, le 27/08/2020, devant le jury composé de :

Mme. M. MELIANI	Professeur	Univ. Tlemcen	Présidente
Mme. H. BADAOU	Maitre de conférences (A)	Univ. Tlemcen	Encadrante
Mr. B. RAHMI	Doctorant	Univ. Tlemcen	Co-Encadrant
Mr. M. ABRI	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 mes chers sœurs et frère.

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 toute ma famille, ma belle famille et mes amis. A mon binôme avec qui j'ai partagé de belles années d'études.

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.

Sarah

Dédicace

C'est grâce à Allah seul que j'ai pu achever ce travail. Je le dédie à :

A ma Chère mère et mon cher père qui mon toujours soutenue dans ma vie par leurs encouragement continue, que DIEU les garde pour moi. A mes chères frères et sœur, A mon mari, avec tous mes sentiments de respect, d'amour, de gratitude et de reconnaissance pour tous les sacrifices déployés, ainsi que leurs encouragements et leurs soutiens.

A mon binôme qui est avant tout mon amie, qui as su être présente dans tous les moments, de joie ou de malheur.

A tous mes professeurs qui m'ont formé et aidé avec leurs exigence et conseil, sans eux je ne serais pas arrivé à ce niveau. Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce Projet soit possible, je vous dis merci.

Radia

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 Maître de conférences classe A, 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 aux membres du jury pour avoir pris la peine d'examiner notre travail, à Mr. ABRI Mehadji professeur à l'Université de Tlemcen d'avoir accepté de juger ce travail en présidant le jury, ainsi que Mme. LALLAM Farah maître de conférences classe (B) à l'Université de Tlemcen pour le temps qu'elle a consacré afin d'examiner ce travail ; vous nous avez honoré d'accepter de siéger parmi notre jury de mémoire.

On voudrait aussi remercier Messieurs RAHMI Bachir et BENDALI Abdellatif, qui ont contribué à notre formation.

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 matériaux diélectriques ou métalliques artificiellement structurés dont la constante diélectrique varie périodiquement à l'échelle de la longueur d'onde selon plusieurs directions de l'espace. Ces structures sont désignées par l'appellation de cristaux photoniques à une, deux ou trois dimensions, influençant la propagation des ondes électromagnétiques à l'intérieur de la structure CP. Ces derniers possèdent une propriété optique intéressante qui est la bande interdite photonique (BIP), dont laquelle aucun mode électromagnétique ne peut se propager. C'est notamment cette propriété qui offre aux cristaux photoniques la possibilité de contrôler la propagation, sans absorption, des ondes électromagnétiques, ainsi de nouvelles perspectives dans la manipulation de la lumière.

Notre travail, consiste à concevoir de nouveaux démultiplexeurs à base de cristaux photoniques bidimensionnels à plusieurs canaux pour la télécommunication optique, en séparant les longueurs d'onde pour les applications WDM, à l'aide du logiciel COMSOL. Les performances du DEMUX conçus en termes de transmission, seront effectuées et analysées.

Mots clés : cristaux photoniques, diagramme de dispersion, PWE, la carte des bandes, filtre, DEMUX, COMSOL.

Abstract

Photonic crystals are artificially structured dielectric or metallic materials whose dielectric constant varies periodically on the wavelength scale in several directions in space. These structures are designated by the name of one, two or three dimensional photonic crystals, influencing the propagation of electromagnetic waves inside the CP structure. The latter have an interesting optical property which is the photonic band gap (BIP), which no electromagnetic mode can propagate. It is in particular this property which offers photonic crystals the possibility of controlling the propagation, without absorption, of electromagnetic waves, thus new perspectives in the manipulation of light.

Our job is to design new demultiplexers based on multi-channel two-dimensional photonic crystals for optical telecommunications, by separating the wavelengths for WDM applications, using COMSOL software. The performance of the DEMUX designed in terms of transmission will be carried out and analyzed.

Keywords : photonic crystals, scatter diagram, PWE, band map, filter, DEMUX, COMSOL.

ملخص

البلورات الضوئية عبارة عن مواد عازلة أو معدنية منظمة بشكل اصطناعي يختلف ثابت عزلها بشكل دوري على مقياس الطول الموجي في عدة اتجاهات في الفضاء. يتم تسمية هذه الهياكل باسم بلورات ضوئية أحادية أو ثنائية أو ثلاثية الأبعاد، مما يؤثر على انتشار الموجات الكهرومغناطيسية داخل بنية CP. يحتوي الأخير على خاصية بصرية مثيرة للاهتمام وهي فجوة النطاق الضوئي (BIP)، والتي لا يمكن لأي وضع كهرومغناطيسي نشرها. هذه الخاصية على وجه الخصوص هي التي توفر للبلورات الضوئية إمكانية التحكم في انتشار الموجات الكهرومغناطيسية دون امتصاص، وبالتالي منظورات جديدة في معالجة الضوء.

مهمتنا هي تصميم مضاعفات تعدد الإرسال البلورية الضوئية ثنائية الأبعاد متعددة القنوات للاتصالات البصرية، لفصل الأطوال الموجية لتطبيقات WDM، باستخدام برنامج COMSOL. سيتم تنفيذ وتحليل أداء DEMUX المصمم من حيث الإرسال.

الكلمات الرئيسية: بلورات ضوئية، مخطط مبعثر، PWE، خريطة نطاق، مرشح، DEMUX، COMSOL.

Liste des Abréviations

BIP: Bande Interdite Photonique.

CP: Cristal photonique.

n : l'indice de réfraction.

TM : Transverse magnétique.

TE : Transverse électrique.

1D : structure à une dimension.

2D : structure à deux dimensions.

3D : structure à trois dimensions.

ϵ : Permittivité.

a_1 : l'épaisseur de la couche qui constitue le miroir de Bragg de permittivité ϵ_1 .

a_2 : l'épaisseur de la couche qui constitue le miroir de Bragg de permittivité ϵ_2 .

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

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

v_i : volume occupé par ce matériau dans la cellule élémentaire du Cristal.

Λ : Volume de la cellule élémentaire du Cristal.

$w_1^k A$: Guide d'onde mono rangée.

$w_3^k A$: Guide d'onde à trois rangée

f : facteur de remplissage.

r : rayon.

λ : Longueur d'onde.

a : Période du cristal photonique.

r : Rayon du cristal photonique.

f : Facteur de remplissage.

n : Indice de réfraction.

\vec{K} : Vecteur d'onde.

V_g : Vitesse de groupe.

g : le vecteur du réseau réciproque.

\vec{E} : le champ électrique

\vec{H} : le champ magnétique.

\vec{B} : Vecteur de l'induction magnétique.

ϵ : Permittivité diélectrique.

μ : Perméabilité magnétique.

CP : Cristal Photonique.

MEB : Microscope Electronique à Balayage.

PBG: Photonic Band Gap.

PhC: Photonic Crystal.

PML: Perfectly Matched Layer.

TE: Transverse Electric.

TM: Transverse Magnetic.

WDM: Wavelength division multiplexing.

PWE : Méthode des ondes planes

DWDM : dense Wavelength Division Multiplexing

FDTD : Finite Difference Time Domain.

s₁ : La cavité de résonance.

Q : facteur de qualité.

QSRR : résonateur en anneau quasi carré.

CWDM: coarse Wavelength division multiplexing.

PhCRR:photonic crystal ring résonator .

Liste des figures

Figure I.1 : Schéma montrant le principe des arrangements pour des cristaux photoniques unidimensionnels (1D), bidimensionnels (2D) et tridimensionnels (3D).	6
Figure I.2 : la figure à droite présente l'agrandissement d'une aile de papillon. On voit un arrangement périodique des écailles [8].	7
Figure I.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) [9].	8
Figure I.4 : 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.....	8
Figure I.5 : Matériau à BIP unidimensionnel (empilement de couches de permittivités différentes).....	9
Figure I.6 : Représentation schématique de l'interférence des ondes réfléchies par chaque dioptre.....	10
Figure I.7 : Périodes d'un cristal photonique unidimensionnel.....	11
Figure I.8 : Structure périodique 2D connectée.....	12
Figure I.9 : Structure périodique 2D déconnectée.....	12
Figure I.10 : Exemples de cristaux photoniques 2D planaires à haut contraste d'indice vertical.	13
Figure I.11 : Structure « La Yablonovite ».....	14
Figure I.12 : Structures tas de bois (a), La même structure peut également être fabriquée sur GaAs pFusion de plaquettes et processus d'élimination de substrats (d'après Noda et al.) (b). 15	15
Figure I.13 : une opale.	15
Figure I.14 : réseau carré.	16
Figure I.15 : réseau triangulaire.....	16
Figure I.16 : structure hexagonale 2D : (a) graphite, (b) Nitrure de Bore.....	17
Figure I.17 : Réseau réciproque.....	17
Figure I.18 : La maille de Wigner- Seitz.	18
Figure I.19 : 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).	19
Figure I.20 : (a) réseau carré, (b) réseau triangulaire [1]......	19
Figure I.21 : Diagrammes de bandes d'un miroir de Bragg (1D) [27].	23

Figure I.22 : Représentation des polarisations TE et TM dans un BIP 2D.....	24
Figure I.23 : Diagramme de bande d'un BIP 2D en polarisation TM et TE [29].	25
Figure I.24 : Diagrammes de bandes des CP2Ds de trous d'air dans une matrice de diélectrique ayant l'indice du silicium. Le calcul a été effectué par la méthode des ondes planes sous environnement matlab pour les polarisations TE (lignes rouges) et TM (pointillés bleus) . (a) réseau triangulaire, (b) réseau carré [2]	25
Figure I.25 : Diagramme de bande d'un CP-3D [30].....	26
Figure I.26 : Cartes des bandes interdites d'un réseau de trous d'air dans une matrice diélectrique ($\epsilon=12.25$) : (a) réseau triangulaire, (b) réseau carré [32].	27
Figure I.27 : Exemples de défauts ponctuels dans un cristal photonique composé de tiges diélectriques.....	28
Figure I.28 : Défaut ponctuel lacunaire.	29
Figure I.29 : Représentation schématique de l'interférence des ondes réfléchies par chaque dioptre.....	29
Figure I.30 : Exemple de guide W1 à cristal photonique hexagonal de trous d'air sur un substrat de silicium sur isolant.	30
Figure I.31: Discrétisation spatiale cartésienne appliquée dans TMM [47].	31
Figure I.32 : Maillage triangulaire adaptatif [47].	32
Figure I.33 : a) Guide réfractif : modèles de rayons en zig-zag avec réflexions totales et ondes évanescentes b) Guidage par bande interdite photonique.	34
Figure I.34 : la structure de réseau carré diélectrique de tiges d'alumine pas=3mm, d=1,5mm.	34
Figure I.35 : la distribution du champ est autour du défaut en polarisation. (a)Rectiligne (b)Courbures 90°(simulée par le logiciel Rsoft).	34
Figure I.36 : Spectre de transmission en mode Γ K et Γ M d'une structure W5 du réseau triangulaire de trou d'air de facteur de remplissage $r/a = 0.27$ dans Ti : LiNbO3 [56].	35
Figure I.37 : (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 [56].	36
Figure I.38 : spectre de transmission normalisé à base d'un résonateur hexagonal [57].	36
Figure I.39 : Images MEB des cavités de type H2 (a), et de type L3 (b)fabriquées dans la salle blanche de l'IEF [60].	37
Figure I.40 : Exemple d'ingénierie de défauts. Une cavité H1 modifiée [61] [62]	38
Figure I.41 : principe du 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.	38
Figure I.42 : 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-stopband bien séparées [68].	39
Figure II.1 : schéma d'un démultiplexeur a cristaux photoniques [72].	43
Figure II.2 : Résultats de la simulation FDTD d'un démultiplexeur en longueur d'onde : (a) longueur d'onde $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$, (b) longueur d'onde $\lambda = 1,31 \mu\text{m}$ [2].	44
Figure II.3 : schéma d'un démultiplexeur [73].	44
Figure II.4 : Simulation d'un démultiplexeur en longueur d'onde 1530, 1550, 1570 et 1590 nm, respectivement [73].	45
Figure II.5 : Structure de cavité S1 [75].	46
Figure II.6 : Variation de la longueur d'onde de résonance et facteur de qualité en fonction de la variation du rayon de la tige centrale [75].	47
Figure II.7 : Spectre de transmission des Canaux en fonction de la variation du rayon de la tige centrale [75]	47
Figure II.8 : double virage réalisé dans un cristal photonique bidimensionnel à trous d'air [76].	48
Figure II.9 : Structure d'un guide virage réalisé dans un cristal photonique bidimensionnel triangulaire de trous d'air.	48
Figure II.10 : Spectre de transmission normalisé du Guide virage à 60° [77].	49
Figure II.11 : la structure et le principe de fonctionnement d'un filtre Add-Drop, une rangée a été éliminée pour guider les ondes avec des fréquences $f_1, f_2, \dots, f_i, \dots$ et les défauts ponctuels pour extraire les fréquences désirées f_i, f_j [45].	50
Figure II.12 : Exemple de filtre Add-Drop réalisé sur un substrat SOI. Les longueurs d'onde résonnantes de l'anneau peuvent éventuellement se coupler d'un guide à l'autre [79]	50
Figure II.13 : Filtre Add-Drop [80].	51
Figure II.14 : Diagramme de bande d'un Réseau carré CPh et distribution du champ électrique à la longueur d'onde $1,316 \mu\text{m}$ et $1,558 \mu\text{m}$	51
Figure II.15 : Simulation du démultiplexeur à large bande à séparateur en 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 diffusée pour la longueur d'onde correspondante 1,3106 μm . (d) Le champ électromagnétique diffusé pour la longueur d'onde correspondante de 1,5518 μm .

Figure II.16 : Conception schématique et simulation du résonateur à anneau quasi carré QSRR proposé. (a) couplage principal. (b) Le croquis final de la conception proposée. (c) Les résultats de transmission simulés QSRR pour tous les rayons relatifs intérieurs et constantes de réseau donnés $a = 0,53 \mu\text{m}$ et $a_{in} = 0,3747 \mu\text{m}$. (d) Distribution du champ électrique à la longueur d'onde 1,523 μm avec $r_{in} = 0,18 \times a$ 53

Figure II.17: Résultats de transmission simulés par QSRR pour tous les rayons relatifs intérieurs donnés, constante de réseau de fond $a = 0,53 \mu\text{m}$ et réseau intérieur, a_{in} constant = 0,3747 μm 54

Figure II.18 : Le croquis final du démultiplexeur multicanal double bande. 54

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

Figure II.20 : La propagation du signal des ondes électromagnétiques dans le circuit est présentée en lobes dont les rouges représentent l'impulsion positive et les bleus représentent l'impulsion négative comme indiqué sur les deux figures, dont nous pouvons voir que l'anneau affecté à la longueur d'onde de résonance de chaque sortie est le précédent adjacent dans les deux domaine spatial et spectre. 57

Figure II.21 : Bande interdite photonique des structures proposées (a) structure à constante de réseau carrée et (b) une structure avec une constante de réseau triangulaire. 58

Figure II.22 : Schémas généraux des résonateurs homogènes utilisés dans les démultiplexeurs proposés. 58

Figure II.23 : Schéma du démultiplexeur optique proposé, basé sur un résonateur en anneau homogène avec différentes constantes du réseau. 59

Figure II.24 : Spectres de sortie des démultiplexeurs (a) la structure avec une constante de réseau carrée et (b) la structure avec une constante de réseau triangulaire. 59

Figure II.25 : L'effet du rayon des tiges intérieures par rapport aux longueurs d'onde résonantes. 60

Figure II.26 : Distribution du champ électrique des démultiplexeurs proposés (a) à constante de réseau carrée (b) à constante de réseau triangulaire.	61
Figure II.27 : Bande interdite photonique de la structure proposée.	62
Figure II.28 : conception schématique et simulation de la structure ADF. (a) Schéma du nouveau PhCRR hexagonal. (b) Schéma de l'ADF proposé avec guide d'ondes à chute directe. (c) Spectre de sortie de l'ADF proposé avec guide d'ondes à chute directe.	63
Figure II.29 : (a) Comportement optique de l'ADF avec guide d'ondes à chute directe en $\lambda = 1550,5$ nm. (b) champ électrique et puissance de sortie normalisée.	63
Figure II.30 : (a) Schéma de l'ADF proposé avec guide d'ondes à chute indirecte .(b) Spectre de sortie de l'ADF proposé avec guide d'onde à chute indirecte.(c)Comportement optique de l'ADF avec guide d'onde à chute indirecte en $\lambda = 1550,5$ nm.(d) champ électrique et puissance de sortie normalisée	64
Figure II.31 : (a) La structure proposée d'un filtre à gouttes multicanaux avec trois PhCRR hexagonaux.(b) Spectre de sortie du filtre.....	65
Figure II.32 : (a)Schéma de l'ADF proposé avec guide d'ondes à chute indirecte .(b) Spectre de sortie de l'ADF proposé avec guide d'onde à chute indirecte.(c)Comportement optique de l'ADF avec guide d'onde à chute indirecte en $\lambda = 1550,5$ nm.(d) champ électrique et puissance de sortie normalisée	66
Figure II.33 : (a) La structure proposée d'un filtre à gouttes multicanaux avec trois PhCRR hexagonaux.(b) Spectre de sortie du filtre à gouttes multicanal proposé avec trois PhCRR hexagonaux.....	67
Figure II.34 : Le diagramme schématique du démultiplexeur proposé avec un seul RR.....	68
Figure II.35 : (a) Le diagramme de bande et le calcul PBG pour le CPh sans défaut, (b) le diagramme de sortie calculé pour les ports T1 et T2. (c) diagramme de champ magnétique pour une longueur d'onde de résonance de $\lambda=1496$ nm et (d) de résonance de $\lambda=1510$ nm. ...	68
Figure II.36 : (a) un schéma la proposition de CPh à huit canaux démultiplexeur. (b) Les spectres de transmission du démultiplexeur à huit canaux proposés. Seul le RI des barres RR est varié, tandis que les autres Les paramètres sont supposés être constants. Chaque canal diffère de précédent en un. (Les étapes de Δ_{nd} pour ces quatre spectres sont de 0,020,0,030, 0,040 et 0,050).....	69
Figure II.37 : Schéma de photonique de la bande interdite avant l'introduction de la ligne et des défauts ponctuels.....	71
Figure II.38 : diagramme de carte d'écart : (a) variation de la BIP en fonction de (a) période et (b) rayon.	71

Figure II.39 : La structure de base du DEMUX proposé.	72
Figure II.40 : Variation de la longueur d'onde de sortie en fonction des changements de rayon des tiges de couplage dans la base structure.	72
Figure II.41 : Représentation schématique du DEMUX basé sur un PC 2D avec treillis carré.	73
Figure II.42 : (a) Spectres de transmission normalisés du DEMUX à quatre canaux proposés, (b) tableau montrant les résultats du projet 4 canaux 2DPC DEMUX.....	73
Figure II.43 : Distribution des champs optiques dans le DEMUX 4 canaux proposé. (a) $\lambda = 1528,7$ nm (port de sortie B), (b) $\lambda = 1535,3$ nm (port de sortie C), $\lambda = 1531$ nm (port de sortie D) et $\lambda = 1533$ nm (port de sortie E).	74
Figure III.1 : structure carrée sans défaut, $a=0.614 \mu\text{m}$, $r=0.113$	78
Figure III.2 : Réponse spectrale de transmission et réflexion d'un CP-2D déconnecté sans défaut à motif carré.....	79
Figure III.3 : Illustration de la propagation du champ électrique Ez dans un cristal photonique 2D carré sans défaut.	79
Figure III.4 : Structure triangulaire sans défaut, $a=0.614\mu\text{m}$, $r=0.113$	80
Figure III.5 : Réponse spectrale de transmission et réflexion d'un CP-2D déconnecté sans défaut à motif triangulaire.	80
Figure III.6 : Illustration de la propagation du champ électrique Ez dans un cristal photonique 2D triangulaire sans défaut.....	80
Figure III.7 : Représentation de la structure carrée avec défaut : $a=0.614 \mu\text{m}$, $r=0.113$	81
Figure III.8 : La réponse spectrale en transmission et en réflexion du guide mono-rangée.	82
Figure III.9 : Répartition du champ électrique Ez d'un guide d'onde mono rangée à base d'un CP-2D déconnecté à maille carré pour différentes longueurs d'ondes en mode TE : (a) pour $\lambda=1.31 \mu\text{m}$ et (b) pour $\lambda= 1.37 \mu\text{m}$. (c) pour $\lambda= 1.55 \mu\text{m}$	82
Figure III.10 : Représentation schématique d'un guide d'onde W_3^kA à base d'un CP-2D déconnecté à maille triangulaire.	83
Figure III.11 : Réponse spectrale en termes de transmission du guide W_3^kA . $r/a = 0.2$, $a=0.6 \mu\text{m}$	83
Figure III.12 : Répartition de champ électrique Ez dans un filtre en anneau proposé pour les différentes longueurs d'onde $\lambda = 1,3 \mu\text{m}$ (a), $1,32 \mu\text{m}$ (b), $1,55 \mu\text{m}$ (c).	84
Figure III.13 : Structure carrée avec un seul anneau : $a=0.614 \mu\text{m}$, $r=0.113$	84
Figure III.14 : Représentation de la réponse spectrale en transmission dans la bande $[1.48-1.56] \mu\text{m}$	85

Figure III.15 : (a) La réponse spectrale après redimensionnements entre [1.54-1.56] μm .(b) la réponse spectrale après avoir zoomer.	85
Figure III.16 : Répartition de champ électrique E_z dans un filtre en anneau proposé.	86
Figure III.17 : structure carrée avec un seul anneau : $a=0.62\mu\text{m}$, $r=0.134$	87
Figure III.18 : Représentation de la réponse spectrale en transmission dans la bande [1.54-1.56] μm	87
Figure III.19 : Répartition de champ électrique E_z du filtre QSRR.	88
Figure III.20 : Structure schématique du démultiplexeur à base de CPS à deux anneaux avec $a=0.62\mu\text{m}$, $r=0.134$	88
Figure III.21 : Structure schématique du démultiplexeur à base de CPS à deux anneaux avec les rayons relatifs introduit.	89
Figure III.22 : Les résultats de transmission simulés à deux anneaux QSRR pour tous les rayons relatifs intérieurs.	90
Figure III.23 : Répartition de champ électrique E_z dans un filtre à deux canaux pour les deux longueurs d'ondes $\lambda_{1R} = 1,5505\mu\text{m}$ (a), $\lambda_{2R} = 1.5547\mu\text{m}$ (b).	90
Figure III.24 : Structure schématique du démultiplexeur à base de CPS à quatre anneaux avec $a=0.62\mu\text{m}$, $r=0.134$	91
Figure III.25 : Structure schématique du démultiplexeur à base de CPS à quatre anneaux avec les différents rayons R introduit.	91
Figure III.26 : Les résultats de transmission simulés à quatre anneau QSRR pour tous les rayons relatifs intérieurs.	92
Figure III.27 : Répartition de champ électrique E_z dans un filtre en anneau proposé pour les différentes longueurs d'onde $\lambda_{1R} = 1,542\mu\text{m}$ (a), $\lambda_{2R}=1,5465\mu\text{m}$ (b), $\lambda_{3R} = 1,5505\mu\text{m}$ (c), $\lambda_{4R}=1.5547\mu\text{m}$ (d).	92
Figure III.28 : Structure schématique du démultiplexeur à base de CPS à six anneaux avec les différents rayons R introduit.	93
Figure III.29 : Les résultats de transmission simulés à six anneau QSRR pour tous les rayons relatifs intérieurs.	94
Figure III.30 : Répartition de champ électrique E_z dans un filtre en anneau proposé pour les différente longueur d'onde $\lambda_{1R}= 1.5423\mu\text{m}$ (a), $\lambda_{2R}= 1.5464\mu\text{m}$ (b), $\lambda_{3R}= 1.5507\mu\text{m}$ (c), $\lambda_{4R}= 1.5548\mu\text{m}$ (d), $\lambda_{5R}= 1.55925\mu\text{m}$ (e), $\lambda_{6R}= 1.5633\mu\text{m}$ (f).	94
Figure III.31 : Structure schématique du démultiplexeur à base de CPS à huit anneaux avec les différents rayons R introduit.	95

Figure III.32 : Structure schématique du démultiplexeur à base de CPS à huit anneaux avec les différents rayons R introduit.	96
Figure III.33 : Répartition de champ électrique E_z dans un filtre en anneau proposé pour les différentes longueurs d'onde.....	97
Figure III.34 : spectre représentant la diaphonie du DEMUX proposés.	98

Liste des tableaux

Tableau I-1 : Propriétés élémentaires des réseaux carre et triangulaire [1].	20
Tableau II -1 : Variation de la longueur d'onde de résonance et le facteur de qualité en fonction du rayon r de la tige centrale [75].	46
Tableau II -2 : Valeurs de longueurs d'onde de résonance pour chaque valeur "s".	55
Tableau II -3 : Les valeurs de diaphonie entre les sorties à leur résonance correspondante.	56
Tableau II -4 : Résultats de la simulation du démultiplexeur proposé avec une constante de réseau carré.	60
Tableau II -5 : Résultats de la simulation du démultiplexeur proposé avec une constante de réseau triangulaire.	60
Tableau II -6 : Valeurs de diaphonie du démultiplexeur proposé avec une constante de réseau triangulaire (dB).	61
Tableau II -7 : Résultats de simulation de la chute multicanal proposée filtre.	65
Tableau II -8 : Résultats de simulation du filtre à gouttes multicanal proposé .	67
Tableau II -9 : Valeurs de diaphonie du démultiplexeur (dB) pour $\Delta_{nd} = 0,050$.	69
Tableau III-1 : Résultat obtenu pour un démultiplexeur multicanaux.	97
Tableau III-2 : valeurs de diaphonie du démultiplexeurs proposés en (dB).	98

Table des matières

Dédicaces.....	i
Remerciements.....	iii
Résumés.....	iv
Abstract.....	v
Résumé en arabe	vi
Liste des abréviations.....	vii
Liste des figures.....	ix
Liste des tableaux	xvii
Introduction Générale	2
Chapitre I	4
I.1 Introduction :.....	5
I.2 Matériaux à bandes interdites photoniques naturels :.....	6
I.2.1 Les papillons :.....	6
I.2.2 Les oiseaux :	7
I.2.3 Les opales :	8
I.3 Matériaux à bandes interdites photoniques artificielles :	9
I.3.1 Le cristal photonique unidimensionnel, miroir de Bragg "CP-1D" :	9
I.3.2 Propriétés géométriques et physiques d'un CPs-1D [2] :.....	10
I.3.3 Le cristal photonique bidimensionnelle CP-2D :	11
I.3.4 Le cristal photonique tridimensionnel "CP-3D" :	13
I.3.5 Propriétés physiques et géométriques d'un CP-2D :.....	15
I.4 Méthode des ondes planes (PWE) :	20
I.4.1 Equations de Maxwell :.....	20
I.4.2 Diagramme de bande :.....	23
I.4.3 Carte des Bandes :.....	27

I.5	Les défauts :.....	27
I.5.1	Défauts ponctuels :	28
I.5.2	Les défauts étendus :	29
I.6	Les méthodes d'analyse des cristaux photoniques :	30
I.6.1	La méthode FDTD (Finite-Difference Time-Domain) :	30
I.6.2	La méthode de matrice de transfert (TMM):	31
I.6.3	Méthode des éléments finis FEM :	32
I.6.4	La méthode des réseaux de diffraction :	32
I.6.5	La méthode des liaisons fortes :	33
I.7	LES APPLICATIONS :	33
I.7.1	Guides d'onde : [54].....	33
I.7.2	Filtre add / drop :	35
I.7.3	Cavité résonante :	36
I.7.4	DEMUX-coupler :	38
I.8	Conclusion :	39
Chapitre II	41
II.1	Introduction :	42
II.2	Principe de fonctionnement :	42
II.3	Etude et description de la structure :	43
II.4	Etude de cavités à Cristaux Photoniques 2D :	45
II.4.1	Etude de la cavité S1 pour un défaut de substitution [75] :	45
II.5	Etudes des guides à cristaux photoniques :	48
II.5.1	Guide d'onde de type virage à 60 ° :	48
II.5.2	Conception du guide :	48
II.6	Filtres et multiplexeurs :	49
II.7	Les applications :	51

II.7.1	Démultiplexages efficaces en longueur d'onde à 16 canaux autour de 1,31 /1,55 μm dans une plaque de cristal photonique 2D [81]:	51
II.7.2	Conception de deux démultiplexeurs optiques à 8 canaux, Utilisation d'un anneau homogène en cristal photonique 2D Résonateurs [82] :.....	57
II.7.3	Une nouvelle conception de filtres optiques add / drop et filtres multicanaux ..	62
	basé sur PhCRR hexagonal pour les systèmes WDM [83] :	62
II.7.4	Démultiplexeur de longueur d'onde compact à huit canaux utilisant des résonateurs à anneaux de cristal photonique modifiés pour les applications CWDM [84]:	
	67	
II.7.5	Une nouvelle proposition de démultiplexeur à 4 canaux haute performance basé sur un cristal photonique 2D utilisant trois résonateurs en anneau en cascade pour des applications dans des systèmes optiques avancés [85]:.....	70
II.8	CONCLUSION :	75
Chapitre III	76
III.1	Introduction :.....	77
III.2	Définition du logiciel COMSOL :.....	77
III.3	Etude des structures bidimensionnelles sans défaut :.....	78
III.3.1	Structures bidimensionnelles sans défaut à maille carrée :	78
III.3.2	Structures bidimensionnelles sans défaut à maille triangulaire :	79
III.4	Etudes des structures bidimensionnelles avec défaut :.....	81
III.4.1	Conception du guide mono-rangée $W_1^k A$ à maille carrée :.....	81
III.4.2	Conception du guide à trois rangées omises $W_3^k A$ à maille triangulaire :	83
III.5	Simulation d'un filtre en anneau :.....	84
III.5.1	Filtre Channel drop à base de CPs-2D avec un seul résonateur en anneau à noyau en forme de cercle :	84
III.5.2	Résonateur en anneau quasi carré (QSRR) à noyau en forme de diamant conçu sur des PhC à réseau carré :.....	86
III.6	Les démultiplexeurs en longueur d'onde :	88
III.6.1	Démultiplexeur à deux canaux à base des cristaux photoniques 2D :.....	88

III.6.2	Démultiplexeur à quatre canaux à base des cristaux photoniques 2D :.....	90
III.6.3	Démultiplexeur à six canaux à base de cristaux photoniques 2D :.....	93
III.6.4	Démultiplexeur à huit Canaux à base des cristaux photoniques 2D :.....	95
III.7	Conclusion	99
Conclusion générale		110
Annexe		102
Références bibliographiques		110

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, grâce à leurs propriétés optiques uniques qui ont suscité un intérêt important, offrant la possibilité de contrôler la propagation de la lumière. Le développement de ce nouveau type de matériau a ouvert la voie à un nouveau champ de recherche et à des possibilités d'applications très diverses.

Les cristaux photoniques sont des structures dont l'indice diélectrique varie périodiquement à l'échelle de la longueur d'onde dans une ou plusieurs directions de l'espace. La périodicité de l'indice diélectrique joue le même rôle pour les photons que la périodicité du potentiel ionique dans un cristal pour les électrons [1].

La périodicité du milieu produit sur la lumière qui se propage dans le cristal photonique, un effet d'analogie formelle qui existe entre les équations de Maxwell régissant la propagation des ondes électromagnétiques dans un milieu diélectrique et l'équation de Schrödinger pour les électrons.

De même qu'il existe des bandes permises et des bandes interdites pour les électrons, il apparaît des bandes interdites pour les photons dans les cristaux photoniques. À l'origine, ces derniers ont été proposés pour inhiber l'émission spontanée par annulation de la densité d'états dans la bande interdite photonique. L'absence de modes optiques disponibles dans cette dernière a rapidement été utilisée pour réaliser des miroirs parfaits capables de réfléchir l'intégralité de l'énergie d'une onde lumineuse quel que soit son angle d'incidence. Les progrès théoriques et expérimentaux ont été spectaculaires. Même si la fabrication de cristaux photoniques 3D pose encore de nombreuses difficultés, des résultats inimaginables ont été obtenus récemment sur des structures 2D. Citons par exemple un facteur de qualité supérieur à 600000 mesuré par Noda et al. sur une microcavité à cristaux photoniques. À l'heure actuelle, les cristaux photoniques constituent plus que jamais un matériau prometteur pour la réalisation de composants pour l'optique intégrée [1].

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 [2].

Le multiplexage en longueur d'onde, souvent appelé WDM (Wavelength Division Multiplexing en anglais) est une technique qui permet d'augmenter le débit sur une fibre optique, en rassemblant toute les longueur d'onde à l'entrée et les séparée, à la sortie de la fibre au moyen d'un démultiplexeur (deMux). L'objet de ce travail est de proposer de nouvelles structures des DEMUX en cristaux photonique 2D pour les systèmes DWDM en utilisant le logiciel COMSOL.

Notre mémoire s'articule sur trois chapitres, 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.

Le deuxième chapitre est consacré aux démultiplexeurs à cristaux photoniques, sa description, son principe de fonctionnement et plus principalement des exemples d'applications les plus récentes dans lesquelles sont utilisées les différentes structures d'un démultiplexeur en cristaux photoniques.

Dans le dernier chapitre de ce mémoire, nous allons présenter brièvement notre outil de simulation le logiciel COMSOL, et étudier les différents résultats de simulation ainsi que la répartition du champ électrique pour plusieurs topologies de démultiplexeurs à base de cristaux photonique bidimensionnels. Ce document sera enfin clôturé par une conclusion générale, une annexe et une référence bibliographique.

Chapitre I

Généralités sur les cristaux photoniques

I.1 Introduction :

Le développement en nanotechnologies a rendu possible l'élaboration de matériaux diélectriques, semi-conducteurs dont le comportement vis-à-vis des ondes électromagnétiques est tout à fait surprenant en modifiant sa propagation.

Ils sont appelés cristaux photoniques matériaux qui intéressent beaucoup la communauté scientifique, notamment dans le domaine de l'optique. Ils ont été proposés pour la première fois en 1987 [3] , [2] et réalisés en 1991 [5] .

Grâce aux travaux de Yablonovitch qui a réalisé des cavités parfaites pour contrôler l'émission spontanée et d'obtenir des lasers sans seuil qui sont apparues quelques années plus tard.

En 1996 des fibres optiques sont réalisées à partir d'un cristal photonique bidimensionnel qui a la possibilité de guidage du mode fondamental sur une très large bande [6].

L'intérêt des chercheurs pour le développement des cristaux photoniques est important, Car ces derniers ont été promis pour remplacer la communication classique à courant électrique et assurée la rapidité de la communication.

Dans ce chapitre, nous allons nous focaliser seulement sur les théories générales qui concernent les cristaux photoniques.

Par définition, les cristaux photoniques sont des structures artificielles ou naturelles, diélectriques, semi-conducteurs ou métallo-diélectriques, la première structure périodique à bande interdite photonique (B.I.P) que l'on appelle plutôt « matériau à bande interdite photonique» ,son indice de réfraction varie périodiquement à l'échelle de la longueur d'onde et sa périodicité peut être unidimensionnelle 1D (empilement de couches minces, miroir de Bragg).bidimensionnelle 2D (réseau de trous sur une surface), ou encore tridimensionnelle 3D (couche empilé qui est formées de billes de silices auto assemblées).

Ces propriétés les rendent intéressants pour plusieurs applications dans l'optique. Telle que le démultiplexage en longueur d'onde, le filtrage, coupleur ...etc

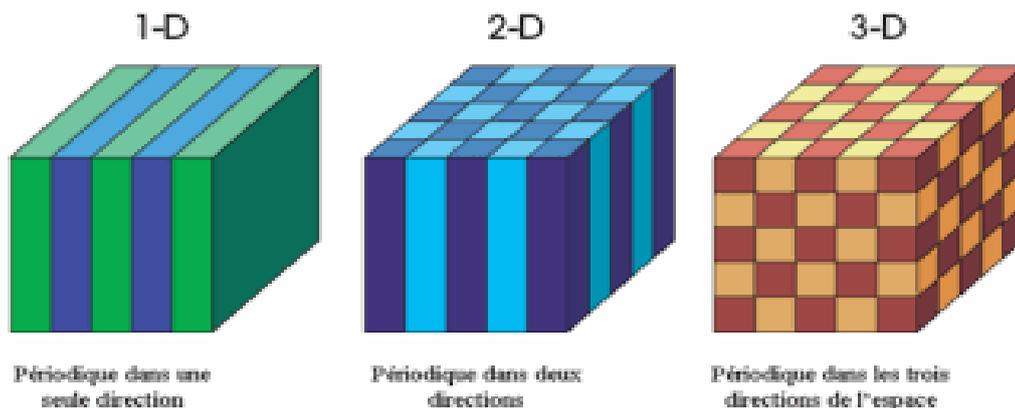


Figure I.1 : Schéma montrant le principe des arrangements pour des cristaux photoniques unidimensionnels (1D), bidimensionnels (2D) et tridimensionnels (3D).

La modification de la propagation des ondes électromagnétiques est de la même manière qu'un potentiel périodique dans un cristal semi-conducteur ce qui va amener au déplacement des électrons en créant des bandes d'énergie autorisées et interdites.

En ce qui concerne la bande photonique autorisée, elle correspond à un mode qui se propage dans le cristal photonique par contre la bande interdite photonique 'BIP' (le gap) correspond à un intervalle d'énergie où la propagation de la lumière est interdite dans certaines directions du cristal photonique.

I.2 Matériaux à bandes interdites photoniques naturels :

Des structures naturelles existent qui ont les mêmes propriétés et caractéristiques qu'un cristal photonique artificiel, ceci est dû aux colorations vives de certaines espèces ayant des structures, à caractère périodique. On va citer trois de ces structures [7].

I.2.1 Les papillons :

La coloration vive des papillons que nous offre la nature, sont tributaire de la lumière et ont suscité un développement d'un arsenal impressionnant, afin de gérer l'interaction avec les ondes électromagnétiques au mieux de leur intérêt.

En effectuant une analyse à l'aide d'un microscope, on remarque que les ailes sont constituées d'écailles ayant des structures géométriques dans lesquelles un des paramètres varie en continu, comme est montré sur la Figure I.2 où apparaît une structure avec un comportement de matériau à bande photonique interdite, donnant des couleurs vives et iridescentes pour certains papillons.

Dans ce réseau, la réflexion de la lumière est pour certaines longueurs d'onde et dans différentes directions en fonction de la longueur d'onde [8].

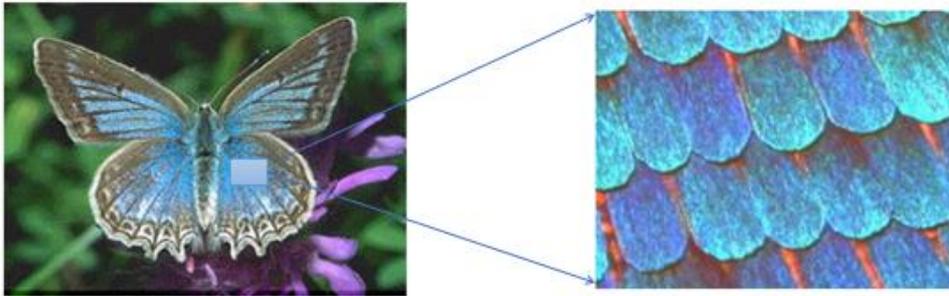


Figure I.2 : la figure à droite présente l'agrandissement d'une aile de papillon. On voit un arrangement périodique des écailles [8].

I.2.2 Les oiseaux :

Les oiseaux affirment leurs identités par leurs couleurs surprenantes qui sont produites en employant une technique structurale des plumes ainsi que les pigments qui se trouve dans leurs pièces de corps [9].

Les couleurs pigmentaires crée un phénomène d'absorption puisqu'ils renvoient une partie des couleurs vers l'œil et absorbent d'autre couleur de la lumière solaire. En ce qui concerne les couleurs structurales, qui sont créés par la diffraction des rayons lumineux des microstructures des plumes et varient selon l'incidence de la lumière, ce qui s'opposent aux couleurs pigmentaires qui sont considéré comme stable.

Ces couleurs sont créées dans les barbules des plumes faites de petites cuvettes composées de minces lamelles parallèles qui se comporte comme des miroirs qui réfléchit la lumière incidente, donc ce phénomène se rapproche de l'étude d'un cph-1D.

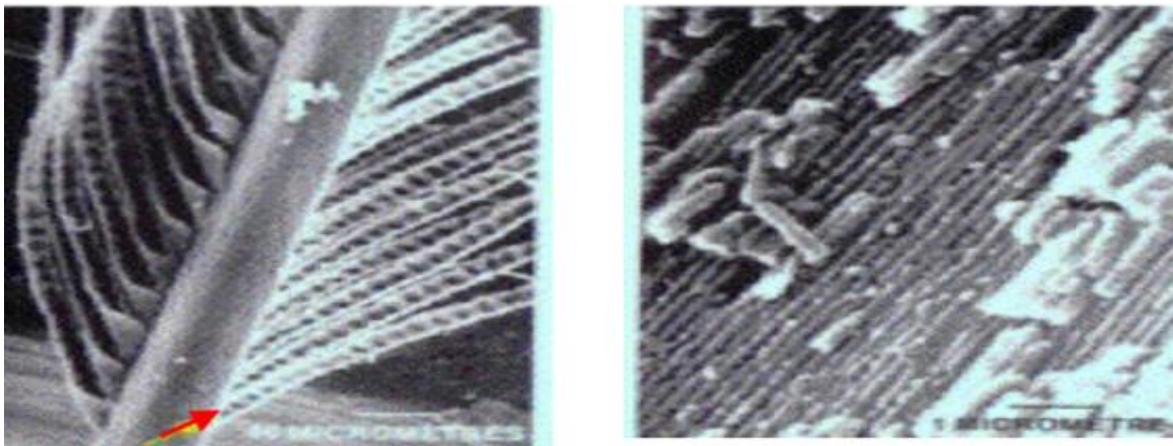


Figure I.3 : Agrandissement d'une plume de paon au microscope montrant la structure des barbules. Chaque barbule est divisée en une série de cuvettes (flèche rouge) [9].

I.2.3 Les opales :

L'opale est considéré comme un cristal photonique naturel, même si la bande interdite de ce dernier n'est pas complète puisqu'elle ne s'étend pas dans toutes les directions du cph. Cette structure minérale est composée de microbilles de silice ayant une répartition selon arrangement plus ou moins régulier [10].

L'obtention des opales se fait chimiquement par l'auto organisation, la sédimentation des sphères de silices en solution, s'arrangent selon un réseau cubique à face centrée, ceci permet la création de la 1^{ère} opale [11].

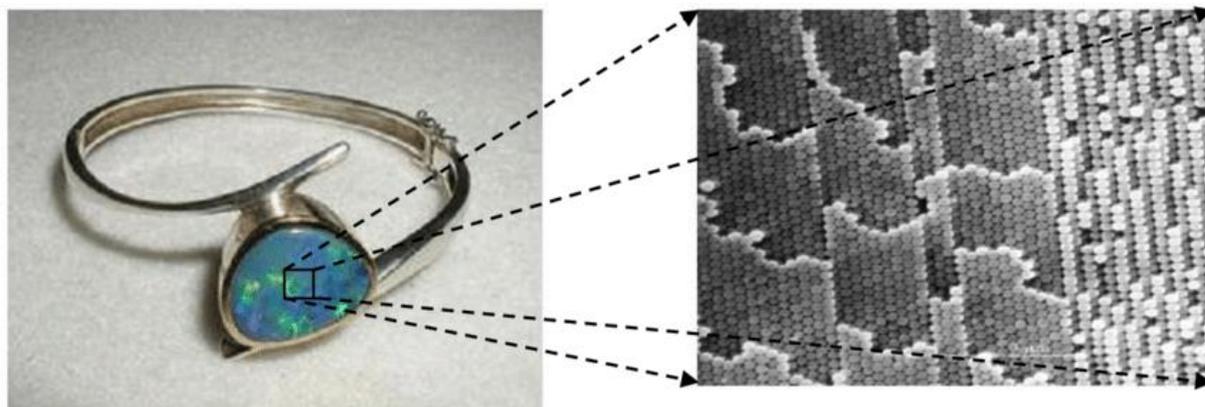


Figure I.4 : à gauche on a un Bracelet monté d'une opale naturelle quasi-périodique bille de silice et à droite une Image au microscope électronique d'une opale naturelle.

I.3 Matériaux à bandes interdites photoniques artificielles :

I.3.1 Le cristal photonique unidimensionnel, miroir de Bragg "CP-1D" :

C'est le cas simple d'un milieu dont la constante diélectrique est périodique suivant une seule dimension (Figure I.5), il peut être constitué d'une alternance de couches de diélectriques de permittivités différentes ϵ_1 et ϵ_2 et d'épaisseur $\lambda/4$, où λ est considéré par la longueur d'onde guidée autour d'un matériau, où la propagation des ondes, électromagnétiques est interdite en incidence normale.



Figure I.5 : Matériau à BIP unidimensionnel (empilement de couches de permittivités différentes).

La figure I.6 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 optique totale est de $\lambda/2$: l'onde qui est réfléchi par l'interface '1' devient en phase avec celles qui est réfléchies par les interfaces 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21, 23, 25, 27, 29, 31, 33, 35, 37, 39, 41, 43, 45, 47, 49, 51, 53, 55, 57, 59, 61, 63, 65, 67, 69, 71, 73, 75, 77, 79, 81, 83, 85, 87, 89, 91, 93, 95, 97, 99, 101, 103, 105, 107, 109, 111, 113, 115, 117, 119, 121, 123, 125, 127, 129, 131, 133, 135, 137, 139, 141, 143, 145, 147, 149, 151, 153, 155, 157, 159, 161, 163, 165, 167, 169, 171, 173, 175, 177, 179, 181, 183, 185, 187, 189, 191, 193, 195, 197, 199, 201, 203, 205, 207, 209, 211, 213, 215, 217, 219, 221, 223, 225, 227, 229, 231, 233, 235, 237, 239, 241, 243, 245, 247, 249, 251, 253, 255, 257, 259, 261, 263, 265, 267, 269, 271, 273, 275, 277, 279, 281, 283, 285, 287, 289, 291, 293, 295, 297, 299, 301, 303, 305, 307, 309, 311, 313, 315, 317, 319, 321, 323, 325, 327, 329, 331, 333, 335, 337, 339, 341, 343, 345, 347, 349, 351, 353, 355, 357, 359, 361, 363, 365, 367, 369, 371, 373, 375, 377, 379, 381, 383, 385, 387, 389, 391, 393, 395, 397, 399, 401, 403, 405, 407, 409, 411, 413, 415, 417, 419, 421, 423, 425, 427, 429, 431, 433, 435, 437, 439, 441, 443, 445, 447, 449, 451, 453, 455, 457, 459, 461, 463, 465, 467, 469, 471, 473, 475, 477, 479, 481, 483, 485, 487, 489, 491, 493, 495, 497, 499, 501, 503, 505, 507, 509, 511, 513, 515, 517, 519, 521, 523, 525, 527, 529, 531, 533, 535, 537, 539, 541, 543, 545, 547, 549, 551, 553, 555, 557, 559, 561, 563, 565, 567, 569, 571, 573, 575, 577, 579, 581, 583, 585, 587, 589, 591, 593, 595, 597, 599, 601, 603, 605, 607, 609, 611, 613, 615, 617, 619, 621, 623, 625, 627, 629, 631, 633, 635, 637, 639, 641, 643, 645, 647, 649, 651, 653, 655, 657, 659, 661, 663, 665, 667, 669, 671, 673, 675, 677, 679, 681, 683, 685, 687, 689, 691, 693, 695, 697, 699, 701, 703, 705, 707, 709, 711, 713, 715, 717, 719, 721, 723, 725, 727, 729, 731, 733, 735, 737, 739, 741, 743, 745, 747, 749, 751, 753, 755, 757, 759, 761, 763, 765, 767, 769, 771, 773, 775, 777, 779, 781, 783, 785, 787, 789, 791, 793, 795, 797, 799, 801, 803, 805, 807, 809, 811, 813, 815, 817, 819, 821, 823, 825, 827, 829, 831, 833, 835, 837, 839, 841, 843, 845, 847, 849, 851, 853, 855, 857, 859, 861, 863, 865, 867, 869, 871, 873, 875, 877, 879, 881, 883, 885, 887, 889, 891, 893, 895, 897, 899, 901, 903, 905, 907, 909, 911, 913, 915, 917, 919, 921, 923, 925, 927, 929, 931, 933, 935, 937, 939, 941, 943, 945, 947, 949, 951, 953, 955, 957, 959, 961, 963, 965, 967, 969, 971, 973, 975, 977, 979, 981, 983, 985, 987, 989, 991, 993, 995, 997, 999, 1001, 1003, 1005, 1007, 1009, 1011, 1013, 1015, 1017, 1019, 1021, 1023, 1025, 1027, 1029, 1031, 1033, 1035, 1037, 1039, 1041, 1043, 1045, 1047, 1049, 1051, 1053, 1055, 1057, 1059, 1061, 1063, 1065, 1067, 1069, 1071, 1073, 1075, 1077, 1079, 1081, 1083, 1085, 1087, 1089, 1091, 1093, 1095, 1097, 1099, 1101, 1103, 1105, 1107, 1109, 1111, 1113, 1115, 1117, 1119, 1121, 1123, 1125, 1127, 1129, 1131, 1133, 1135, 1137, 1139, 1141, 1143, 1145, 1147, 1149, 1151, 1153, 1155, 1157, 1159, 1161, 1163, 1165, 1167, 1169, 1171, 1173, 1175, 1177, 1179, 1181, 1183, 1185, 1187, 1189, 1191, 1193, 1195, 1197, 1199, 1201, 1203, 1205, 1207, 1209, 1211, 1213, 1215, 1217, 1219, 1221, 1223, 1225, 1227, 1229, 1231, 1233, 1235, 1237, 1239, 1241, 1243, 1245, 1247, 1249, 1251, 1253, 1255, 1257, 1259, 1261, 1263, 1265, 1267, 1269, 1271, 1273, 1275, 1277, 1279, 1281, 1283, 1285, 1287, 1289, 1291, 1293, 1295, 1297, 1299, 1301, 1303, 1305, 1307, 1309, 1311, 1313, 1315, 1317, 1319, 1321, 1323, 1325, 1327, 1329, 1331, 1333, 1335, 1337, 1339, 1341, 1343, 1345, 1347, 1349, 1351, 1353, 1355, 1357, 1359, 1361, 1363, 1365, 1367, 1369, 1371, 1373, 1375, 1377, 1379, 1381, 1383, 1385, 1387, 1389, 1391, 1393, 1395, 1397, 1399, 1401, 1403, 1405, 1407, 1409, 1411, 1413, 1415, 1417, 1419, 1421, 1423, 1425, 1427, 1429, 1431, 1433, 1435, 1437, 1439, 1441, 1443, 1445, 1447, 1449, 1451, 1453, 1455, 1457, 1459, 1461, 1463, 1465, 1467, 1469, 1471, 1473, 1475, 1477, 1479, 1481, 1483, 1485, 1487, 1489, 1491, 1493, 1495, 1497, 1499, 1501, 1503, 1505, 1507, 1509, 1511, 1513, 1515, 1517, 1519, 1521, 1523, 1525, 1527, 1529, 1531, 1533, 1535, 1537, 1539, 1541, 1543, 1545, 1547, 1549, 1551, 1553, 1555, 1557, 1559, 1561, 1563, 1565, 1567, 1569, 1571, 1573, 1575, 1577, 1579, 1581, 1583, 1585, 1587, 1589, 1591, 1593, 1595, 1597, 1599, 1601, 1603, 1605, 1607, 1609, 1611, 1613, 1615, 1617, 1619, 1621, 1623, 1625, 1627, 1629, 1631, 1633, 1635, 1637, 1639, 1641, 1643, 1645, 1647, 1649, 1651, 1653, 1655, 1657, 1659, 1661, 1663, 1665, 1667, 1669, 1671, 1673, 1675, 1677, 1679, 1681, 1683, 1685, 1687, 1689, 1691, 1693, 1695, 1697, 1699, 1701, 1703, 1705, 1707, 1709, 1711, 1713, 1715, 1717, 1719, 1721, 1723, 1725, 1727, 1729, 1731, 1733, 1735, 1737, 1739, 1741, 1743, 1745, 1747, 1749, 1751, 1753, 1755, 1757, 1759, 1761, 1763, 1765, 1767, 1769, 1771, 1773, 1775, 1777, 1779, 1781, 1783, 1785, 1787, 1789, 1791, 1793, 1795, 1797, 1799, 1801, 1803, 1805, 1807, 1809, 1811, 1813, 1815, 1817, 1819, 1821, 1823, 1825, 1827, 1829, 1831, 1833, 1835, 1837, 1839, 1841, 1843, 1845, 1847, 1849, 1851, 1853, 1855, 1857, 1859, 1861, 1863, 1865, 1867, 1869, 1871, 1873, 1875, 1877, 1879, 1881, 1883, 1885, 1887, 1889, 1891, 1893, 1895, 1897, 1899, 1901, 1903, 1905, 1907, 1909, 1911, 1913, 1915, 1917, 1919, 1921, 1923, 1925, 1927, 1929, 1931, 1933, 1935, 1937, 1939, 1941, 1943, 1945, 1947, 1949, 1951, 1953, 1955, 1957, 1959, 1961, 1963, 1965, 1967, 1969, 1971, 1973, 1975, 1977, 1979, 1981, 1983, 1985, 1987, 1989, 1991, 1993, 1995, 1997, 1999, 2001, 2003, 2005, 2007, 2009, 2011, 2013, 2015, 2017, 2019, 2021, 2023, 2025, 2027, 2029, 2031, 2033, 2035, 2037, 2039, 2041, 2043, 2045, 2047, 2049, 2051, 2053, 2055, 2057, 2059, 2061, 2063, 2065, 2067, 2069, 2071, 2073, 2075, 2077, 2079, 2081, 2083, 2085, 2087, 2089, 2091, 2093, 2095, 2097, 2099, 2101, 2103, 2105, 2107, 2109, 2111, 2113, 2115, 2117, 2119, 2121, 2123, 2125, 2127, 2129, 2131, 2133, 2135, 2137, 2139, 2141, 2143, 2145, 2147, 2149, 2151, 2153, 2155, 2157, 2159, 2161, 2163, 2165, 2167, 2169, 2171, 2173, 2175, 2177, 2179, 2181, 2183, 2185, 2187, 2189, 2191, 2193, 2195, 2197, 2199, 2201, 2203, 2205, 2207, 2209, 2211, 2213, 2215, 2217, 2219, 2221, 2223, 2225, 2227, 2229, 2231, 2233, 2235, 2237, 2239, 2241, 2243, 2245, 2247, 2249, 2251, 2253, 2255, 2257, 2259, 2261, 2263, 2265, 2267, 2269, 2271, 2273, 2275, 2277, 2279, 2281, 2283, 2285, 2287, 2289, 2291, 2293, 2295, 2297, 2299, 2301, 2303, 2305, 2307, 2309, 2311, 2313, 2315, 2317, 2319, 2321, 2323, 2325, 2327, 2329, 2331, 2333, 2335, 2337, 2339, 2341, 2343, 2345, 2347, 2349, 2351, 2353, 2355, 2357, 2359, 2361, 2363, 2365, 2367, 2369, 2371, 2373, 2375, 2377, 2379, 2381, 2383, 2385, 2387, 2389, 2391, 2393, 2395, 2397, 2399, 2401, 2403, 2405, 2407, 2409, 2411, 2413, 2415, 2417, 2419, 2421, 2423, 2425, 2427, 2429, 2431, 2433, 2435, 2437, 2439, 2441, 2443, 2445, 2447, 2449, 2451, 2453, 2455, 2457, 2459, 2461, 2463, 2465, 2467, 2469, 2471, 2473, 2475, 2477, 2479, 2481, 2483, 2485, 2487, 2489, 2491, 2493, 2495, 2497, 2499, 2501, 2503, 2505, 2507, 2509, 2511, 2513, 2515, 2517, 2519, 2521, 2523, 2525, 2527, 2529, 2531, 2533, 2535, 2537, 2539, 2541, 2543, 2545, 2547, 2549, 2551, 2553, 2555, 2557, 2559, 2561, 2563, 2565, 2567, 2569, 2571, 2573, 2575, 2577, 2579, 2581, 2583, 2585, 2587, 2589, 2591, 2593, 2595, 2597, 2599, 2601, 2603, 2605, 2607, 2609, 2611, 2613, 2615, 2617, 2619, 2621, 2623, 2625, 2627, 2629, 2631, 2633, 2635, 2637, 2639, 2641, 2643, 2645, 2647, 2649, 2651, 2653, 2655, 2657, 2659, 2661, 2663, 2665, 2667, 2669, 2671, 2673, 2675, 2677, 2679, 2681, 2683, 2685, 2687, 2689, 2691, 2693, 2695, 2697, 2699, 2701, 2703, 2705, 2707, 2709, 2711, 2713, 2715, 2717, 2719, 2721, 2723, 2725, 2727, 2729, 2731, 2733, 2735, 2737, 2739, 2741, 2743, 2745, 2747, 2749, 2751, 2753, 2755, 2757, 2759, 2761, 2763, 2765, 2767, 2769, 2771, 2773, 2775, 2777, 2779, 2781, 2783, 2785, 2787, 2789, 2791, 2793, 2795, 2797, 2799, 2801, 2803, 2805, 2807, 2809, 2811, 2813, 2815, 2817, 2819, 2821, 2823, 2825, 2827, 2829, 2831, 2833, 2835, 2837, 2839, 2841, 2843, 2845, 2847, 2849, 2851, 2853, 2855, 2857, 2859, 2861, 2863, 2865, 2867, 2869, 2871, 2873, 2875, 2877, 2879, 2881, 2883, 2885, 2887, 2889, 2891, 2893, 2895, 2897, 2899, 2901, 2903, 2905, 2907, 2909, 2911, 2913, 2915, 2917, 2919, 2921, 2923, 2925, 2927, 2929, 2931, 2933, 2935, 2937, 2939, 2941, 2943, 2945, 2947, 2949, 2951, 2953, 2955, 2957, 2959, 2961, 2963, 2965, 2967, 2969, 2971, 2973, 2975, 2977, 2979, 2981, 2983, 2985, 2987, 2989, 2991, 2993, 2995, 2997, 2999, 3001, 3003, 3005, 3007, 3009, 3011, 3013, 3015, 3017, 3019, 3021, 3023, 3025, 3027, 3029, 3031, 3033, 3035, 3037, 3039, 3041, 3043, 3045, 3047, 3049, 3051, 3053, 3055, 3057, 3059, 3061, 3063, 3065, 3067, 3069, 3071, 3073, 3075, 3077, 3079, 3081, 3083, 3085, 3087, 3089, 3091, 3093, 3095, 3097, 3099, 3101, 3103, 3105, 3107, 3109, 3111, 3113, 3115, 3117, 3119, 3121, 3123, 3125, 3127, 3129, 3131, 3133, 3135, 3137, 3139, 3141, 3143, 3145, 3147, 3149, 3151, 3153, 3155, 3157, 3159, 3161, 3163, 3165, 3167, 3169, 3171, 3173, 3175, 3177, 3179, 3181, 3183, 3185, 3187, 3189, 3191, 3193, 3195, 3197, 3199, 3201, 3203, 3205, 3207, 3209, 3211, 3213, 3215, 3217, 3219, 3221, 3223, 3225, 3227, 3229, 3231, 3233, 3235, 3237, 3239, 3241, 3243, 3245, 3247, 3249, 3251, 3253, 3255, 3257, 3259, 3261, 3263, 3265, 3267, 3269, 3271, 3273, 3275, 3277, 3279, 3281, 3283, 3285, 3287, 3289, 3291, 3293, 3295, 3297, 3299, 3301, 3303, 3305, 3307, 3309, 3311, 3313, 3315, 3317, 3319, 3321, 3323, 3325, 3327, 3329, 3331, 3333, 3335, 3337, 3339, 3341, 3343, 3345, 3347, 3349, 3351, 3353, 3355, 3357, 3359, 3361, 3363, 3365, 3367, 3369, 3371, 3373, 3375, 3377, 3379, 3381, 3383, 3385, 3387, 3389, 3391, 3393, 3395, 3397, 3399, 3401, 3403, 3405, 3407, 3409, 3411, 3413, 3415, 3417, 3419, 3421, 3423, 3425, 3427, 3429, 3431, 3433, 3435, 3437, 3439, 3441, 3443, 3445, 3447, 3449, 3451, 3453, 3455, 3457, 3459, 3461, 3463, 3465, 3467, 3469, 3471, 3473, 3475, 3477, 3479, 3481, 3483, 3485, 3487, 3489, 3491, 3493, 3495, 3497, 3499, 3501, 3503, 3505, 3507, 3509, 3511, 3513, 3515, 3517, 3519, 3521, 3523, 3525, 3527, 3529, 3531, 3533, 3535, 3537, 3539, 3541, 3543, 3545, 3547, 3549, 3551, 3553, 3555, 3557, 3559, 3561, 3563, 3565, 3567, 3569, 3571, 3573, 3575, 3577, 3579, 3581, 3583, 3585, 3587, 3589, 3591, 3593, 3595, 3597, 3599, 3601, 3603, 3605, 3607, 3609, 3611, 3613, 3615, 3617, 3619, 3621, 3623, 3625, 3627, 3629, 3631, 3633, 3635, 3637, 3639, 3641, 3643, 3645, 3647, 3649, 3651, 3653, 3655, 3657, 3659, 3661, 3663, 3665, 3667, 3669, 3671, 3673, 3675, 3677, 3679, 3681, 3683, 3685, 3687, 3689, 3691, 3693, 3695, 3697, 3699, 3701, 3703, 3705, 3707, 3709, 3711, 3713, 3715, 3717, 3719, 3721, 3723, 3725, 3727, 3729, 3731, 3733, 3735, 3737, 3739, 3741, 3743, 3745, 3747, 3749, 3751, 3753, 3755, 3757, 3759, 3761, 3763, 3765, 3767, 3769, 3771, 3773, 3775, 3777, 3779, 3781, 3783, 3785, 3787, 3789, 3791, 3793, 3795, 3797, 3799, 3801, 3803, 3805, 3807, 3809, 3811, 3813, 3815, 3817, 3819, 3821, 3823, 3825, 3827, 3829, 3831, 3833, 3835, 3837, 3839, 3841, 3843, 3845, 3847, 3849, 3851, 3853, 3855, 3857, 3859, 3861, 3863, 3865, 3867, 3869, 3871, 3873, 3875, 3877, 3879, 3881, 3883, 3885, 3887, 3889, 3891, 3893, 3895, 3897, 3899, 3901, 3903, 3905, 3907, 3909, 3911, 3913, 3915, 3917, 3919, 3921, 3923, 3925, 3927, 3929, 3931, 3933, 3935, 3937, 3939, 3941, 3943, 3945, 3947, 3949, 3951, 3953, 3955, 3957, 3959, 3961, 3963, 3965, 3967, 3969, 3971, 3973, 3975, 3977, 3979, 3981, 3983, 3985, 3987, 3989, 3991, 3993, 3995, 3997, 3999, 4001, 4003, 4005, 4007, 4009, 4011, 4013, 4015, 4017, 4019, 4021, 4023, 4025, 4027, 4029, 4031, 4033, 4035, 4037, 4039, 4041, 4043, 4045, 4047, 4049, 4051, 4053, 4055, 4057, 4059,

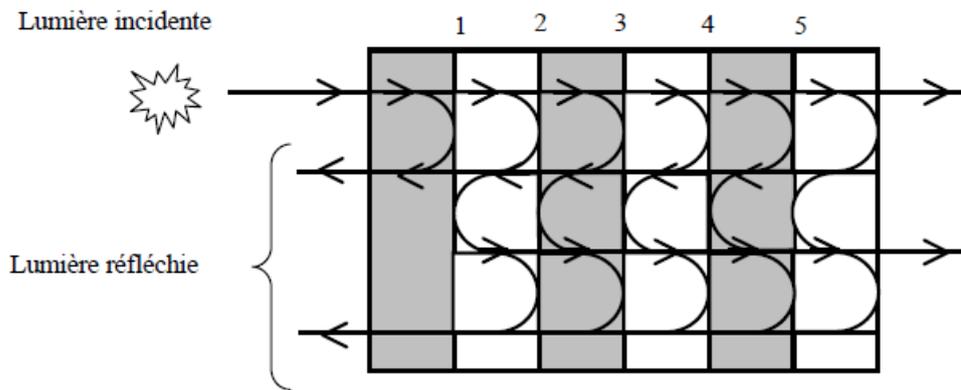


Figure I.6 : Représentation schématique de l'interférence des ondes réfléchies par chaque dioptré.

I.3.2 Propriétés géométriques et physiques d'un CPs-1D [2] :

Les quantités représentatives des différentes propriétés d'un cristal photonique unidimensionnel (CP-1D) sont :

a- Contraste d'indice :

La possibilité de comparaison du Rapport entre les indices des deux matériaux à la hauteur de la barrière du potentiel de la physique solide, il est exprimé par la relation :

$$\delta = \frac{n_h}{n_l} \quad (\text{I-1})$$

Avec :

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

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

b- La période :

La période a est défini par la relation : $a = (a_1 + a_2)$ avec a_1 l'épaisseur de la couche de permittivité ϵ_1 et a_2 l'épaisseur de la couche de permittivité ϵ_2 (Figure I.7).

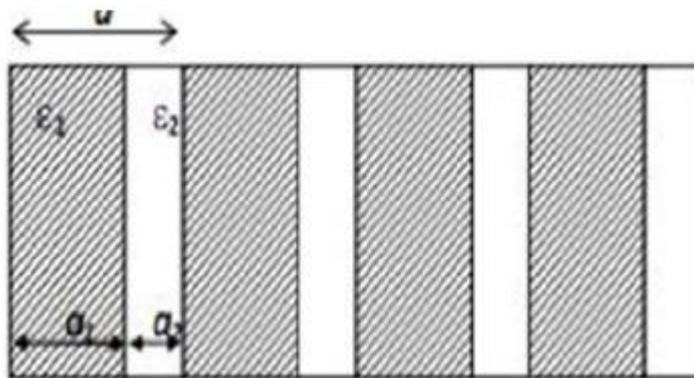


Figure I.7 : Périodes d'un cristal photonique unidimensionnel.

Les paramètres géométriques en influence sur les caractéristiques de la bande interdite photonique.

c- Facteur de remplissage :

On peut dire que le facteur de remplissage est comparable avec le largeur du potentiel périodique de la physique du solide.

Si le matériau est de haut indice le facteur de remplissage est défini par la formule I-2 :

$$f = \frac{v_i}{\Lambda} \quad (I-2)$$

Avec :

v_i : Volume occupé par le matériau.

Λ : Volume de la cellule.

I.3.3 Le cristal photonique bidimensionnelle CP-2D :

Les CP-2D sont définie comme des plaques, où la période cristallographique du cristal photonique est du même ordre de grandeur que son épaisseur. Cette périodicité est créer par une structure de trous qui sont gravé dans une plaque possédant un indice de réfraction très élevé, et plus l'indice est élevé ,plus la BIP est importante [13] .

Le CP-2D peut avoir une grande variété de configurations, car elle possède la périodicité de la permittivité dans deux directions, tandis que dans la troisième direction, le milieu est uniforme [14] .

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 I.8).

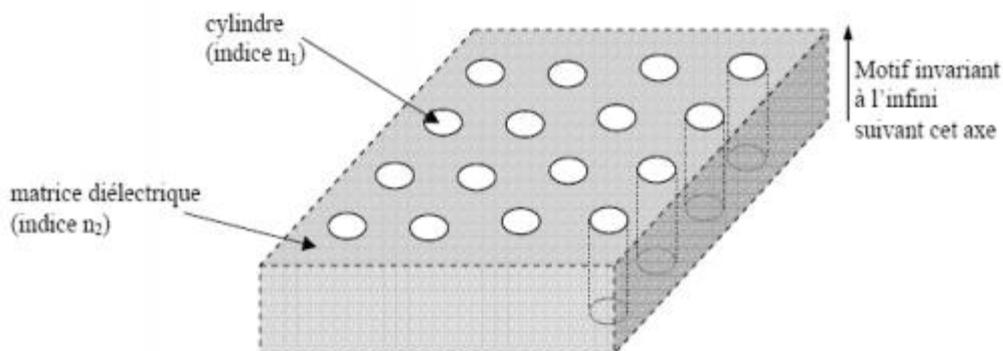


Figure I.8 : Structure périodique 2D connectée.

- Les motifs dont l'indice n_1 est supérieur à l'indice n_2 correspondent aux structures dites « déconnectées » (Figure I.9) formé de tiges alignées, de façon périodique dans l'air [15].

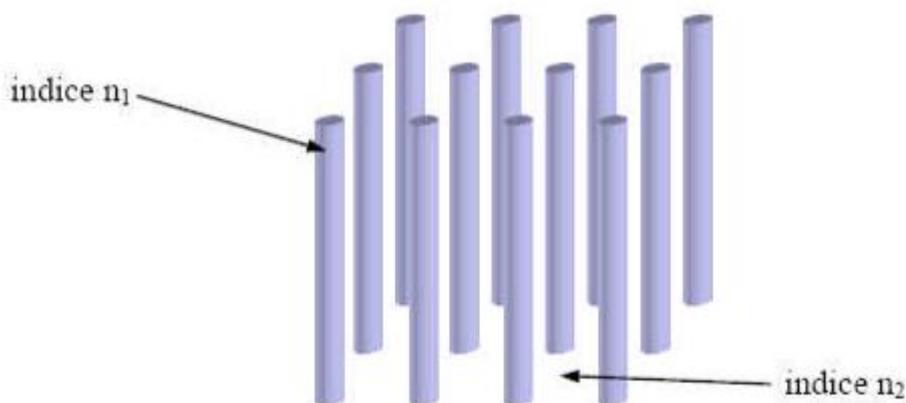


Figure I.9 : Structure périodique 2D déconnectée.

I.3.3.1 Approche membrane ou substrat :

On peut distinguer deux types de CP-2D planaires, suivant le contraste d'indice entre la couche guidante et le substrat :

a- Fort contraste d'indice (approche membrane) [2] :

Un fort contraste d'indice est définie par une membrane semi-conductrice suspendue dans l'air permettant un bon confinement de la lumière verticale, ce qui va limiter les pertes de propagation (Figure I.10).

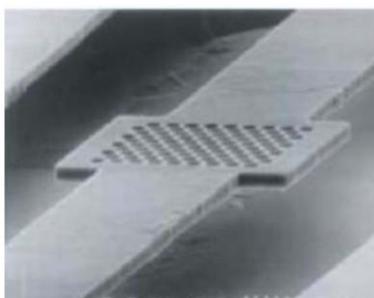


Figure I.10 : Exemples de cristaux photoniques 2D planaires à haut contraste d'indice vertical.

Il est caractérisé sa profondeur nécessaire et de sa gravure qui est plus facile que dans le cas des faibles contrastes d'indice car ses trous sont plus petits.

Par contre ces structures sont plus fragiles à cause de ses membranes suspendues dans l'air et posent des problèmes à cause de la mauvaise évacuation thermique comme pour les applications lasers.

b- Faible contraste d'indice (approche substrat) :

Dans un milieu d'un faible contraste d'indice ($n_2 \approx n_1$), le confinement vertical est faible qui est dû à la différence d'indice qui est aussi faible par conséquent les pertes alors deviennent importantes et les trous percés dans celle-ci sont profonds.

L'épaisseur de la couche guidante doit être importante pour la conservation d'un guidage monomode.

I.3.4 Le cristal photonique tridimensionnel "CP-3D" :

La technologie des BIP 3D a été fabriquée en 1993 par E. Yablonovitch [16] en micro-onde avec des trous dans du plexiglas selon trois angles séparés de 120° faisant un angle de 35° par rapport à la normale, de façon à trouver la structure cristalline du diamant (cubique à face centrée).

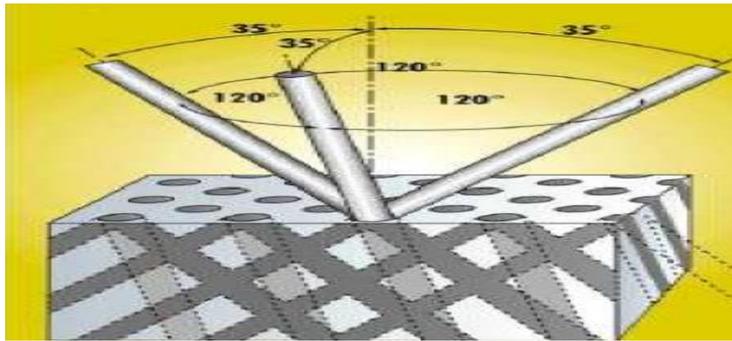


Figure I.11 : Structure « La Yablonovite ».

Il s'agit en effet de réaliser une structure périodique avec un pas (espacement entre deux Motifs) micrométrique et une régularité de l'ordre du pourcent [17].

Elle est la seule structure à permettre l'obtention d'une bande Interdite omnidirectionnelle en supprimant tous l'état radiatif dans la plage de Longueur d'onde.

Sa réalisation est difficile et les techniques mises en œuvre sont lourdes, s'ils sont destinés à fonctionner dans le visible, ça explique pour beaucoup le développement relativement limité de ces structures.

On cite deux méthodes de fabrication de structures 3D qui ont attiré le plus d'efforts de recherche :

I.3.4.1 Structures Tas de bois :

Ces structures 3Ds sont obtenues en déposant par couches successives des rubans de silicium polycristallin dans des tranchées de silice (figure I.12(a)). Des cristaux photoniques semblables ont été fabriqués sur GaAs par Noda et al [18] par un procédé de fusion d'élimination du substrat. Cette technique utilise des techniques standard de micro-fabrication des semi-conducteurs et permet l'introduction déterministe de défauts dans les cristaux fabriqués (figure I.12(b)) [1].

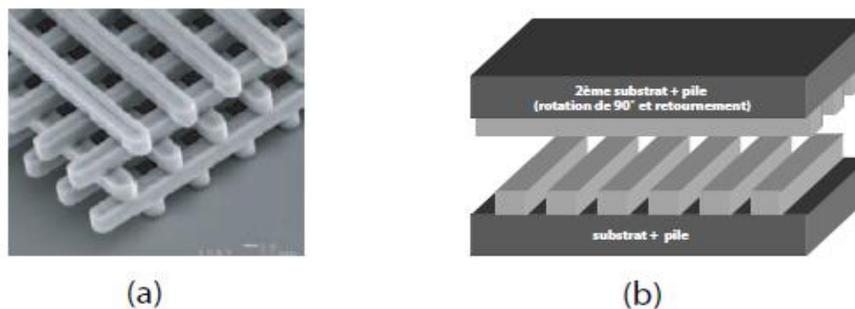


Figure I.12 : Structures tas de bois (a), La même structure peut également être fabriquée sur GaAs pFusion de plaquettes et processus d'élimination de substrats (d'après Noda et al.) (b).

I.3.4.2 Les Opales :

Les opales sont des structures qui forment une famille originale de cristaux photoniques 3Ds qui est constituée de microbilles de silice. La roche est répartie selon un arrangement plus ou moins régulier.



Figure I.13 : une opale.

On peut conclure que malgré les progrès remarquables des techniques de fabrication des structures en 3D ,Ils ne sont pas arrivés à atteindre des performances suffisantes pour envisager leur utilisation dans les prochaines générations de composants pour l'optique intégrée.

I.3.5 Propriétés physiques et géométriques d'un CP-2D :

I.3.5.1 Réseau directe et réciproque :

- Le réseau direct :

Le réseau cristallin est défini dans l'espace réel ou direct selon sa structuration et le type de maille ou alors par son motif qu'on qualifie de direct. Car ce motif est formé d'un ensemble bien défini d'atomes, qui se répète par des translations périodiques dans trois directions non-coplanaires.

Les réseaux directs se regroupent principalement suivant trois familles :

- Le réseau carré : [19]

Ce type de réseau est sensible à la polarisation de l'onde électromagnétique et à l'angle d'incidence. L'obtention d'une bande interdite totale (empêchant la propagation quelle que soit sa polarisation) est très difficile. Le réseau carré est représenté sur la Figure I.14 où les nœuds du réseau sont situés de côté "a" sur un carré.

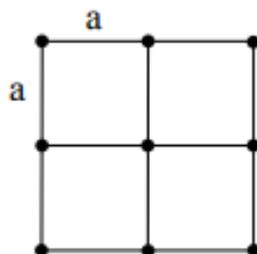


Figure I.14 : réseau carré.

- Le réseau triangulaire : [20]

Ce type de structure est moins sensible à l'angle d'incidence comparé au réseau carré, mais la BIP reste difficile à obtenir. Le réseau triangulaire est représenté sur la Figure I.15 où chaque nœud du réseau est espacé d'une même distance "a" de son proche voisin.

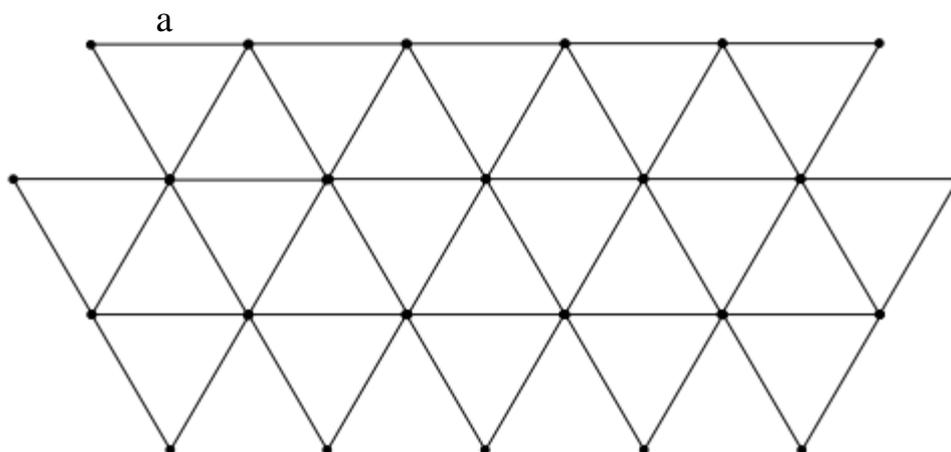


Figure I.15 : réseau triangulaire

- Le réseau hexagonal : [21]

1- La structure graphite : elle est défini par des nœuds qui sont identiques, espacés de “a” (Figure I.16-a). Appelée ‘graphite’ puisqu’elle est similaire à la structure graphite cristalline.

2- La structure Nitrure de Bore : un nœud diffère de son suivant par sa dimension ou sa nature(Figure I.16-b).

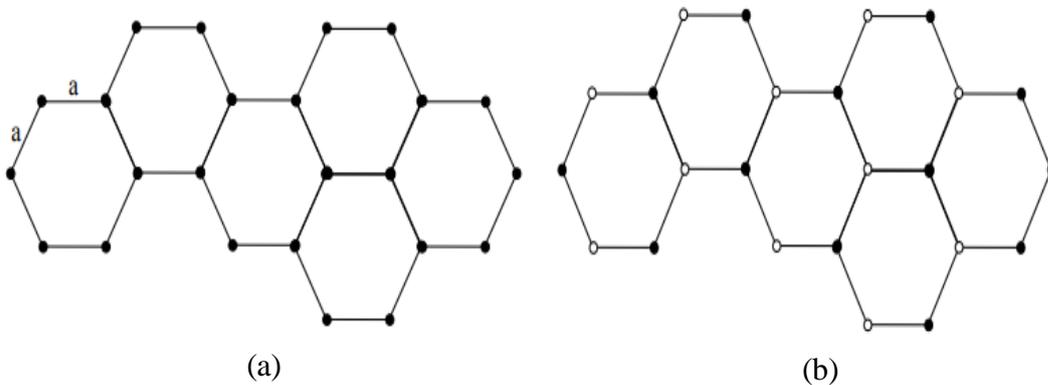


Figure I.17 : structure hexagonale 2D : (a) graphite, (b) Nitrure de Bore

c- Réseau réciproque :

L’intérêt essentiel du réseau réciproque est de définir une base de vecteurs orthogonaux aux vecteurs de base qui portent la périodicité du cristal [22].

La direction Γ K du réseau réciproque correspond à la direction des premiers voisins du réseau réel, la direction Γ M correspond à la direction des seconds voisins (Figure I.7) [23].

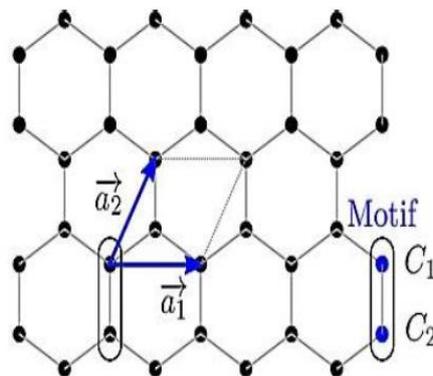


Figure I.18 : Réseau réciproque

I.3.5.2 Zone de Brillouin :

La zone de Brillouin (ZB) est par définition la maille de Weigner-Seitz, c'est des régions qui partitionnent l'espace réciproque associé au cristal et peuvent être définies à l'aide des plans médiateurs (bragg) de l'ensemble des vecteurs formés par des combinaisons linéaires des vecteurs du réseau réciproque. La condition de diffraction de la zone de Brillouin, est donnée par :

$$k \cdot g = \frac{1}{2} |g|^2 \quad (I-3)$$

Avec :

k : le vecteur d'onde qui appartient à la première zone de Brillouin.

g : le vecteur du réseau réciproque.

Nous représentons les vecteurs joignant un site du réseau réciproque à tous les sites voisins, puis on dessine les plans bissecteurs perpendiculaires à ces vecteurs. Le volume le plus petit autour du site choisi limité par ces plans est appelé zone de Brillouin (Figure I.18) [24].

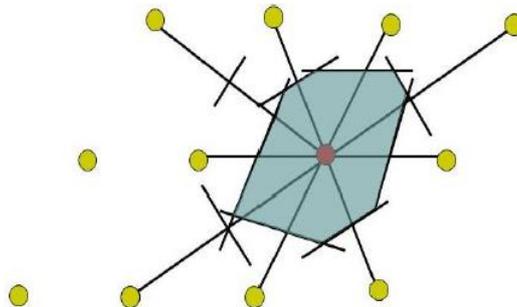


Figure I.19 : La maille de Wigner-Seitz.

La définition de la $n^{\text{ième}}$ zone de Brillouin est l'ensemble des points pouvant être atteint depuis l'origine en croisant $1 - n$ plans de Bragg (Figure I.19).

La zone de Brillouin irréductible est la plus petite surface qui est utilisée pour déduire la relation de dispersion dans l'espace réciproque et la reconstruction de la 1^{ère} zone de Brillouin en utilisant la symétrie du réseau réciproque.

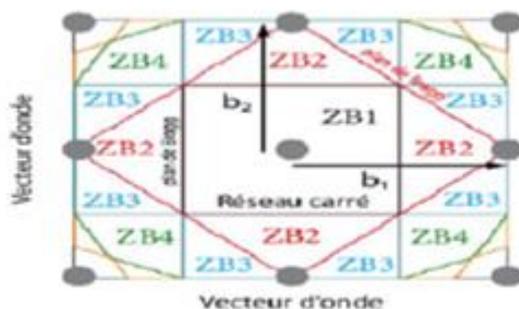


Figure I.20 : Premières zones de Brillouin (ZB) d'un réseau carré. Les plans de Bragg sont tracés en différentes couleurs. La ZB n°3 est atteinte en traversant 2 plans de Bragg (droite noire puis droite rouge).

La figure I.20 illustre la zone de Brillouin irréductible pour un réseau carré et triangulaire.

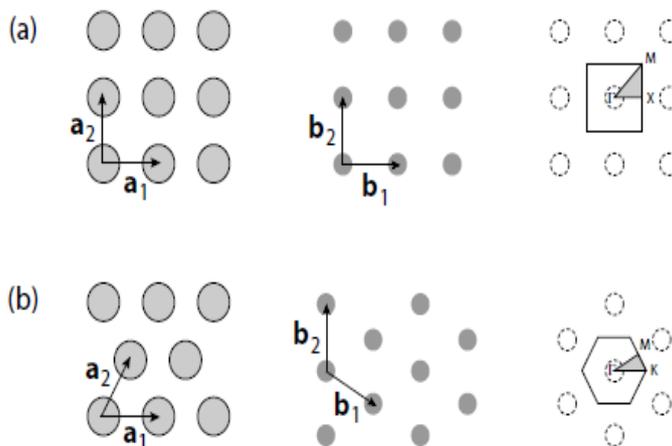


Figure I.21 : (a) réseau carré, (b) réseau triangulaire [1].

I.3.5.3 Facteur de remplissage f :

Le facteur de remplissage définit la cellule élémentaire dans l'espace direct. Pour le réseau bidimensionnel, Celui-ci désigne le rapport entre l'aire du motif et l'aire de la cellule élémentaire du réseau considéré [1], [25]. Elle est donnée par l'équation (I-4) :

$$f = \frac{A_{motif}}{A_{mail\ élémentaire}} \tag{I-4}$$

Le tableau I-1 montre les propriétés géométriques des réseaux carré et triangulaire.

	Réseau carré	Réseau triangulaire
Vecteurs directs	$\mathbf{a}_1 = (1, 0); \mathbf{a}_2 = (0, 1)$	$\mathbf{a}_1 = (1, 0); \mathbf{a}_2 = (\frac{1}{2}, \frac{\sqrt{3}}{2})$
Vecteurs réciproques	$\mathbf{b}_1 = \frac{2\pi}{a}(1, 0); \mathbf{b}_2 = \frac{2\pi}{a}(0, 1)$	$\mathbf{b}_1 = \frac{2\pi}{a}(1, -\frac{1}{3}\sqrt{3}); \mathbf{b}_2 = \frac{2\pi}{a}(0, \frac{2}{3}\sqrt{3})$
Facteur de remplissage	$\pi \frac{R^2}{a^2}$	$\frac{2\pi}{\sqrt{3}} \frac{R^2}{a^2}$

Tableau I-1 : Propriétés élémentaires des réseaux carré et triangulaire [1].

I.4 Méthode des ondes planes (PWE) :

La méthode des ondes planes (en anglais plane wave expansion method) est l'une des méthodes les plus utilisées et bien adaptées pour le calcul de structure de bandes photoniques infiniment périodiques ainsi pour déterminer, la polarisation, la symétrie, la fréquence, ainsi que la distribution du champ pour les modes d'une structure photonique.

L'étude de certaines structures non périodiques via une technique de super cellule, comme les guides à cristaux photoniques ou les cristaux photoniques planaires. Mais quand il s'agit d'une structure qui ne présente pas de véritable périodicité lorsqu'il a une variation du facteur de remplissage par exemple, le théorème de Bloch n'est plus valable et impose de recourir à la méthode des différences finies dans le domaine temporel [1].

I.4.1 Equations de Maxwell :

La PWE transforme un problème aux valeurs propre dans le domaine fréquentiel, permettant de résoudre les équations de Maxwell.

Dans un milieu diélectrique linéaire, de constantes diélectrique $\epsilon(\mathbf{r})$, non magnétique, sans courant ni charge, les équations de Maxwell s'écrivent selon l'évolution spatiales et temporelles du champ magnétique et électrique :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (I-5)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = 0 \quad (I-6)$$

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

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (I-8)$$

Où :

ε est la permittivité diélectrique.

μ_0 est la perméabilité magnétique du vide.

\vec{H} et \vec{E} sont respectivement le champ électrique et le champ magnétique.

\vec{B} est le vecteur de l'induction magnétique.

Ces derniers amènent aux équations d'onde dont le milieu est homogène, non magnétique en absence de charges isotrope c'est-à-dire que la propagation de l'onde dans le matériau est en absence d'excitation extérieure et d'amplitude des champs associés.

$$\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{E}(\vec{r})) = \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon_r(\vec{r}) \cdot \vec{E}(\vec{r}) \quad (I-10)$$

$$\vec{\nabla} \times \left[\frac{1}{\varepsilon_r(\vec{r})} \vec{\nabla} \times \vec{H}(\vec{r}) \right] = \frac{\omega^2}{c^2} \vec{H}(\vec{r}) \quad (I-9)$$

Où :

$c = 1/\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}$ est la vitesse de la lumière dans le vide ($c=3.10^8 \text{ ms}^{-1}$)

ω : pulsation.

\vec{r} est le vecteur de position .

En faisant une analogie avec la physique du solide, ça nous permet de réutiliser tous les outils de la cristallographie, qui sont liés à la périodicité du réseau. L'opérateur correspondant à l'équation (I-11) commute avec les opérateurs de translation du réseau cristallin. Il est hermitien et prend la forme :

$$\overrightarrow{H}_{\vec{k}}(\vec{r}) = \overrightarrow{u}_{\vec{k}}(\vec{r}) \cdot e^{i\vec{k} \cdot \vec{r}} \quad (I-11)$$

Où la fonction $\overrightarrow{u}_{\vec{k}}(\vec{r})$ a la périodicité du réseau.

L'indice k signale que la fonction $\overrightarrow{u}_{\vec{k}}(\vec{r})$ dépend du vecteur d'onde \vec{k} .

Les solutions de l'équation (I-11) représente les fonctions de Bloch qui sont à la base de la théorie des bandes d'énergie car elles expliquent les sauts d'énergie (gap) entre les différentes bandes. La résolution de l'équation peut se faire par la méthode de diagonalisation, pour différentes valeurs du vecteur d'onde \vec{k} .

On montre que comme en Physique du Solide, certaines symétries du cristal, on peut limiter leurs étude aux vecteurs \vec{k} qui est situés sur une zone restreinte (première zone de Brillouin).

On peut résoudre un système d'équations aux valeurs propres, où la valeur propre est ' ω ' et le vecteur propre associé est $\overrightarrow{H}_{\vec{k}}$.

la structure de bande $\omega_n(\vec{k})$ du cristal photonique, est donné par l'ensemble des solutions discrètes de ω , où l'entier n désigne le numéro de bande.

Quand \vec{k} (le vecteur d'onde) parcourent la zone de Brillouin, les bandes $\omega_n(\vec{k})$ recouvrent le spectre entier d'énergie. Toutefois, dans certaines configurations, il existe des intervalles d'énergie où aucune bande $\omega_n(\vec{k})$ n'est disponible : ce sont les bandes interdites aux photons [12].

Cette méthode a été utilisée pour les structures triangulaires bidimensionnelles ainsi que la structure du graphite en déterminant leur bande interdite photonique.

I.4.2 Diagramme de bande :

Le diagramme de bande est l'une des caractéristiques, la plus importante d'un cristal photonique, permettant de représenter, les variations dans le réseau, des fréquences permises qui sont en fonction du vecteur d'onde projeté suivant les directions de haute symétrie de celui-ci. A l'aide de la loi d'échelle qui permet la transposer des propriétés des cristaux photoniques à tout le domaine fréquentiel.

Pour calculer les diagrammes de bandes il faut considérer pour chaque cristal, toutes les directions de propagation possibles, Comme en physique du solide [26].

I.4.2.1 Diagramme de bande d'un miroir de Bragg (1D) :

La figure I.21 présente un exemple de diagramme de bande d'un miroir de Bragg calculé par la méthode des ondes planes [27]. Chaque alternance du miroir est constituée d'une couche diélectrique de permittivité $\varepsilon_1=13$, et d'une couche d'air de permittivité $\varepsilon_2=1$. Il est noté également que l'épaisseur optique de chaque couche est relativement proche.

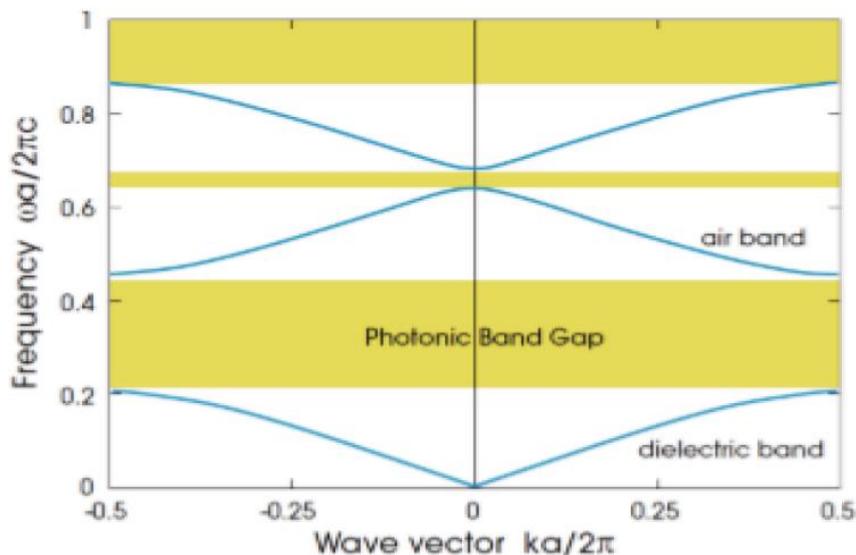


Figure I.22 : Diagrammes de bandes d'un miroir de Bragg (1D) [27].

I.4.2.2 Diagramme de bande CP-2D :

Dans les cristaux 2D, la propagation des ondes électromagnétique, peuvent être séparées en deux polarisations TE ou TM, dans un plan perpendiculaire aux tiges. Sachant que la

polarisation électrique TE : est le cas où le champ \vec{E} est en parallèle avec les cylindres infinis. Tandis que celle magnétique TM correspond au cas où \vec{E} leur est perpendiculaire (Figure I.22).

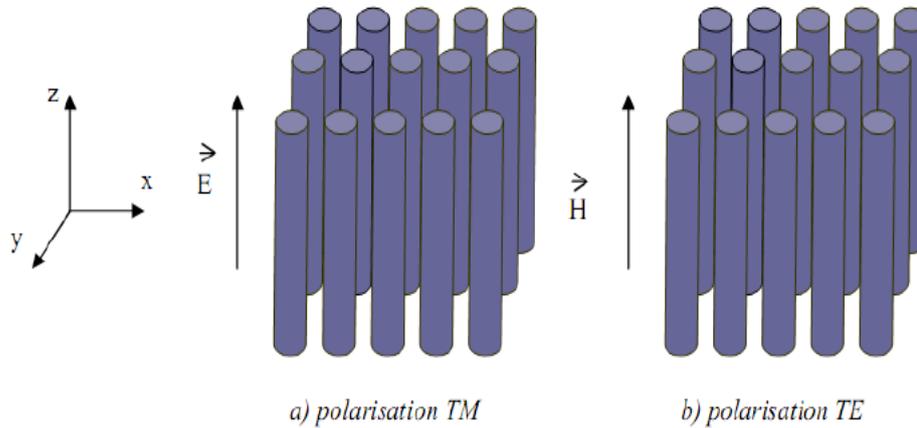


Figure I.23 : Représentation des polarisations TE et TM dans un BIP 2D.

En utilisant la méthode de décomposition en ondes plane ,ça nous a permis de voir les diagrammes de bandes d'un cristal photonique en mode TE et TM pour un réseau triangulaire qui est gravé sur un substrat de GaAs dont le facteur de remplissage est $f=30\%$ [28].

La Figure I.23 représente :

Les fréquences des modes calculés en fonction du parcours fait par le vecteur d'onde lorsqu'il décrit le contour formé par les points de haute symétrie Γ , M, K de la première zone de Brillouin.

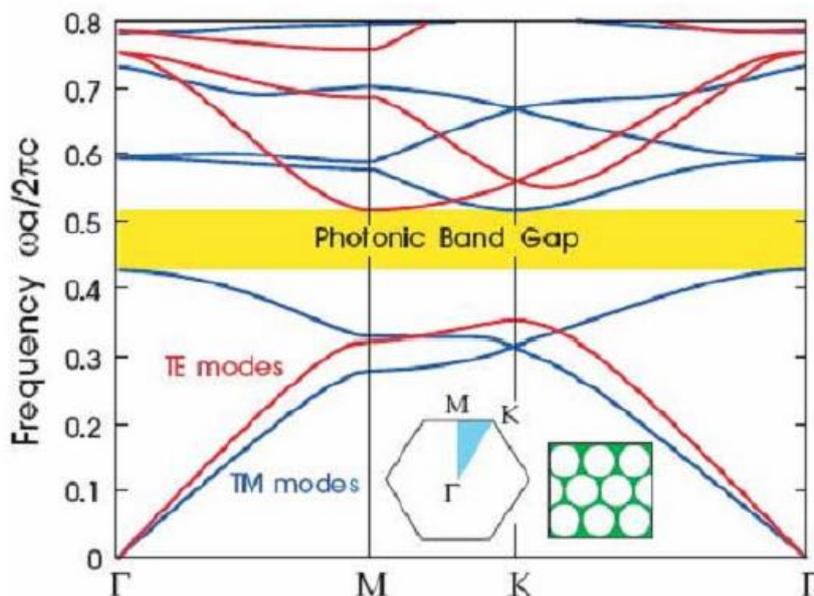


Figure I.24 : Diagramme de bande d’un BIP 2D en polarisation TM et TE [29].

Selon la figure I.23, on remarque que la bande interdite s’ouvre seulement pour un mode TE.

La figure (I.24) illustre les résultats théoriques à travers l’exemple d’un cristal photonique 2D formé d’un réseau carré, et triangulaire pour les deux polarisations TE et TM la structure représente une matrice bidimensionnelle de trous d’air ($n_{air} = 1$) dans du silicium ($n_{Si} = 3,5$). Le diamètre des trous est égal à $0,288a$ dans les deux structures, ce qui correspond à des facteurs de remplissages différents selon le réseau ($f=0,26$ pour le réseau carré, $f=0,30$ pour le réseau triangulaire) [2].

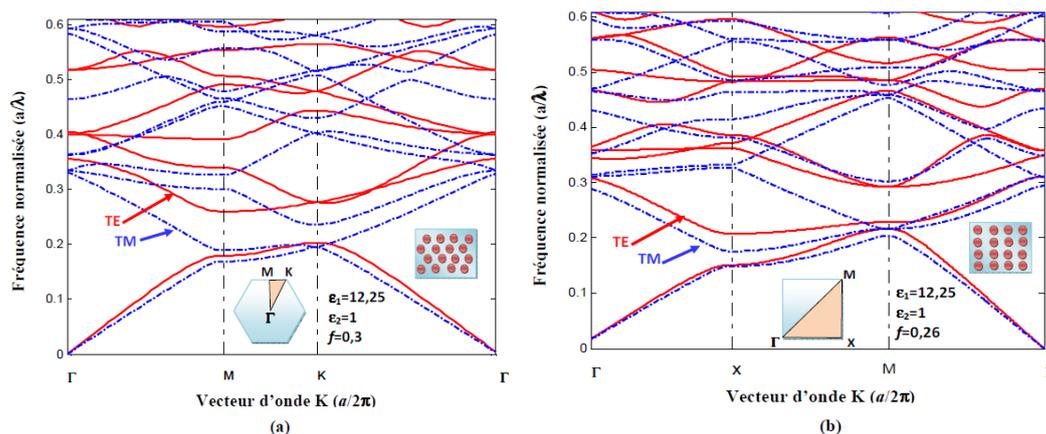


Figure I.25 : Diagrammes de bandes des CP2Ds de trous d’air dans une matrice de diélectrique ayant l’indice du silicium. Le calcul a été effectué par la méthode des ondes planes sous environnement matlab pour les polarisations TE (lignes rouges) et TM (pointillés bleus) . (a) réseau triangulaire, (b) réseau carré [2] .

Une bande interdite est observée pour la polarisation TE pour $u=0.21-0.27$ dans le cas des réseaux triangulaires. Pour la polarisation TM, aucune bande interdite n'apparaît pour les Cristaux considérables. En effet, les bandes interdites TE s'ouvrent généralement pour des zones de forts indices connectées, tandis que l'ouverture de bandes TM est plutôt favorisée par des zones de forts indices isolées comme des piliers diélectriques dans l'air [29].

Pour les polarisations TE et TM, le réseau carré présente l'absence de la bande interdite photonique. Donc l'obtention de la plus grande BIP est sur un réseau triangulaire dans un diélectrique en polarisation TE [2].

Théoriquement, nous ne pouvons obtenir une bande interdite complète que dans le Cas des structures 3D, où il n'y a aucune propagation de l'onde incidente.

I.4.2.3 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 (I.25) 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 marqués dans l'encadré.

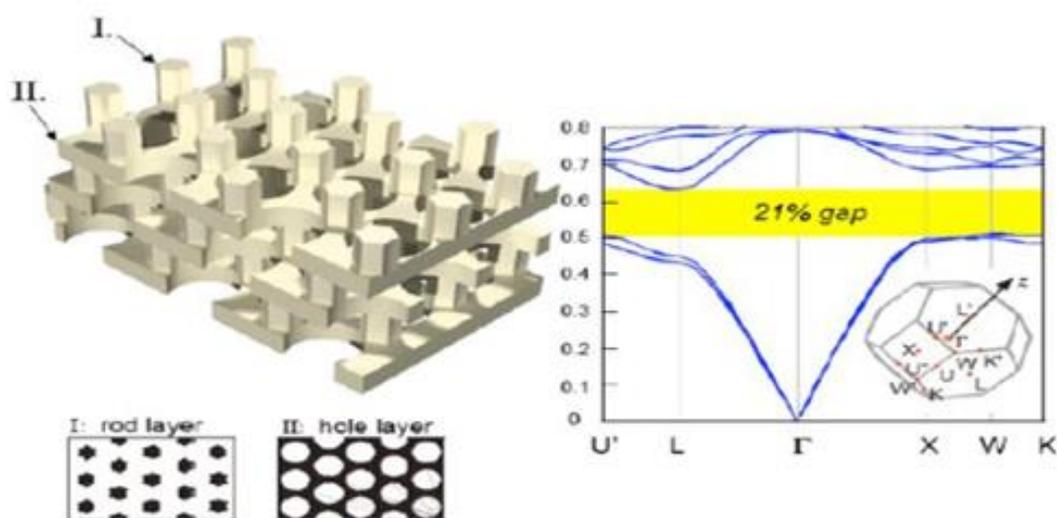


Figure I.26 : Diagramme de bande d'un CP-3D [30].

Il a été possible avec les progrès de la micro fabrication, d'observer des bandes interdites tridimensionnelles complètes dans le proche infrarouge, pour des structures du type « tas de bois » [31].

I.4.3 Carte des Bandes :

En calculant le diagramme de bande, ça nous a permis de se renseigner sur la bande interdite pour chaque polarisation TE et TM. Il est possible de montrer la position de la BIP en fonction du facteur de remplissage grâce à la carte de bande interdite.

Selon la figure I.26, on constate que pour le réseau carré, les bandes interdites TE et TM s'ouvrent respectivement pour $f = 35\%$ et $f = 50\%$.

La BIP s'ouvre pour un réseau triangulaire respectivement pour $f = 11\%$ et $f = 63\%$. L'intersection des bandes interdites TE et TM correspond à la région de la BIP complète et se situe dans la fenêtre d'énergie $u = 0:37; 0:56$. Les bandes interdites d'un réseau triangulaire en mode TE s'ouvrent pour des facteurs de remplissage plus faibles et sont plus large, ce qui les rend meilleur comparer aux réseaux carrés. On peut conclure que lorsqu'il y a une augmentation du facteur de remplissage, les énergies des bords de bandes se décalent vers les énergies hautes [1].

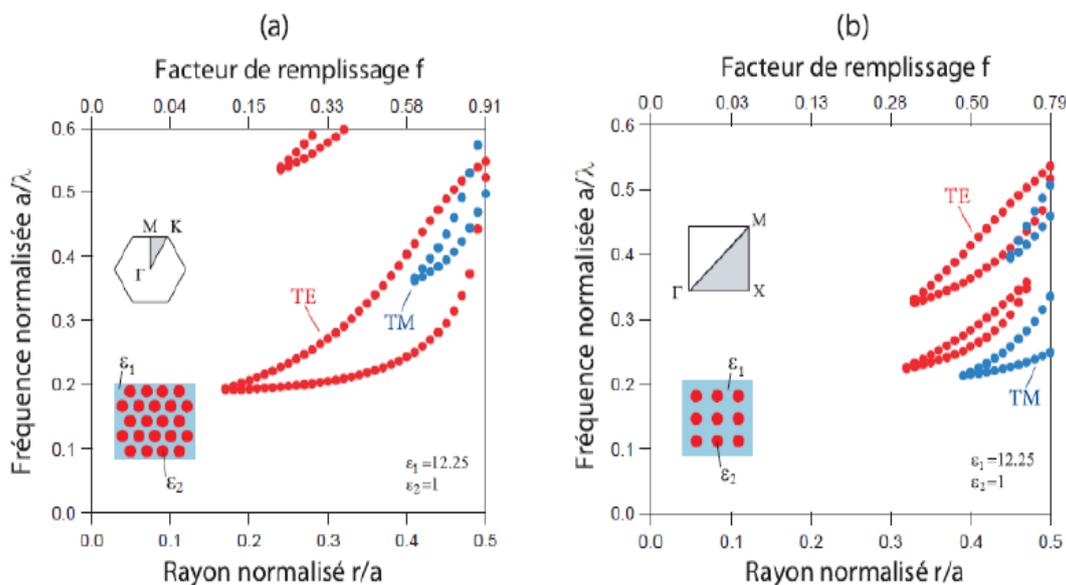


Figure I.27 : Cartes des bandes interdites d'un réseau de trous d'air dans une matrice diélectrique ($\epsilon=12.25$) : (a) réseau triangulaire, (b) réseau carré [32].

I.5 Les défauts :

Les défaut peuvent être introduit volontairement dans les cristaux photonique ,comme dans les semi-conducteur [33] .

La création de défauts dans la périodicité de la structure permet l'ouverture d'une bande d'énergies permise dans la bande interdite photonique [34] [35].

Il existe plusieurs types de défauts :

I.5.1 Défauts ponctuels :

La modification des caractéristiques d'une cellule du réseau, induit à créer des défauts ponctuels

Pour le cas des CP qui sont composés de cylindres diélectriques, la constante diélectrique d'un cylindre peut être changée ou enlevé, ce qui vas créer une lacune dans le cristal.

Les cristaux photoniques composé de trous dans un matériau diélectrique, peuvent être modifiés géométriquement (figure I.27).

les modes de défaut sont des modes électromagnétiques introduits par le défaut ayant une fréquence appartenant à la BIP, qui peut être localisé autour du site du défaut [7].

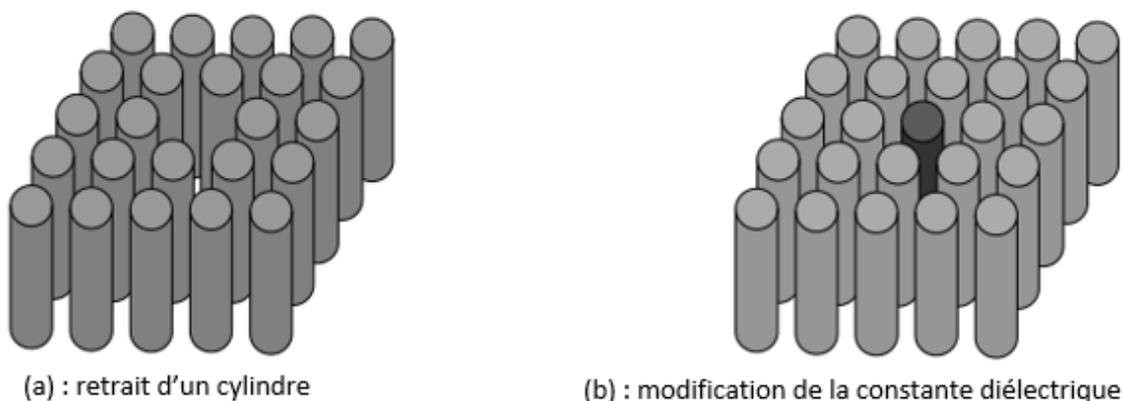


Figure I.28 : Exemples de défauts ponctuels dans un cristal photonique composé de tiges diélectriques.

Il existe deux types de défauts ponctuels :

I.5.1.1 Lacunaire :

Suivant la figure I.28, une lacune est un site du réseau ne contenant aucun motif, aucun atome [36].

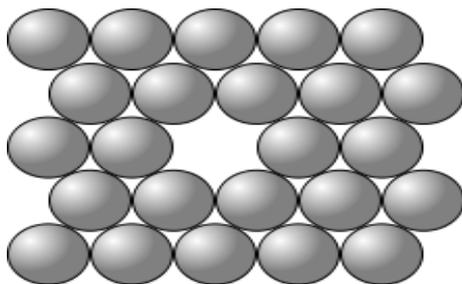


Figure I.29 : défaut ponctuel lacunaire.

I.5.1.2 Solutions solides :

Une solution solide est une situation dans laquelle un cristal contient des « atomes étrangers ».

On a deux types de solution solide :

a- En substitution :

L'atome étranger remplace une des atomes du cristal.

b- En insertion :

L'atome étranger se glisse dans les espaces vides [36].



Figure I.30 : Représentation schématique de l'interférence des ondes réfléchies par chaque dioptré.

I.5.2 Les défauts étendus :

Les défauts à une dimension D1 (W1) (Figure 1.29), sont ceux qui sont les plus intéressante pour de nombreuses études puisqu'ils ont la vocation d'être utilisés autant que guides de lumière au sein d'un cristal.

On peut donc imaginer des défauts à deux dimension 2D (W2) ou à trois dimension 3D (W3) constitués d'une suite de guides W1, qui est mis bout à bout et l'orientés vers des différentes directions, afin de véhiculer la lumière sur tous possibles chemin à l'intérieur du cristal. Le guide d'onde linéaire W1 dans un CP-2D est considéré comme l'exemple de base.

La réalisation d'un tel guide consiste à introduire des défauts ponctuels, couplés et espacés régulièrement, dans une direction du CP-2D. Le fait de coupler entre plusieurs ou même une infinité de résonateurs amène à une bande de propagation permise dans la direction de l'alignement. La proposition du guide à résonateurs couplés a été en 1999 [37].

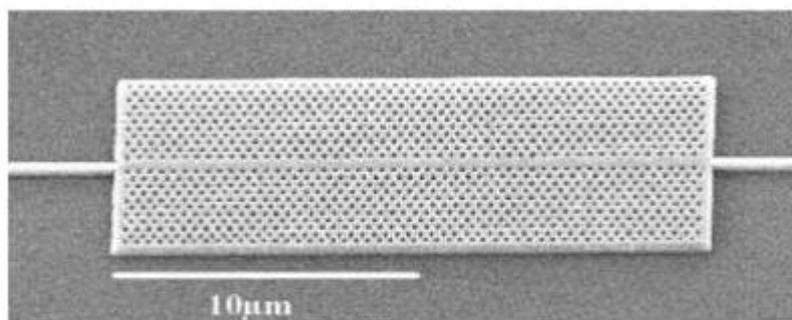


Figure I.31 : Exemple de guide W_1 à cristal photonique hexagonal de trous d'air sur un substrat de silicium sur isolant.

I.6 Les méthodes d'analyse des cristaux photoniques :

I.6.1 La méthode FDTD (Finite-Difference Time-Domain) :

Les méthodes FDTD constituent une approche très populaire qui a d'abord été développée par Yee [38], en 1966, pour l'analyse de problèmes en électromagnétisme.

L'approche est basée sur une approximation par différences finies des dérivées spatiales et temporelles des variables recherchées : pression et vitesse particulières dans le cas de l'équation de propagation des ondes [39] [40].

Les variables sont directement calculées en des temps discrets, ce qui permet de bien modéliser des phénomènes transitoires, des bruits aléatoires, des impulsions et de bien prendre en compte des effets non linéaires [41].

La formulation de base suppose une discrétisation spatiale sous forme d'un maillage cartésien avec un pas d'échantillonnage constant de la région modélisée [42].

Le maillage doit être précis, ce qui nous amène très vite à de gigantesques occupations mémoires. Puisque la réponse fournie est une évolution temporelle, plusieurs cycles de calculs sont établis avant d'atteindre le régime permanent qui caractérise par exemple la réponse à une onde monochromatique. Ce dernier point peut se contourner en récupérant la réponse impulsionnelle et en lui appliquant une transformée de Fourier, mais même ainsi les temps de calculs demeurent très longs.

D'autres points importants de cette méthode sont un artefact mathématique qui à le comportement d'une source d'onde électromagnétique et les conditions sur les bords de l'espace maillé, en utilisant la condition de Bérenger qui est plus connue sous le nom de PML (Perfectly Matched Layer) empêchant toute réflexion. Cette méthode fournit les diagrammes de rayonnement, la transmission ainsi que les cartes de champ en traitant les matériaux linéaires comme non linéaire

L'exécution en parallèle se prête très bien à la méthode FDTD, sur de nombreux processeurs comme dans une grappe qui est plus connue sous le nom de « cluster » ou comme dans un supercalculateur, qui dans les années à venir, devrait encore augmenter sa popularité pour plus grands progrès qui sont utilisés dans ce domaine actuellement [43].

I.6.2 La méthode de matrice de transfert (TMM):

La méthode de matrice de transfert est une technique analytique, souvent utilisée pour déterminer les coefficients de réflexion et de transmission des empilements unidimensionnels [44], mais a été adaptée au cas bidimensionnel par Pendry [45] [46]. Au lieu de se transformer en espace de Fourier, TMM est basé sur la représentation des équations de Maxwell sur un réseau discret (cartésien, en général) de vrais points spatiaux. Les équations discrètes résultantes sont refondues sous la forme d'une matrice de transfert qui relie les champs électriques et magnétiques dans une couche de treillis point vers ceux de la couche suivante [47].

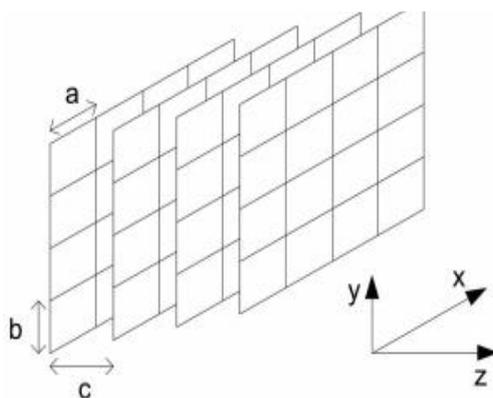


Figure I.32: Discretisation spatiale cartésienne appliquée dans TMM [47].

Par cette méthode il est possible de remonter à la structure de bande puisque les calculs se font en fonction de la fréquence qui, ici est variable. De plus, l'éventuelle dépendance en fréquence du constant diélectrique sera plus facilement prise en compte [2].

I.6.3 Méthode des éléments finis FEM :

La méthode de l'élément fini a été utilisée pour résoudre des problèmes de mécanique de structures. Quelques années plus tard, elle a été appliquée à l'électromagnétisme. Depuis, elle s'étend à tous les domaines de la physique et de l'ingénierie, où il existe des équations aux dérivées partielles à résoudre [6].

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 [48] [49].

Pour des géométries planes, on utilise le plus souvent des triangles comme éléments de base. Pour des problèmes tridimensionnels, ce sont des tétraèdres la plupart du temps.

Ces éléments bi- et tridimensionnels sont très utilisés parce qu'ils permettent de réaliser des maillages à pas variable (Figure I.32). Le maillage s'adapte aux structures courbes [6].

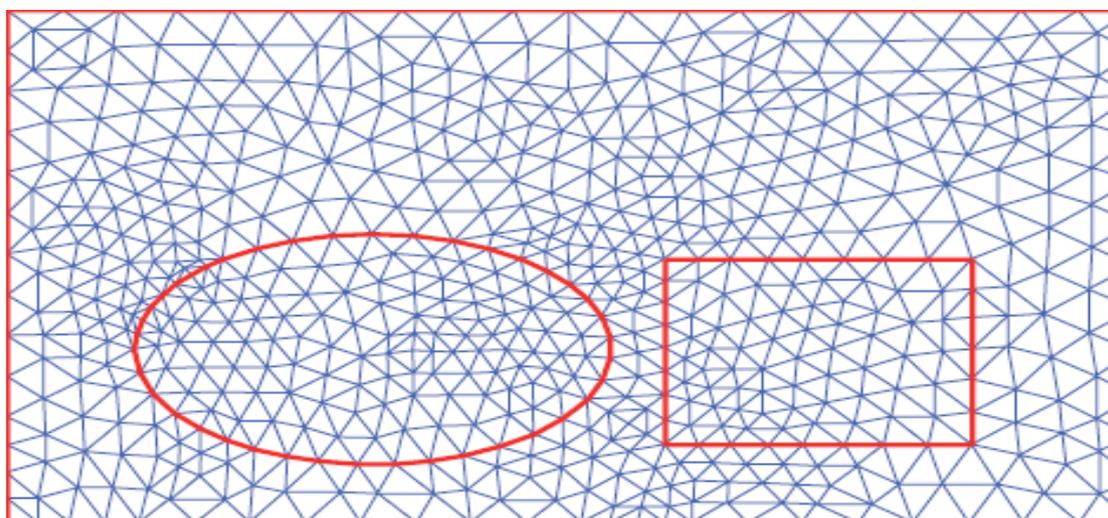


Figure I.33 : Maillage triangulaire adaptatif [47].

I.6.4 La méthode des réseaux de diffraction :

La diffraction est une notion qui est très bien connue et largement exploitée en optique. Elle est basée sur une description du CP comme un ensemble successif de réseaux de diffraction. Les réseaux de diffraction permettent la décomposition de lumière en un spectre de couleurs dispersées dans différentes directions [50].

L'application de la théorie des réseaux est utilisée afin de relier une région à l'autre, les coefficients de cette décomposition. Le système obtenu de la relations matricielles permet d'établir la matrice de diffusion [S] qui caractérise le milieu [51] [52] [53].

L'intérêt de cette méthode est qu'elle donne les modes guidés et les résonances (qui représentent les pôles de la matrice de diffusion), mais aussi leurs pertes intrinsèques.

I.6.5 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 :

$$a_n(R, r) = \frac{\Omega^1/2}{(2\pi)^3/2} \int_{BZ} H_n(k, r) e^{-ik \cdot r} dk \quad (I-12)$$

Cette méthode semble être particulièrement rapide pour la détermination des états liés à des défauts dans le cristal [2].

I.7 LES APPLICATIONS :

I.7.1 Guides d'onde : [54]

Auparavant il existait des guides d'onde classique qui consistent à propager l'onde dans le diélectrique à fort indice puis elle est réfléchié dans un diélectrique d'indice plus faible. Mais maintenant Il est possible de choisir la direction de la lumière guidée, en introduisant un défaut linéaire qui consiste à émettre plusieurs rangés de motifs élémentaires. La lumière qui se propage tous au long du guide a une fréquence qui se trouve dans la bande interdite du cristal photonique.

Les guides d'onde BIP présentent de faible perte au niveau de la courbure par rapport aux guides d'onde classique. Comme le montre la figure I.33 :

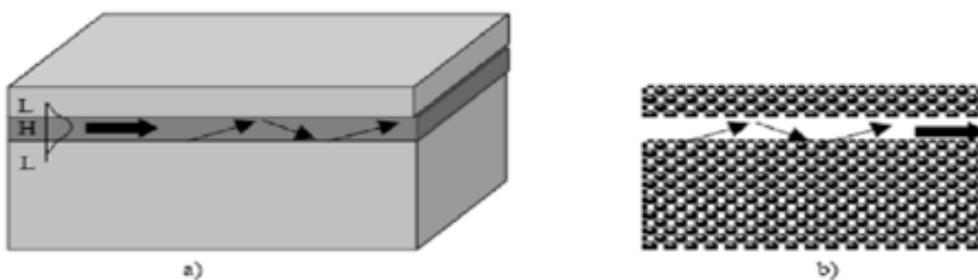


Figure I.34 : a) Guide réfractif : modèles de rayons en zig-zag avec réflexions totales et ondes évanescentes b) Guidage par bande interdite photonique.

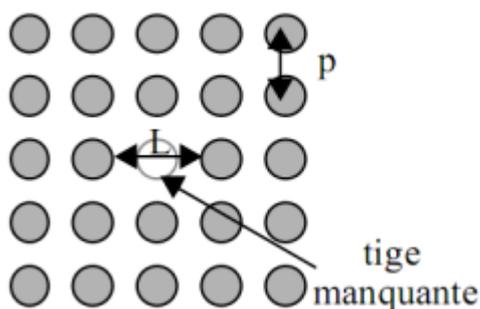


Figure I.35 : la structure de réseau carré diélectrique de tiges d'alumine pas=3mm, d=1,5mm.

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.

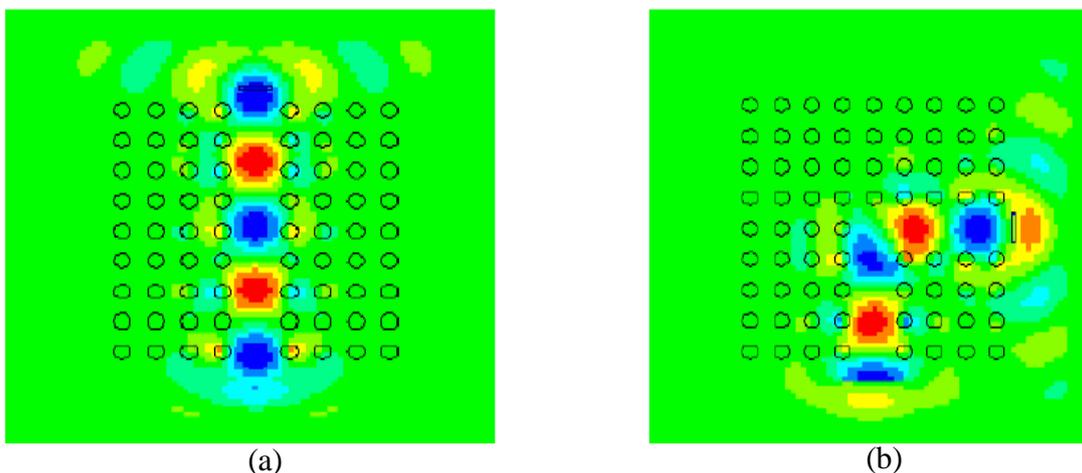


Figure I.36 : la distribution du champ est autour du défaut en polarisation. (a)Rectiligne (b)Courbures 90°(simulée par le logiciel Rsoft).

I.7.1.1 Guide en termes de transmission :

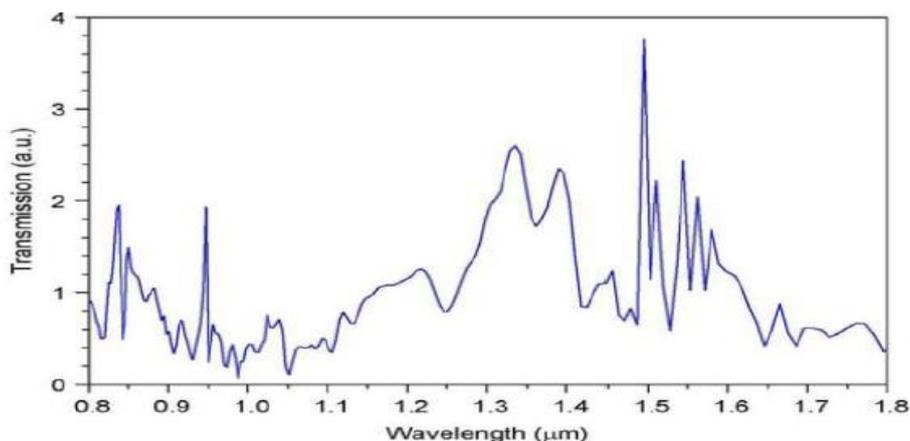


Figure I.37 : Spectre de transmission en mode ΓK et ΓM d'une structure W5 du réseau triangulaire de trou d'air de facteur de remplissage $r/a = 0.27$ dans Ti : LiNbO₃ [56].

On remarque sur la figure I.37 que la transmission est favorisée autour de $1.55 \mu m$ et qu'aucune bande interdite n'est apparue.

I.7.2 Filtre add / drop :

Le filtre add/drop est composé de 2 guides d'ondes couplés par un ou deux résonateurs [56]. Son principe est le transfert sélectif et directif de la lumière qui se propage au premier guide d'onde vers un second guide par l'intermédiaire d'un résonateur. Le mode de fonctionnement de ce filtre est imposé selon les symétries des modes présents dans le résonateur.

Comme est montré sur la figure qui représente le filtre add/drop et son principe de fonctionnement d'un système 4 accès constitué d'un résonateur en anneaux et 2 guides d'onde dont le 1^{er} guide est « le bus » et le second est « le drop ».

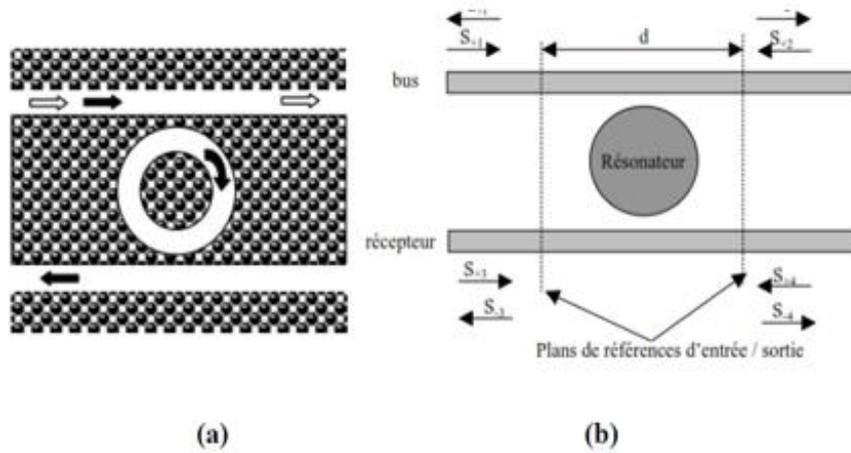


Figure I.38 : (a)Représentation d’un filtre add /drop (b)Principe de fonctionnement. Système à 4 accès constitué d’un résonateur en anneaux et de deux guides d’ondes [56].

La figure I.38 représente les spectres d’un résonateur hexagonal (ADF) de transmission normalisée qui est conçu sur un CP-2D de trous d’air suivant un réseau triangulaire.

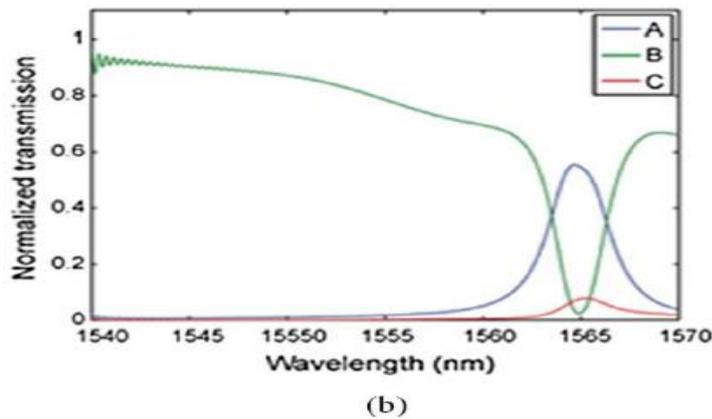


Figure I.39 : spectre de transmission normalisé à base d’un résonateur hexagonal [57].

On remarque sur cette figure, un pic de résonance qui apparaît à 1564,5 nm avec un facteur de qualité de 423. Les performances de couplage est de 98% et les chutes observées dans le spectre sont de 60%.

I.7.3 Cavité résonante :

Un défaut dans un CP permet l'existence de modes, qui sont localisés dans une bande très étroite de fréquence, un défaut dans un CP peut donc servir de cavité résonante en piégeant la lumière dans une bande très étroite de fréquence. Une modification très simple d’une des propriétés du matériau permettra de libérer la lumière (par application d’un champ électrique par exemple) [58].

Dans le cas de cristaux d'un CPs-2D réalisés dans un réseau triangulaire de trous d'air, une cavité est réalisable en modifiant les paramètres d'un ou plusieurs trous dans un CP, soit en déplaçant des trous de leurs positions originales, ou en changeant le rayon des trous, ou bien même 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 [59].

La figure I.39 représente des images prises sur microscope électronique à balayage (MEB) qui montre des exemples de ces deux types de cavités :

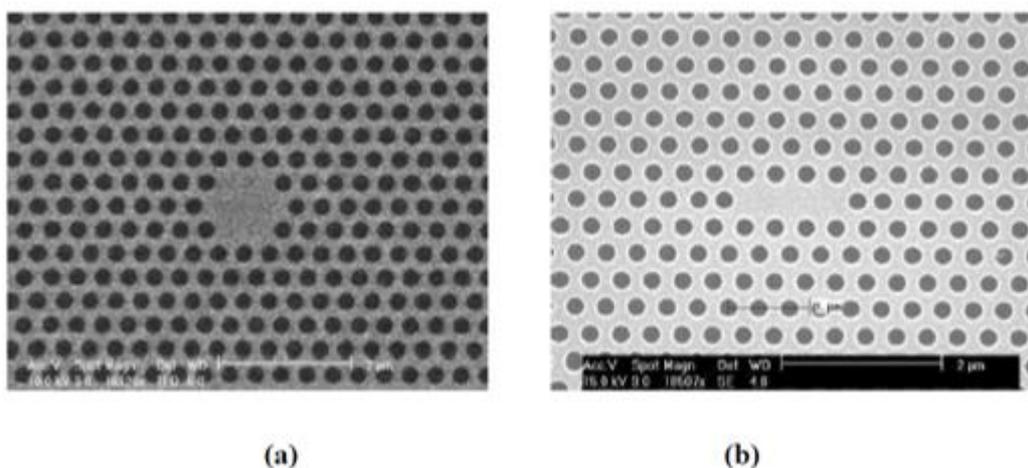


Figure I.40 : Images MEB des cavités de type H2 (a), et de type L3 (b) fabriquées dans la salle blanche de l'IEF [60].

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.

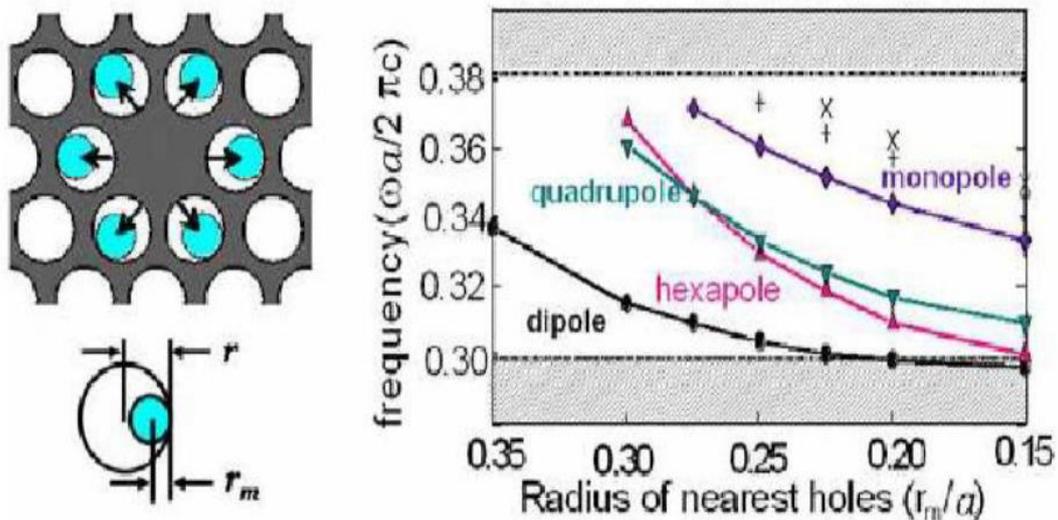


Figure I.41 : Exemple d’ingénierie de défauts. Une cavité H1 modifiée [61] [62] .

I.7.4 DEMUX-coupler :

Les propositions de démultiplexeurs à cristaux photoniques [63] [64] tendent à favoriser des cavités très petites (quelques périodes) et la fonctionnalité « add-drop », la plus exigeante [65] .

Le principe du dispositif proposé (faisant l’objet d’une demande de brevet) 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-stopband [66] [67], dont la largeur typique est de 3-20 nanomètres à 1500 nm, tout fait adaptée au coarse WDM (CWDM), et donc aux réseaux métropolitains.

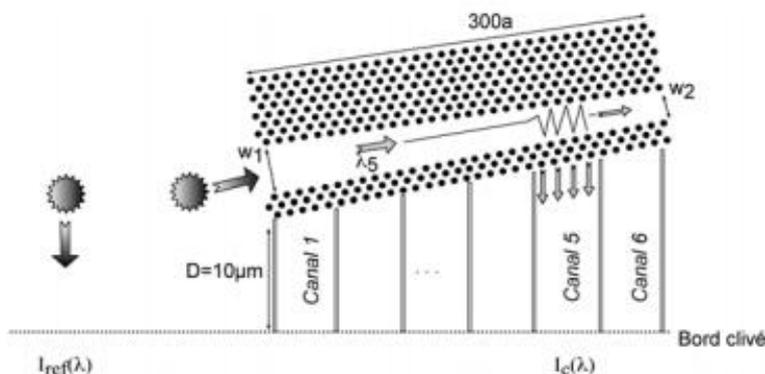


Figure I.42 : principe du démultiplexeur/ spectrographe : le guide PC de largeur. Proche de « W3 » couple le mode fondamental au mode d’ordre supérieur uniquement dans la section où la diffraction de

Bragg entre les deux modes est autorisée. Ce mode est ensuite extrait latéralement à travers les trois rangées de trous.

Comme le montre la Figure (I.41), il suffit en première approximation d'affiner une des parois du guide et de varier lentement un de ses paramètres (la largeur dans l'illustration, mais ce pourrait être aussi la période) : une longueur d'onde donnée est alors aiguillée dans une section donnée parce que le couplage au mode d'ordre supérieur n'a lieu que dans cette section-là, et la paroi affinée laisse la lumière du mode d'ordre supérieur sortir latéralement, alors que le guidage du mode fondamental reste très robuste à toutes les longueurs d'onde restantes, l'effet tunnel sur ce mode « réfractif » étant très faible.

La Figure (I.42) (a), (b) 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, comme indiqué en Figure (I.42) (c).

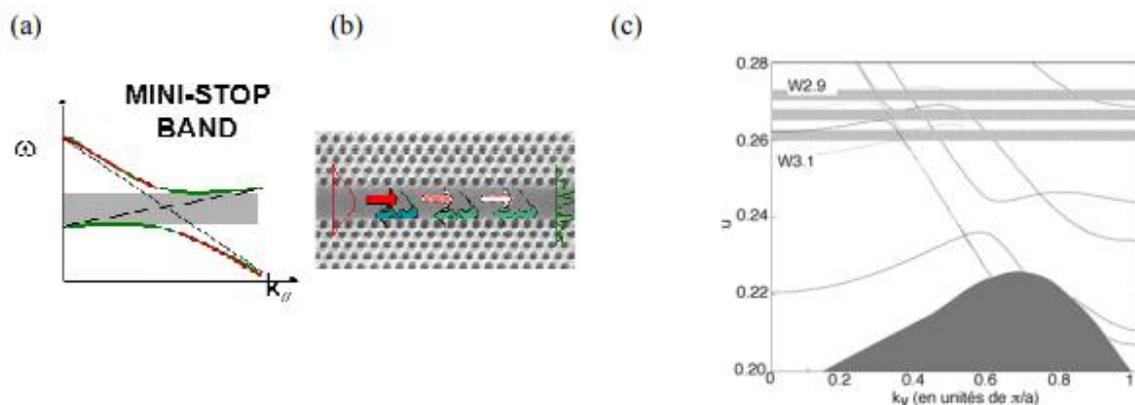


Figure I.43 : illustration de l'utilisation de la mini-stopband : (a) relation de dispersion locale, le mode fondamental étant le plus raide, le mode d'ordre supérieur le moins raide ; (b) schéma du couplage de mode dans le guide W3 ; (c) superposition des relations de dispersion pour des guides dont 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-stopband bien séparées [68].

I.8 Conclusion :

Les cristaux photoniques sont des matériaux hautement ordonnés qui possèdent une constante diélectrique modulée périodiquement, avec les propriétés de contrôler la propagation de la lumière en raison de l'existence d'une bande interdite photonique, une bande de fréquence dans laquelle la propagation de la lumière dans le cristal photonique est interdite. Par conséquent, les cristaux photoniques sont aussi connus sous le nom de matériaux à bande interdite.

Dans ce chapitre nous avons énoncés les concepts de base sur les cristaux photoniques, tout d'abord nous avons définies les types de cristaux photoniques à savoir naturels et artificiels en passant par les cristaux photoniques unidimensionnels, bidimensionnels et tridimensionnels, nous avons également parler des diagrammes de bandes et cartes de bandes.

Nous avons énuméré les différents défauts qui sont les défauts ponctuels et étendus ; et nous avons également abordée les différentes techniques d'analyse qui sont la méthode fdtd, la méthode de matrice de transfert, la méthode des éléments finis et des réseaux de diffraction et la méthode des liaisons fortes. En raison de leur caractéristiques uniques, les applications potentielles des cristaux photoniques sont très prometteuses, telles que les guides d'ondes, filtre add /drop, cavité résonante et DEMUX-coupler.

Chapitre II

Démultiplexage
En cristaux photoniques

II.1 Introduction :

Les cristaux photoniques ont proposé de nouvelles possibilités pour la conception de 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 en PhC est très similaire à celui des électrons dans les semi-conducteurs, de sorte que, comme les semi-conducteurs, ces structures artificielles ont une zone de fréquence (ou de longueur d'onde) interdite pour la propagation des ondes lumineuses qui s'appelle Photonic Band Gap (PBG). Cette propriété a résolu le défi de confiner les ondes lumineuses à l'intérieur des structures PhC, concevant donc des dispositifs optiques tels que des filtres optiques des démultiplexeurs optiques et des commutateurs optiques et des portes logiques avec des dimensions ultra-compactes adaptées à tous. Les circuits intégrés optiques sont devenus possibles.

Dans les réseaux de communication optique, les fibres optiques sont utilisées comme guides d'ondes pour transférer des informations et des données. Nous pouvons allouer une seule fibre optique pour plusieurs canaux avec différentes longueurs d'onde centrales en utilisant des technologies de multiplexage par répartition en longueur d'onde (WDM) et de multiplexage par division en longueur d'onde dense (DWDM). Les démultiplexeurs optiques jouent un rôle crucial dans les technologies WDM et DWDM ; de nombreux travaux ont été consacrés à la conception de démultiplexeurs basés sur PhC [69] .

Tout d'abord, il est possible d'utiliser le couplage entre deux guides à cristaux photoniques séparés par une faible distance, ces guides formant ce qu'on appelle un coupleur directionnel. On peut aussi se servir du couplage entre deux guides et une cavité formant un filtre sélectif en longueur d'onde. Enfin, l'effet super prisme permet également de réaliser un démultiplexage en longueur d'onde. L'approche retenue repose sur le filtrage sélectif basé sur le couplage guide-cavité résonante [70] .

II.2 Principe de fonctionnement :

Un multiplexeur / démultiplexeur est prévu pour une interconnexion optique entre des composants électroniques sur une puce de circuit intégré. La large bande passante du canal de transmission optique (guide, fibre optique) permet de transporter plusieurs signaux à des longueurs d'onde différentes dans le même canal via un multiplexeur optique. C'est le multiplexage en longueur d'onde (WDM pour Wavelength Division Multiplexing). Chaque

porteuse est transmise indépendamment des autres, dans la mesure où les canaux sont espacés spectralement. À la fin du canal de transmission, avant la détection, les signaux sont séparés à l'aide d'un démultiplexeur. Les équipements de démultiplexage 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 [71].

II.3 Etude et description de la structure :

Il est possible de concevoir des dispositifs pour l'optique intégrée avec des cavités et des guides d'ondes en introduisant des défauts dans un cristal photonique, ce qui amène à des possibilités de filtrage et de multiplexage en longueur d'onde.

Le multiplexage en longueurs d'ondes (WDM, Wavelength Division Multiplexing) est une technique qui permet d'augmenter le débit sur une optique, qui a pour objectif d'insérer ou d'extraire des longueurs d'onde bien précises.

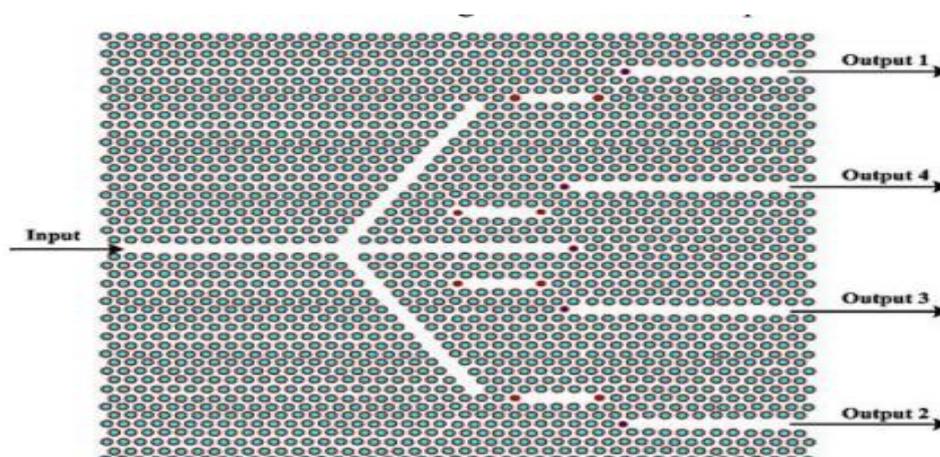


Figure II.1 : schéma d'un démultiplexeur à cristaux photoniques [72].

Une méthode pour la conception d'un démultiplexeur en longueur d'onde à base des cristaux photoniques 2D pour la séparation des impulsions ultra-courtes du canal est proposée [72].

Le dispositif sépare efficacement les canaux avec des longueurs d'onde $1,31 \mu\text{m}$ et $1,55 \mu\text{m}$ (Figure II.2).

La méthode se fait par l'analyse des cartes de bandes interdites photoniques complète qui permettent la sélection des paramètres géométriques d'un démultiplexeur.

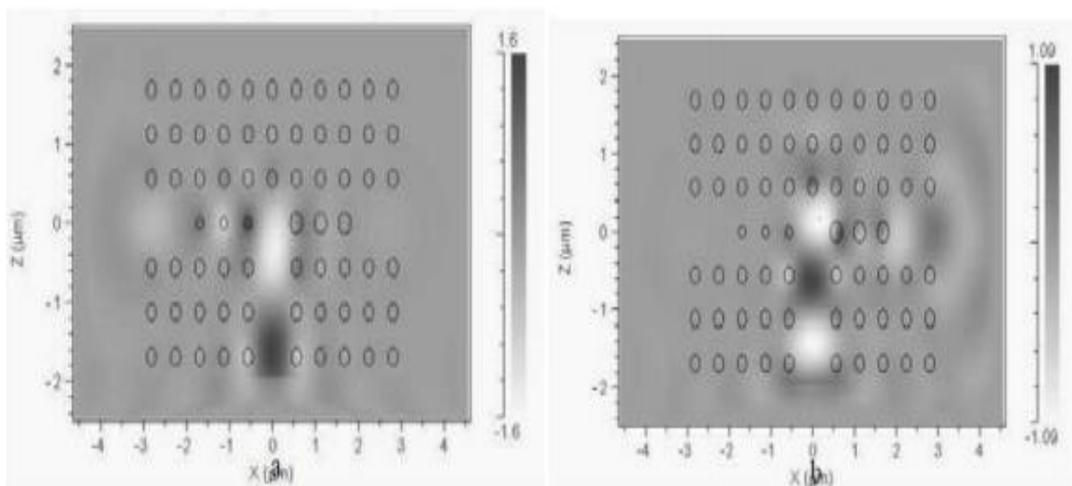


Figure II.2 : Résultats de la simulation FDTD d’un démultiplexeur en longueur d’onde : (a) longueur d’onde $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$, (b) longueur d’onde $\lambda = 1,31 \mu\text{m}$ [2].

La Figure II.3 représente un démultiplexeur à huit canaux basés sur une double structure photonique 2D à réseau triangulaire de trous d’air de rayon $r = 255 \text{ nm}$ et de deux périodicité $a_1=440 \text{ nm}$ et $a_2 =440 \text{ nm}$, gravés sur une membrane de Si. Ce démultiplexeur consiste à ajuster la longueur d’onde de résonance de chaque cavité en fonction de rayon de trous de $0,05a$, $0,06a$, $0,06a$ et $0,06a$ pour les quatre canaux de cristal photonique de période PC1, et un rayon de trous de $0,18a$, $0,18a$, $0,17a$ et $0,2a$, respectivement pour les quatre canaux de cristal 1 photonique de période PC2 [73].

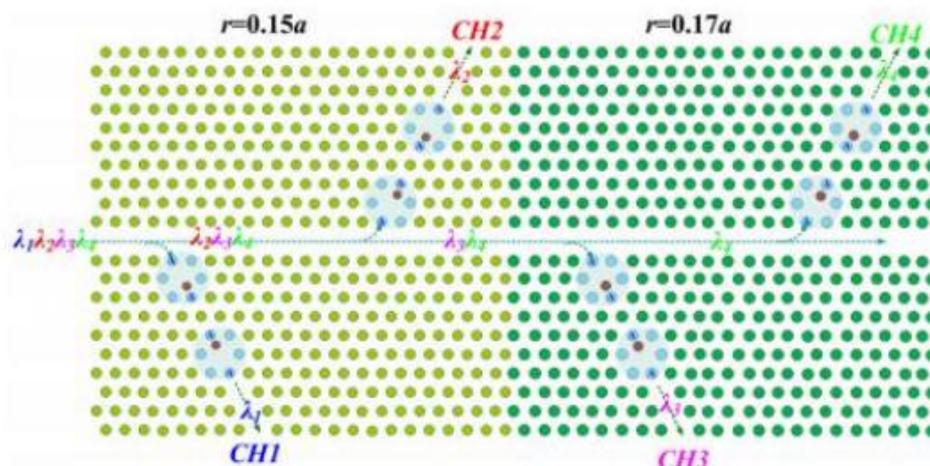


Figure II.3 : schéma d’un démultiplexeur [73].

La Figure II.4 représente une simulation d’un démultiplexeur sur la propagation de la lumière dans chaque canal pour différentes longueurs d’onde 1530, 1550, 1570 et 1590 nm.

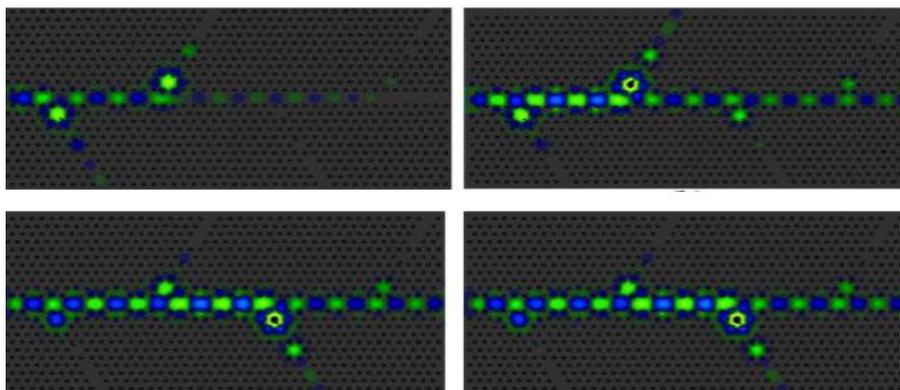


Figure II.4 : Simulation d'un démultiplexeur en longueur d'onde 1530, 1550, 1570 et 1590 nm, respectivement [73].

En utilisant les propriétés des démultiplexeurs à cristaux photoniques déjà étudiés, on a pu sélectionner ou extraire plusieurs longueurs d'ondes bien définies et bien distinctes à partir d'un signal émis. Donc en ajustant la taille du défaut, on peut atteindre n'importe quelle fréquence dans la gamme des télécoms en utilisant une seule structure à cristal photonique voir un seul dispositif. C'est une propriété inhérente aux démultiplexeurs à base des cristaux photonique qui confère à ces derniers des potentialités confirmées dans le domaine de la transmission optique [74].

II.4 Etude de cavités à Cristaux Photoniques 2D :

Les cristaux photoniques sont basés sur l'insertion contrôlée de défauts au sein du cristal lors de sa fabrication. En ce qui concerne les cristaux photonique 2D, il existe des défauts ponctuels qui peuvent conduire à l'existence de niveaux discrets dans une bande interdite. Ces défauts sont créés à partir de plusieurs critères tels que les modifications locales de l'indice et toutes les modifications qui concerne les motifs cristallins c'est-à-dire en changeant la taille du motif (défaut de substitution), ou déplacé l'un de ces motifs (défaut interstitiel) ou même l'insertion d'un motif différent (dopage), ainsi que l'absence d'un des motifs (défaut lacunaire).

II.4.1 Etude de la cavité S1 pour un défaut de substitution [75] :

Il est déjà commun de multiplexer l'information dans le domaine des télécommunications, c'est-à-dire d'injecter dans une même fibre optique plusieurs longueurs d'onde différentes qu'il faut pouvoir filtrer en sortie. Le critère pour ces applications est demeuré par la réalisation de cavités avec des facteurs de qualité élevés et avec des volumes modaux petits.

Notre étude sera consacrée à la présentation des résultats de simulation obtenus sur les cavités S1. L'intérêt de ce type de cavité vient du fait qu'elles présentent des facteurs de qualité extrêmement élevés.

II.4.1.1 Variation du rayon de la maille centrale (r) :

Pour le calcul des paramètres caractéristiques de la structure de cavité S1, la méthode des différences finies temporelles FDTD 2D est la plus utilisée, qui va nous permettre de simuler un milieu ouvert.

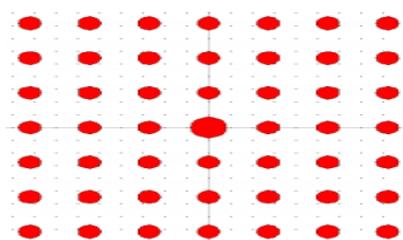


Figure II.5 : Structure de cavité S1 [75].

Le tableau II-1 représente la variation du facteur de qualité et la longueur d'onde de résonance de cavité S1 en fonction de rayon de tige centrale de la structure, afin d'étudier l'influence du rayon de tige sur le facteur de qualité Q et la position de la longueur d'onde des modes résonnants de la cavité H1, qui est effectuée d'une série de simulations pour chaque valeur de rayon $r=0.294$ jusqu'à $r=0.301$.

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

Tableau II -1 : Variation de la longueur d'onde de résonance et le facteur de qualité en fonction du rayon r de la tige centrale [75].

D'après le tableau on remarque que :

- La position de la longueur d'onde λ dépend de la valeur du rayon r.

- Les longueurs d’ondes de résonance se décalent vers les grandes valeurs lorsqu’on augmente la taille du rayon r .

Par conséquent en variant le rayon du défaut, on peut atteindre n’importe quelle fréquence située dans la bande interdite photonique.

Nous allons le confirmer avec les résultats de la Figure II.6 qui démontre que le rayon possède une grande influence sur le facteur de qualité et la longueur d’onde de résonance.

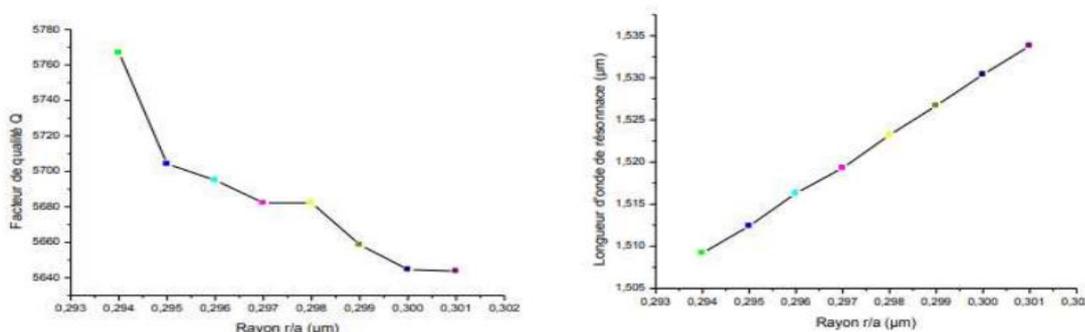


Figure II.6 : Variation de la longueur d’onde de résonance et facteur de qualité en fonction de la variation du rayon de la tige centrale [75].

La figure II.7 illustre les résultats de simulation en termes de transmission pour différentes valeurs de r allant de $0.254 \mu\text{m}$ jusqu’à $0.301 \mu\text{m}$ qui sont obtenus par logiciel Rsoft :

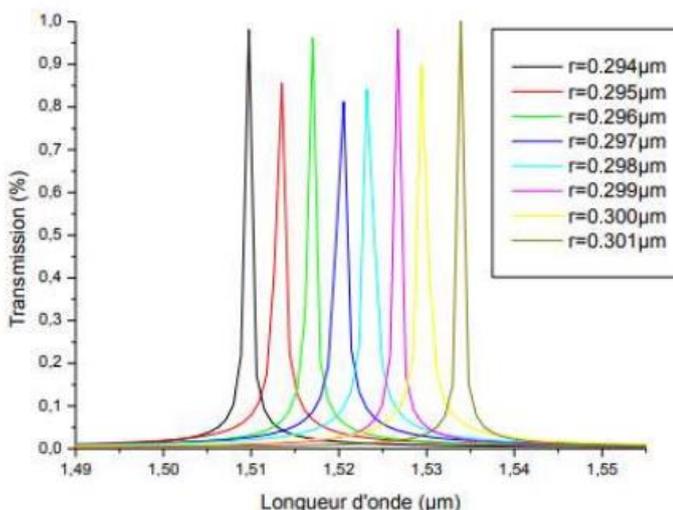


Figure II.7 : Spectre de transmission des Canaux en fonction de la variation du rayon de la tige centrale [75] .

II.5 Etudes des guides à cristaux photoniques :

II.5.1 Guide d'onde de type virage à 60° :

Les guides virages constituent aussi un domaine d'application privilégié des cristaux photoniques car ils permettent théoriquement de réaliser des virages avec des rayons de courbure de l'ordre de la longueur d'onde sans pertes (Figure II.8) [76].



Figure II.8 : double virage réalisé dans un cristal photonique bidimensionnel à trous d'air [76].

II.5.2 Conception du guide :

Le guide virage est obtenu par la combinaison de deux guides de type W_{1k}^A de largeur W et qui forment entre eux un angle $\alpha = 60^\circ$, dans une structure de réseau à maille triangulaire formé de trous d'airs de rayons bien choisis assurant un bon fonctionnement de démultiplexeur proposé au voisinage des longueurs d'ondes ciblées qui sont $1.31\mu\text{m}$ et $1.55\mu\text{m}$. Le rayon de trous est égal à $0.18\mu\text{m}$, tandis que le facteur de remplissage en air est de 52% [77].

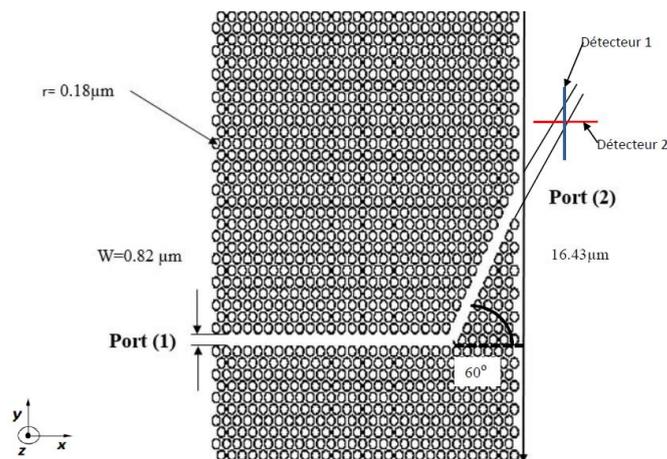


Figure II.9 : Structure d'un guide virage réalisé dans un cristal photonique bidimensionnel triangulaire de trous d'air. Les paramètres sont choisis tel que $\Delta x = \Delta y = 0.04\mu\text{m}$, $n_{\text{eff}} = 3.24$, $f = 52\%$ et $r/a = 0.38$ [77].

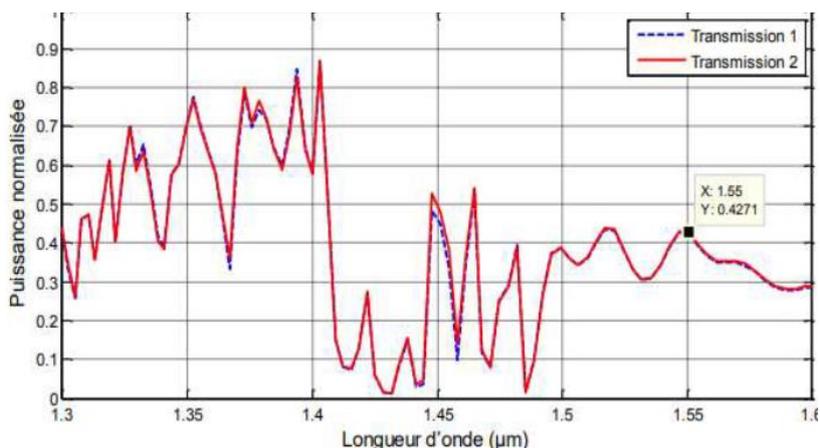


Figure II.10 : Spectre de transmission normalisé du Guide virage à 60° [77].

II.6 Filtres et multiplexeurs :

Une fonction particulièrement importante d'optique intégrée qui pourrait être réalisée avec des cristaux photoniques : le multiplexage en longueur d'onde (WDM, Wavelength Division Multiplexing). Le but est d'insérer ou d'extraire des longueurs d'onde bien précises dans un flux de données. Ce dispositif peut être réalisé en utilisant la sélectivité d'une cavité résonante couplée par recouvrement des ondes évanescentes à des guides d'onde. Une première proposition théorique fut donnée par Fan et al. En 1998. Depuis, plusieurs réalisations ont montré la possibilité du couplage d'une cavité avec un guide. Le facteur de qualité mesuré du mode résonnant est dans ce cas de 400 et l'on peut espérer une efficacité de couplage de 50 % entre la cavité et le guide. Ce type de dispositif est appelé un filtre « Add-Drop » [76] .

Le couplage entre des guides et des cavités à cristaux photoniques peut permettre la réalisation de filtrage directionnel et sélectif en longueurs d'onde, plus connu sous le nom de filtre ADD-DROP, qui est un composant clé du multiplexage en longueur d'onde, un exemple de ce filtre et schématisé sur la figure II.11, elle représente une cavité résonante couplée par recouvrement des ondes évanescentes à des guides d'onde [78].

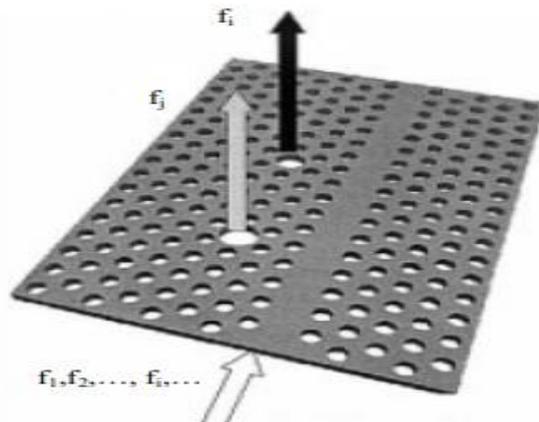


Figure II.11 : la structure et le principe de fonctionnement d'un filtre Add- Drop, une rangée a été éliminée pour guider les ondes avec des fréquences $f_1, f_2, \dots, f_i, \dots$ et les défauts ponctuels pour extraire les fréquences désirées f_i, f_j [45].

Dans ce cas, les longueurs d'onde qui résonnent dans l'anneau central peuvent éventuellement se coupler d'un guide à l'autre. Le processus de couplage est néanmoins très complexe et dépend de la symétrie et de la dégénérescence des modes résonnants. De plus, la taille du défaut (de la cavité résonnante) doit être très bien contrôlée afin de sélectionner les longueurs d'onde désiré [76].

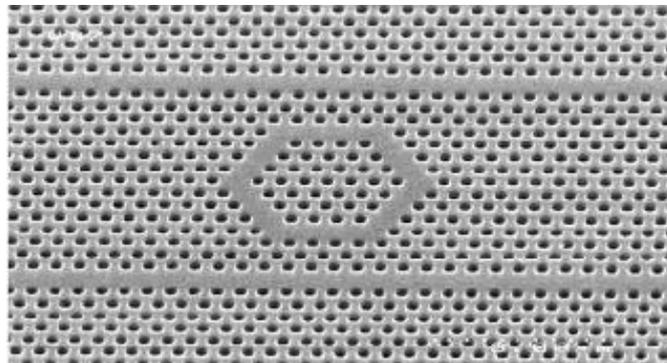


Figure II.12 : Exemple de filtre Add-Drop réalisé sur un substrat SOI. Les longueurs d'onde résonnantes de l'anneau peuvent éventuellement se coupler d'un guide à l'autre [79].

La figure II.13 représente un Filtre Add-Drop dont le signal d'entrée, en bas et à droite, est composé d'un grand nombre de signaux à des longueurs d'onde différentes λ_i . le filtre, réalisé dans un cristal bidimensionnel de symétrie hexagonale, permet d'extraire l'un des signaux (ici, celui à la longueur d'onde λ_1) en l'aiguillant dans une autre direction. La cavité centrale est choisie de façon à présenter une résonance à cette longueur d'onde, le cercle représenté sur la figure indique la localisation du champ électromagnétique associé au mode résonnant. Si les guides sont parfaitement couplés à la cavité, le faisceau optique à la longueur d'onde λ_1 pourra ainsi passer intégralement d'un guide à l'autre, car la cavité optique présente

une transmission unité pour le mode de champ qui lui est adapté. On aura donc réalisé la fonction de soustraction. On peut, à l’opposé, réaliser la fonction d’addition en injectant un signal de longueur d’onde λ_1 par l’entrée gauche du guide supérieur.

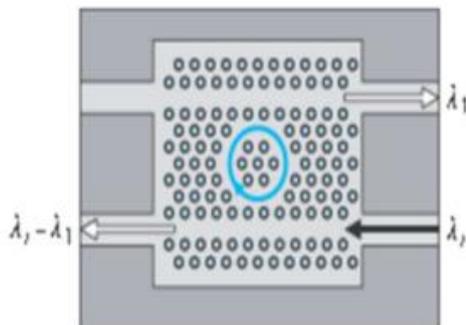


Figure II.13 : Filtre Add-Drop [80].

II.7 Les applications :

II.7.1 Démultiplexages efficaces en longueur d'onde à 16 canaux autour de 1,31 /1,55 μm dans une plaque de cristal photonique 2D [81]:

Le démultiplexeur proposé est basé sur des CPh bidimensionnels, avec une structure en treillis carré, des tiges intégrées, les tiges sont des matériaux semi-conducteurs au gallium arsenic GaAs qui a été proposé par Skauli et al en 2003. Un système de communication correspondant respectivement à 1,31 μm et 1,55 μm et Les propriétés de cette substance sont intégrées dans COMSOL Multiphysics.

II.7.1.1 Conception du circuit :

a- Analyse de la bande interdite :

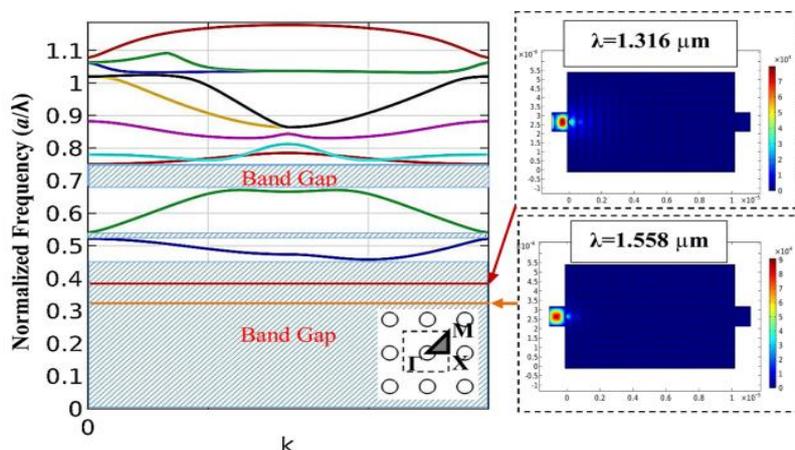


Figure II.14 : Diagramme de bande d’un Réseau carré CPh et distribution du champ électrique à la longueur d’onde 1,316 μm et 1,558 μm .

Les paramètres sont définis tels que :

$$n = f(\lambda) .$$

$$r = 0,21 \times a .$$

$$a = 0,53 \mu\text{m}.$$

On remarque que la structure CPh prend en charge une bande photonique dans les régions suivantes : $0 < a / \lambda < 0,45$, $0,52 < a / \lambda < 0,54$, $0,68 < a / \lambda < 0,75$ pour le mode TE.

La transmission est nulle à la longueur d'onde $1,558 \mu\text{m}$ ($a / \lambda = 0,34$) et $1,316 \mu\text{m}$ ($a / \lambda = 0,402$) puisque l'absence de modes dans ces régions. Le champ électrique est réfléchi en raison de la présence du PBG.

Le démultiplexeur à large bande :

Le démultiplexeur à deux canaux proposé est un séparateur en T formé avec un guide d'onde à une seule rangée dans la structure de réseau carré CPhs comme représentée sur la figure 2 (a), la dalle CPh 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'onde horizontal (trois chaque côté) et en modifiant leur rapport de rayons, nous obtenons une séparation de longueur d'onde comme le montre la figure II.15 (a) sur le plan Oxyz.) ,

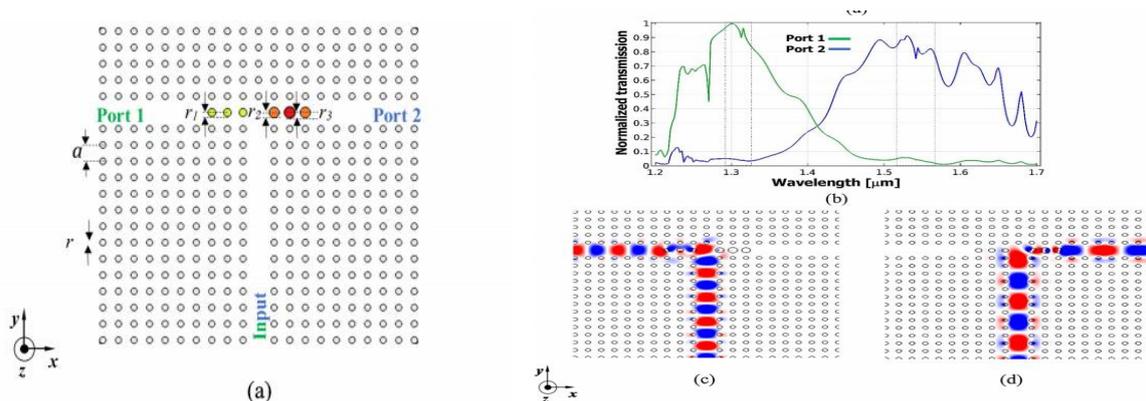


Figure II.15 : Simulation du démultiplexeur à large bande à séparateur en T. (a) La conception schématique des séparateurs où $r_1 = 0,245 \times a$, $r_2 = 0,327 \times a$ et $r_3 = 0,42 \times a$. (b) Les résultats de la simulation représentant le coefficient de transmission entre l'entrée et les ports 1 et 2. (c) Le champ électromagnétique diffusée pour la longueur d'onde correspondante $1,3106 \mu\text{m}$. (d) Le champ électromagnétique diffusée pour la longueur d'onde correspondante de $1,5518 \mu\text{m}$.

b- Résonateur à anneau quasi carré :

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 obtenu est deux guides d'ondes perpendiculaires couplés à travers un noyau en forme de diamant QSRR conçu sur des CPh à réseau carré avec une constante de fond $a = 0,53 \mu\text{m}$ et un rayon relatif des tiges $r = 0,21 \times a$ comme indiqué dans la figure II.16 :

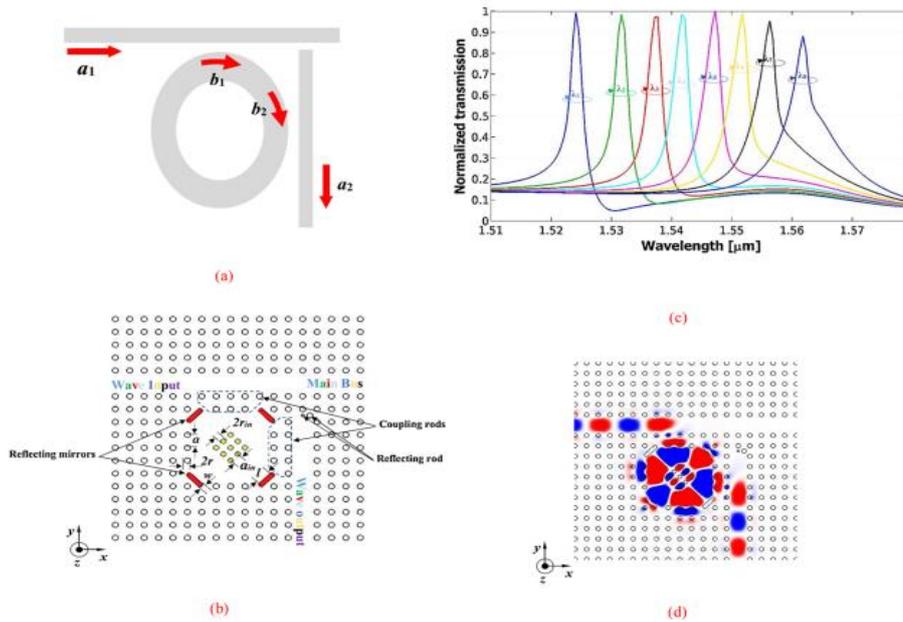


Figure II.16 : Conception schématique et simulation du résonateur à anneau quasi carré QSRR proposé. (a) couplage principal. (b) Le croquis final de la conception proposée. (c) Les résultats de transmission simulés QSRR pour tous les rayons relatifs intérieurs et constantes de réseau donnés $a = 0,53 \mu\text{m}$ et $a_{in} = 0,3747 \mu\text{m}$. (d) Distribution du champ électrique à la longueur d'onde $1,523 \mu\text{m}$ avec $r_{in} = 0,18 \times a$.

c- Le démultiplexeur double bande 16 canaux :

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

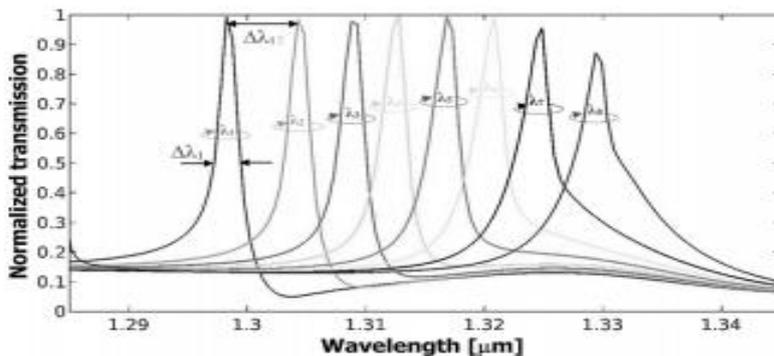


Figure II.17: Résultats de transmission simulés par QSRR pour tous les rayons relatifs intérieurs donnés, constante de réseau de fond $a = 0,53 \mu\text{m}$ et réseau intérieur, a_{in} constant $= 0,3747 \mu\text{m}$.

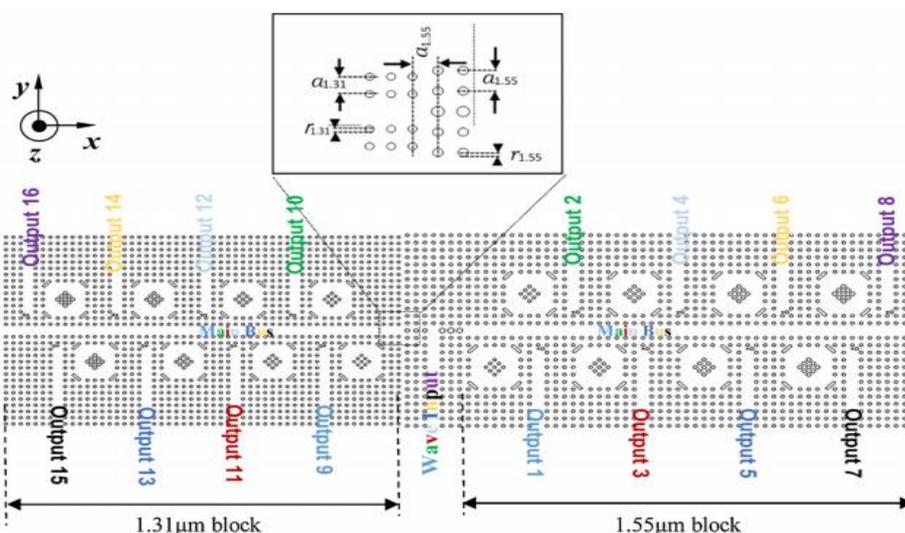


Figure II.18 : Le croquis final du démultiplexeur multicanal double bande.

Le démultiplexeur comme le montre la figure II.18 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 ($a = 0,53 \mu\text{m}$) et avec un guide d'onde d'entrée entraînant un remorquage du guide d'ondes de sortie dont celui de droite est couplé au bus principal du premier bloc autour de $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ du même réseau constant, tandis que dans la sortie gauche, il est couplé au deuxième bloc autour de

$\lambda = 1,31 \mu\text{m}$ avec une constante d'espacement de réseau de $a_{1,31} = 0,45 \mu\text{m}$, la connexion entre les deux guides d'ondes avec des constantes de réseau différentes appelle un défi mais il est modifié par la centralisation mutuelle des deux guides d'ondes autour du même axe tandis que les deux blocs sont espacés d'un réseau.

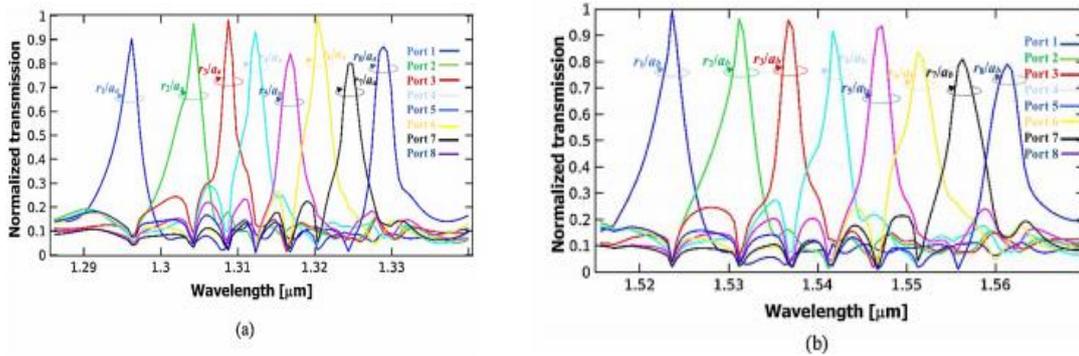


Figure II.19 : Spectre de transmission normalisé du circuit proposé. (a) La transmission normalisée du deuxième 2e bloc (environ 1,31 μm) où $a_{1,31} = 0,45 \mu\text{m}$ et $r_{in}(\lambda_r)/a_{1,31} = s(\lambda_r)$. (b) La transmission normalisée du premier 1er (bloc autour de 1,55 μm) où $a_{1,55}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

Comme le montre la figure II.19, la transmission normalisée des deux blocs montre similitude à première vue, cependant, les résultats du premier bloc présentent un agrandissement spectral par rapport à ceux du deuxième bloc qui peut être démontré par le changement de constante de réseau de fond, où la première disposition (graphique de 1,31 μm) occupe une bande passante fonctionnelle de $B_w = 43 \text{ nm}$ où d'autre part le second (graphique 1,55 μm) occupe une bande passante fonctionnelle de $B_w = 52 \text{ nm}$, forme le même chiffre les longueurs d'onde de résonance correspondant au pic de la transmission de sortie sont déduites dans le tableau 1 pour chaque "s" valeur et pour les deux bandes de longueurs d'onde:

λ_r	$s(\lambda_r)$	First block (around 1.31 μm) resonance wavelength λ_r (μm)	Second block (around 1.55 μm) resonance wavelength λ_r (μm)
λ_1	0.18	1.296	1.523
λ_2	0.19	1.304	1.531
λ_3	0.20	1.308	1.536
λ_4	0.21	1.312	1.541
λ_5	0.225	1.316	1.547
λ_6	0.24	1.320	1.551
λ_7	0.255	1.324	1.555
λ_8	0.27	1.328	1.561

Tableau II -2 : Valeurs de longueurs d'onde de résonance pour chaque valeur "s".

Sur les deux graphiques de la figure II.19, une chute de transmission a été remarquée dans les dispositions de sortie en opposition à celle résonnée, ce qui entraîne une réduction de

la valeur de diaphonie, cependant, ce phénomène atténue plus le signal qui se propage dans le circuit (du premier au premier huitième 8^e sortie) dans les deux blocs.

Le tableau II-3 représente la diaphonie de toutes les sorties du circuit, dans laquelle les valeurs de diaphonie inter-blocs et intra-blocs sont affichées.

		1.31 μm block								1.55 μm block							
N _{ij} (dB)		port 1	port 2	Port 3	port 4	Port 5	port 6	port 7	port 8	port 9	port 10	port 11	Port 12	port 13	port 14	Port 15	Port 16
1.31 μm block	port 1		-22.42	-21.18	-23.83	-24.94	-22.42	-26.52	-21.64	-52.52	-51.63	-52.48	-50.54	-50.64	-52.16	-49.38	-54.34
	port 2	-26.58		-20.90	-22.29	-24.15	-29.11	-29.75	-25.77	-37.64	-43.53	-40.89	-39.98	-37.96	-41.29	-39.91	-44.00
	port 3	-31.16	-13.62		-17.42	-20.31	-25.90	-25.57	-23.22	-41.65	-41.36	-39.46	-44.69	-43.51	-41.17	-40.50	-46.94
	port 4	-20.50	-31.96	-17.27		-36.27	-34.58	-41.29	-41.39	-43.23	-44.48	-42.70	-46.71	-43.89	-45.67	-44.75	-50.54
	port 5	-22.25	-17.22	-23.11	-13.47		-22.76	-29.92	-36.65	-44.04	-38.69	-61.94	-64.88	-52.34	-79.64	-90.63	-102.62
	port 6	-18.67	-20.55	-19.65	-27.24	-15.62		-25.54	-33.32	-27.93	-35.64	-31.38	-39.20	-38.51	-49.03	-37.16	-49.92
	port 7	-19.39	-20.70	-20.90	-16.87	-17.49	-12.78		-23.43	-47.04	-44.37	-43.99	-47.26	-45.79	-44.64	-40.86	-43.86
	port 8	-19.92	-18.54	-17.48	-21.64	-19.50	-19.80	-16.47		-48.67	-50.56	-49.16	-50.27	-51.44	-48.04	-46.03	-50.84
1.55 μm block	port 9	-105.41	-135.45	-159.13	-176.90	-208.56	-220.92	-250.83	-263.15		-27.47	-28.44	-31.65	-31.94	-29.99	-34.02	-28.99
	port 10	-103.19	-131.26	-149.46	-173.82	-204.97	-219.48	-250.61	-264.61	-24.17		-23.87	-29.24	-27.58	-32.13	-32.96	-28.92
	port 11	-106.41	-133.79	-165.26	-180.50	-213.44	-233.47	-257.64	-275.37	-29.71	-15.43		-22.47	-25.06	-30.64	-29.84	-27.95
	port 12	-110.01	-127.11	-155.39	-180.32	-235.28	-223.71	-268.61	-288.04	-18.47	-27.14	-17.57		-26.52	-27.31	-30.69	-31.65
	port 13	-107.87	-134.70	-144.94	-170.25	-200.41	-218.86	-239.71	-254.93	-21.59	-17.18	-19.81	-13.39		-17.81	-23.31	-30.27
	port 14	-82.82	-85.75	-100.55	-128.48	-125.48	-120.92	-145.38	-149.70	-18.44	-19.78	-18.44	-20.47	-15.68		-19.71	-29.67
	port 15	-109.21	-119.83	-102.16	-129.77	-141.45	-174.90	-185.99	-229.05	-17.29	-21.33	-20.14	-15.51	-19.28	-9.69		-38.25
	port 16	-99.36	-113.49	-162.05	-152.26	-192.31	-197.76	-240.43	-241.56	-19.28	-17.44	-16.15	-20.50	-17.61	-17.42	-15.42	

Tableau II -3 : Les valeurs de diaphonie entre les sorties à leur résonance correspondante.

Sur le tableau II-3, on remarque des maximums et des minimums respectivement dans chaque secteur où on peut conclure que :

La séparation des ports dans le deuxième 2^{ème} bloc est meilleure que celle du premier 1^{er} bloc.

Le premier 1^{er} bloc est bien séparé du deuxième 2^e bloc autour de 1,31 μm, ce qui est mieux que celui du deuxième 2^{ème} bloc autour de 1,55 μm, et qui peut être définie comme l'effet de la variation de dimension du guide d'onde du bus principal entre le bloc principal et le deuxième 2^{ème} bloc, même si les deux blocs sont bien séparés.

Enfin, nous présentons sur la figure II.20 la propagation des ondes électromagnétiques à travers le circuit conçu représenté par l'élément transversal du champ électrique E_z :

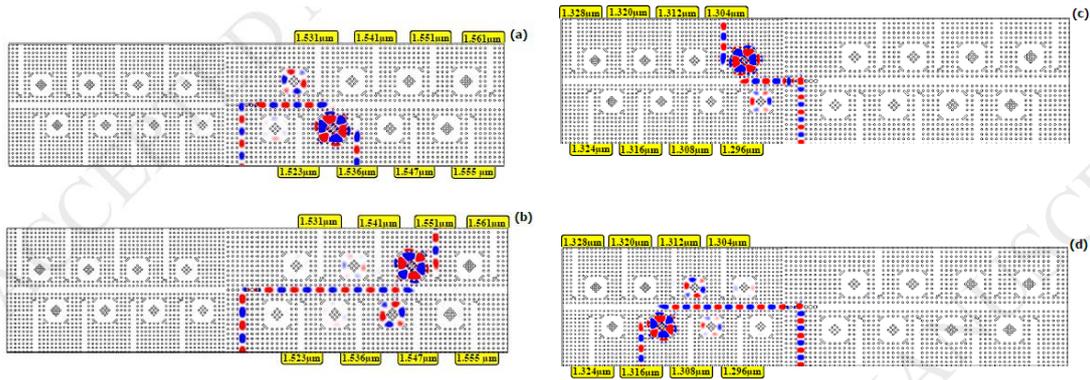


Figure II.20 :La propagation du signal des ondes électromagnétiques dans le circuit est présentée en lobes dont les rouges représentent l'impulsion positive et les bleus représentent l'impulsion négative comme indiqué sur les deux figures, dont nous pouvons voir que l'anneau affecté à la longueur d'onde de résonance de chaque sortie est le précédent adjacent dans les deux domaine spatial et spectre.

II.7.2 Conception de deux démultiplexeurs optiques à 8 canaux, Utilisation d'un anneau homogène en cristal photonique 2D Résonateurs [82] :

Deux démultiplexeurs optiques sont conçus similaires à 8 canaux avec différents types de constantes de réseau (carré et triangulaire), conçus avec des paramètres structurels, y compris le rayon, la constante de réseau, l'indice de réfraction diélectrique, le nombre des tiges diélectriques, la taille, ainsi que l'homogénéité du type de résonateurs en anneau.

II.7.2.1 Analyse de la bande interdite :

La PBG des deux structures est illustré sur la figure II.21, qui comme on peut le voir, les PBG pour chacune des constantes de réseau mentionnées ci-dessus est différente. La structure avec une constante de réseau carré a deux PBG en mode TM qui sont entre : $0,246 \leq a/\lambda \leq 0,427$ et $0,692 \leq a/\lambda \leq 0,729$, égaux à $1\,475\text{ nm} \leq \lambda \leq 2\,386\text{ nm}$ et $864\text{ nm} \leq \lambda \leq 910\text{ nm}$. La structure avec une constante de réseau triangulaire a deux PBG en mode TE et TM qui sont entre : $0,825 \leq a/\lambda \leq 0,878$ et $0,260 \leq a/\lambda \leq 0,457$, égaux à $717\text{ nm} \leq \lambda \leq 763\text{ nm}$ et $1\,378\text{ nm} \leq \lambda \leq 2\,423\text{ nm}$. Les deux structures comprennent une large gamme de longueurs d'onde de communication optique qui conviennent parfaitement à la conception de démultiplexeurs optiques.

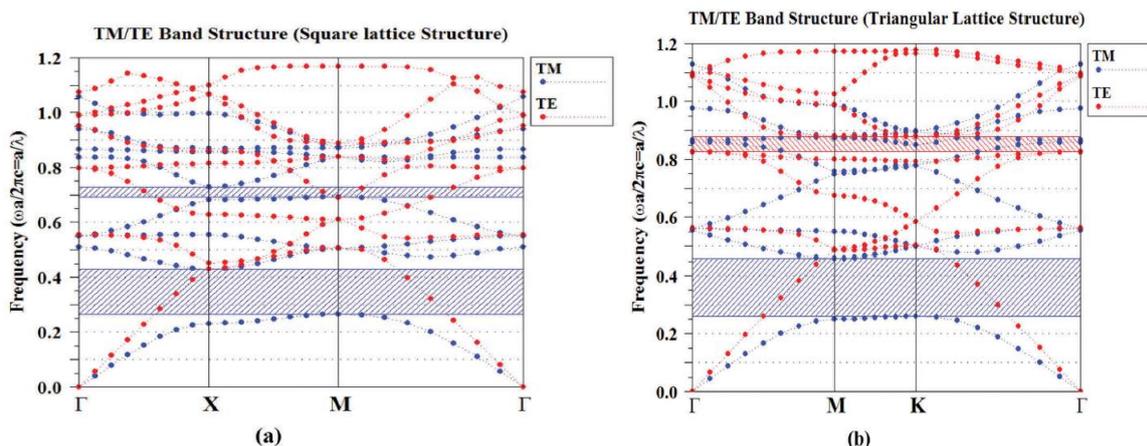


Figure II.21 : Bande interdite photonique des structures proposées (a) structure à constante de réseau carrée et (b) une structure avec une constante de réseau triangulaire.

Pour concevoir des démultiplexeurs optiques, huit résonateurs en anneau avec des défauts linéaires, afin de créer les guides d'onde d'entrée et de sortie qui sont utilisés. Les résonateurs en anneau sont créés en retirant un certain nombre de tiges diélectriques PC qui sont utilisées de manière à former un mode de boucle complète.

Les schémas généraux des résonateurs utilisés dans les deux structures sont illustrés à la figure II.22.

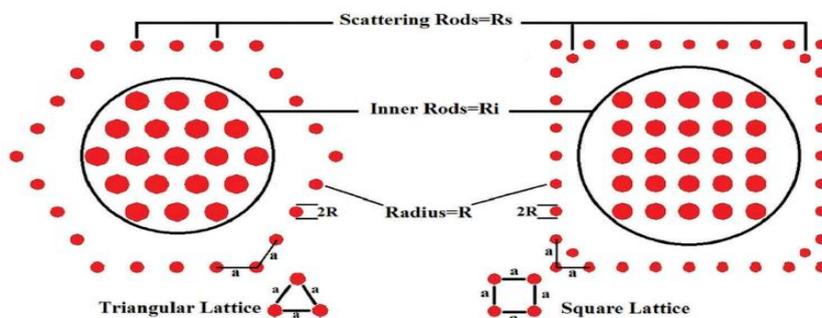


Figure II.22 : Schémas généraux des résonateurs homogènes utilisés dans les démultiplexeurs proposés.

Selon la figure II.22, les deux résonateurs sont homogènes l'un avec l'autre, elles sont créées en augmentant la taille du rayon des tiges intérieures avec les tiges de diffusion pour réduire la réflexion arrière de la lumière à l'intérieur du résonateur dans le guide d'onde correspondant.

Pour une meilleure séparation des longueurs d'onde au sein de la structure des démultiplexeurs, nous avons fait varier le rayon des tiges internes des résonateurs. Les rayons de ces tiges pour les 8 canaux sont respectivement à 165 nm, 168 nm, 171 nm, 174 nm, 177

nm, 180 nm, 183 nm et 186 nm. Le positionnement des résonateurs à l'intérieur des deux structures ainsi que le rayon des tiges intérieures des résonateurs correspondants sont les mêmes.

Les schémas finaux des démultiplexeurs sont illustrés à la figure II.23 :

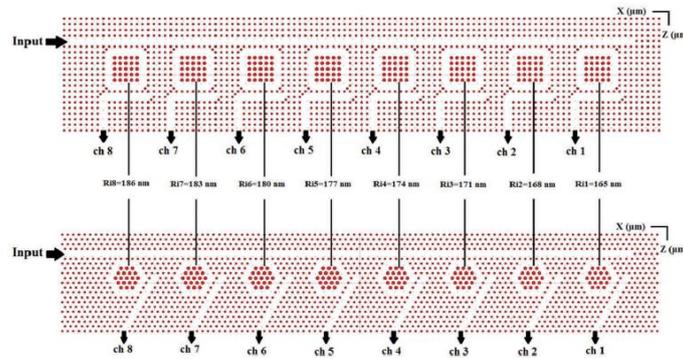


Figure II.23 : Schéma du démultiplexeur optique proposé, basé sur un résonateur en anneau homogène avec différentes constantes du réseau.

Après avoir créé un maillage précis pour les deux structures, le spectre de sortie de chacune des structures est obtenu comme l'illustre la figure II.24 :

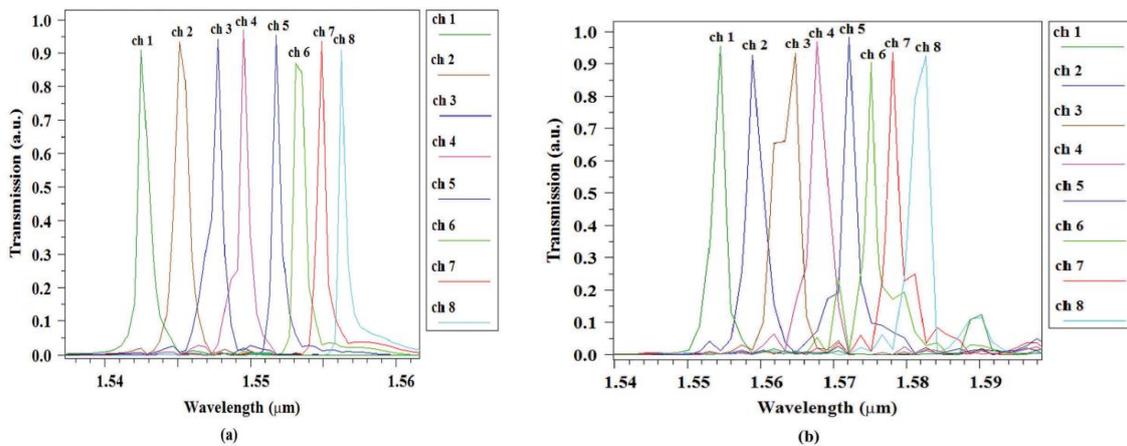


Figure II.24 : Spectres de sortie des démultiplexeurs (a) la structure avec une constante de réseau carrée et (b) la structure avec une constante de réseau triangulaire.

Selon la figure II.24, les deux structures peuvent séparer les longueurs d'onde dans une plage adaptée aux applications de télécommunication. Pour mieux voir et comparer la gamme de longueurs d'onde séparées et l'espacement des canaux, en augmentant les tiges internes dans deux structures.

La figure II.25 illustre le changement de longueur d'onde de résonance, tout en faisant varier le rayon intérieur de la tige des résonateurs annulaires.

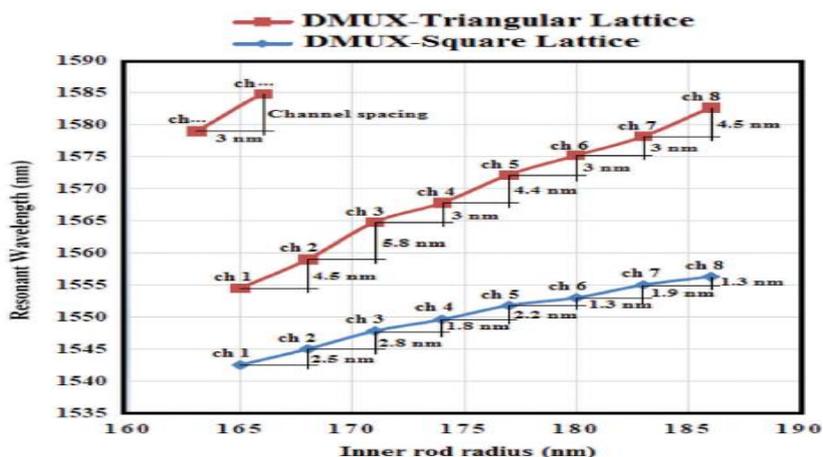


Figure II.25 : L'effet du rayon des tiges intérieures par rapport aux longueurs d'onde résonantes.

La largeur de bande, le facteur de qualité et le coefficient de transmission de chacun des huit canaux ayant un résonateur avec un rayon de tige interne légèrement différent sont présentés dans le tableau II-4 pour le démultiplexeur avec une constante de réseau carré et ils sont présentés dans le tableau II-5 pour le démultiplexeur avec une constante de réseau triangulaire.

Channel	Central wavelength (nm)	Resonant rod (nm)	Spectral width (nm)	Quality factor	Transmission (%)
Channel 1	1542.5	165	0.7	2203.5	91
Channel 2	1,545	168	0.9	1716.6	93.5
Channel 3	1547.8	171	0.5	3095.6	94.5
Channel 4	1549.6	174	0.4	3,874	97.4
Channel 5	1551.8	177	0.4	3879.5	95.5
Channel 6	1553.1	180	0.8	1941.3	87
Channel 7	1,555	183	0.45	3455.5	94
Channel 8	1556.3	186	0.37	4206.2	97

Tableau II -4 : Résultats de la simulation du démultiplexeur proposé avec une constante de réseau carré.

Channel	Central wavelength (nm)	Resonant rod (nm)	Spectral width (nm)	Quality factor	Transmission (%)
Channel 1	1554.5	165	1	1554.5	96
Channel 2	1559	168	0.8	1948.7	93.1
Channel 3	1564.8	171	3.2	489	93.8
Channel 4	1567.8	174	1	1567.8	96.5
Channel 5	1572.2	177	0.85	1849.6	98.9
Channel 6	1575.2	180	0.8	1969	91
Channel 7	1578.2	183	0.82	1924.6	94
Channel 8	1582.7	186	1.2	1318.9	93

Tableau II -5 : Résultats de la simulation du démultiplexeur proposé avec une constante de réseau triangulaire.

Un autre facteur important qui joue un rôle important dans la conception des démultiplexeurs qui seront utilisé dans les systèmes WDM est la diaphonie. A cet effet, la diaphonie des structures proposées sont présentés dans les tableaux II-6 et II-7 :

	Channel 1	Channel 2	Channel 3	Channel 4	Channel 5	Channel 6	Channel 7	Channel 8
Channel 1	-	-23.2	-26.6	-28.4	-36.6	-29.8	-40	-39.2
Channel 2	-17.1	-	-23.8	-24.8	-31.1	-25.1	-33.7	-35.1
Channel 3	-23.4	-18.6	-	-18.3	-30.2	-24	-36.3	-40.6
Channel 4	-29	-24.6	-8.2	-	-32.5	-23	-40	-34.5
Channel 5	-30.7	-23.7	-23.2	-17.3	-	-12.6	-18.7	-20.5
Channel 6	-30.7	-27.8	-21	-19.7	-20	-	-14.7	-16
Channel 7	-28.6	-27.8	-20	-22	-23.5	-31.3	-	-12.1
Channel 8	-28.6	-30.2	-19.1	-26.4	-30.2	-21.6	-30.1	-

Tableau II -6 : Valeurs de diaphonie du démultiplexeur proposé avec une constante de réseau triangulaire (dB).

La figure II.26 est présentée afin de mieux comprendre comment une certaine longueur d'onde est séparée et comment la puissance optique est transmise. Ici, nous avons pris le quatrième canal de chacun des démultiplexeurs proposés comme exemple. La lumière avec certaines longueurs d'onde pénètre dans chacune des structures par le port d'entrée et sont couplées aux résonateurs via le guide d'onde de couplage. Chacun des résonateurs reçoit la lumière entrante, et compte tenu du rayon de ses tiges intérieures, grâce auquel il est capable de séparer une longueur d'onde spécifique. Si cette longueur d'onde spécifique correspond à l'une des longueurs d'onde de la lumière entrante, le résonateur peut alors séparer la longueur d'onde correspondante et le transférer à son guide d'onde de sortie.

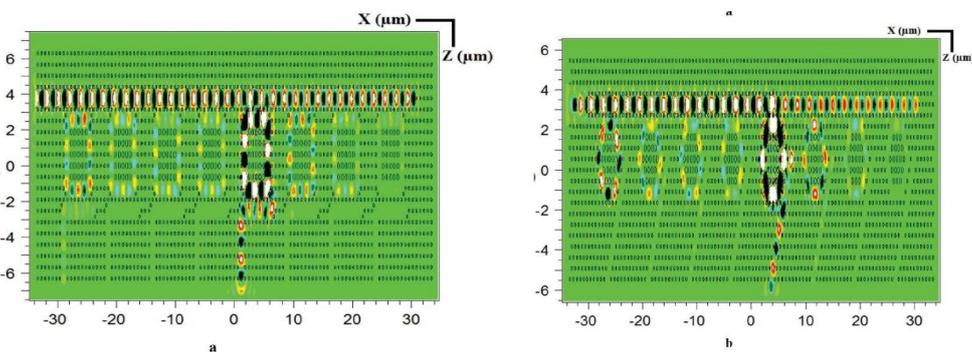


Figure II.26 : Distribution du champ électrique des démultiplexeurs proposés (a) à constante de réseau carrée (b) à constante de réseau triangulaire.

II.7.3 Une nouvelle conception de filtres optiques add / drop et filtres multicanaux basé sur PhCRR hexagonal pour les systèmes WDM [83] :

II.7.3.1 Analyse de la bande interdite :

Comme le montre la figure II.27 qui représente la structure a 2 gammes de fréquences PBG en modes TE et TM. La gamme de fréquences en mode TE est entre $:0,867 \leq a\lambda \leq 0,927$, qui est égal à la gamme de longueurs d'onde de $692 \text{ nm} \leq \lambda \leq 740 \text{ nm}$.

La plage de fréquences en mode TM est entre $:0,275 \leq a\lambda \leq 0,475$, qui est égal à la plage de longueurs d'onde de $1351 \text{ nm} \leq \lambda \leq 2334 \text{ nm}$. le mode TM a été jugé approprié pour être utilisé pour la conception de dispositifs de télécommunication, car il couvre une large gamme de longueurs d'onde de télécommunication.

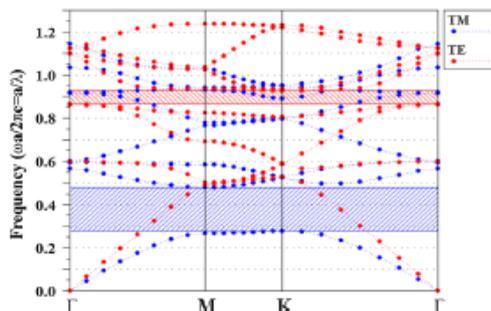


Figure II.27 : Bande interdite photonique de la structure proposée.

II.7.3.2 Conception d'ADF avec différents guides d'onde de chute :

a- ADF proposé avec guide d'ondes à chute directe :

Un nouveau PhCRR hexagonal a été utilisé pour concevoir la structure ADF, le résonateur annulaire est créé par le retrait des tiges diélectriques qui est utilisé de telle manière à former un mode en boucle complète comme le montre la figure II.28 (a). Le transfert de puissance du guide d'ondes du bus au résonateur en anneau et l'ajout ou suppression du guide d'ondes peuvent être modifiés en ajustant le rayon des barres de diffusion. Selon la configuration représentée sur la figure en retirant deux rangées de tiges diélectriques dans la structure PhC, en créant deux guides d'ondes optiques sur la structure supérieure et inférieure et en plaçant le résonateur annulaire entre eux, la structure ADF a été conçu.

Un signal d'entrée a été lancé dans le port A. Les spectres d'impulsions optiques des ports de sortie (B, C et D), ont été obtenus, Figure (II.28 (b)). Après avoir conçu la structure proposée, une source de lumière gaussienne avec une polarisation TM a été lancée dans l'entrée et le spectre de sortie transmis a été examiné, figure (II.28 (c)).

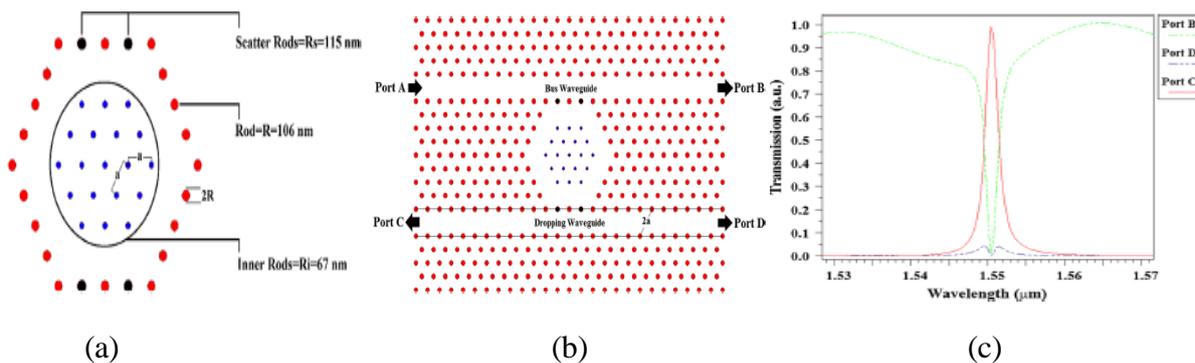


Figure II.28 : conception schématique et simulation de la structure ADF. (a) Schéma du nouveau PhCRR hexagonal. (b) Schéma de l'ADF proposé avec guide d'ondes à chute directe. (c) Spectre de sortie de l'ADF proposé avec guide d'ondes à chute directe.

La structure ADF a été capable de séparer les longueurs d'onde (λ) de 1550,5 nm avec un coefficient de transmission de 100%, une largeur de bande (λ) de 1,3 nm et un facteur de qualité de 1192. Lorsqu'une impulsion optique avec une telle longueur d'onde est envoyée à la structure, elle est reçue et séparée par le résonateur en anneau proposé et est transmis à la sortie C.

Dans ces conditions, le niveau de puissance normalisé dans le port C a été d'environ 100% et il a été égal à 0 dans les autres ports de sortie, comme le montre la figure II.29.

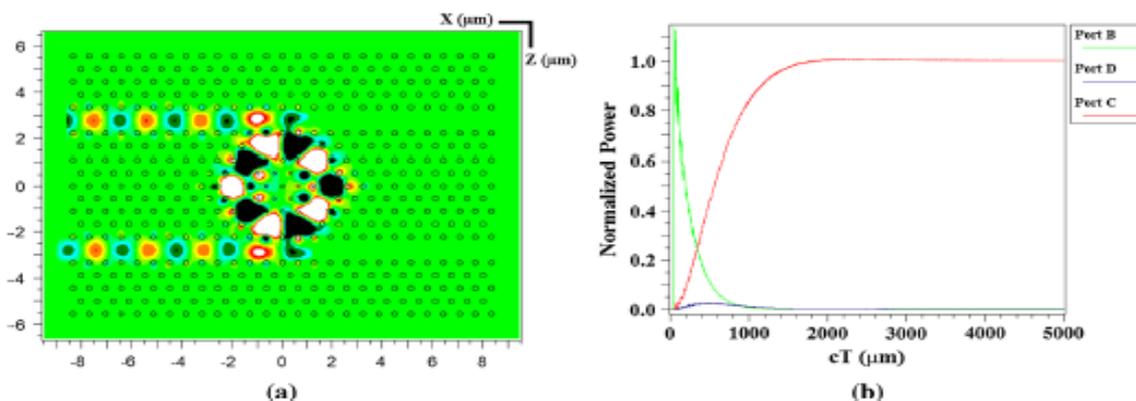


Figure II.29 : (a) Comportement optique de l'ADF avec guide d'ondes à chute directe en $\lambda = 1550,5$ nm. (b) champ électrique et puissance de sortie normalisée.

II.7.3.3 Conception d'un MUX / DEMUX optique à utiliser dans un système CWDM avec guide d'onde à chute indirecte :

Dans ce qui suit, les changements créés dans les guides d'ondes en baisse ont été discutés et leurs effets sur les résultats du spectre de sortie pour rendre la structure plus fonctionnelle ont été étudiés. Dans ce cas, le guide d'onde de sortie indirect a été utilisé ,avec seul une sortie

en raison de la réduction de la structure en les plaçant ensemble, comme le montre la figure (II.30 (a)) . Cette structure a été capable de séparer la longueur d'onde (λ) de 1550,5 nm avec un coefficient de transmission de 98%, une largeur de bande (λ) de 1,2 nm et un facteur de qualité de 1292, comme le montre la figure(II.30 (b)). Comment la longueur d'onde est séparée est présenté sur la figure (II.30 (c)). Dans la structure ADF donnée, le niveau de puissance normalisé dans le port C a été de 98%, alors qu'il était égal à 0 dans les autres sorties,figure (II.30 (d)).

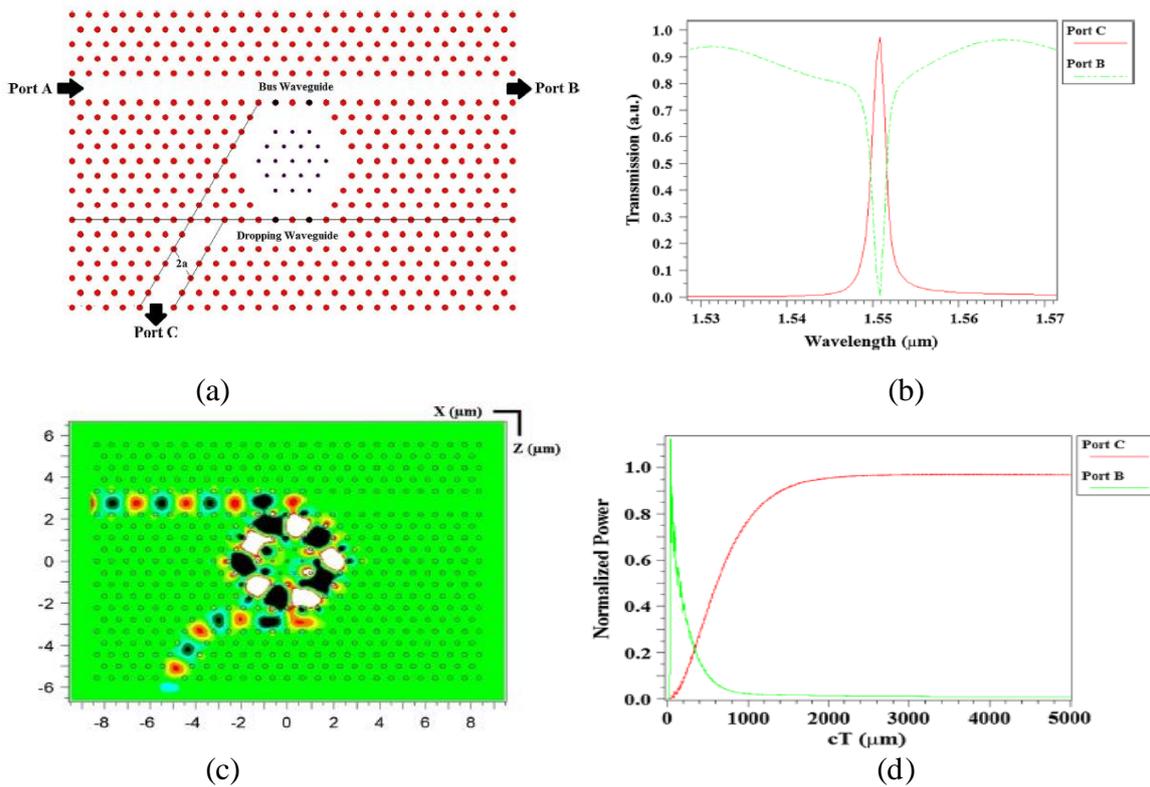


Figure II.30 : (a)Schéma de l'ADF proposé avec guide d'ondes à chute indirecte .(b) Spectre de sortie de l'ADF proposé avec guide d'onde à chute indirecte.(c)Comportement optique de l'ADF avec guide d'onde à chute indirecte en $\lambda = 1550,5$ nm.(d) champ électrique et puissance de sortie normalisée .

En utilisant la structure ADF donnée, un filtre anti-chute multicanal capable de séparer différentes longueurs d'onde et pouvant jouer le rôle d'un démultiplexeur optique a été conçu. Dans la conception de ce filtre, trois PhCRR hexagonaux proposés ainsi qu'un guide d'onde d'entrée pour transmettre la lumière d'entrée aux résonateurs en anneau ont été utilisés. Pour transmettre les longueurs d'onde séparées, des guides d'ondes indirectes ont été utilisés pour chacun des résonateurs en anneau, comme le montre la figure (II.31 (a)). Des tiges intérieures de rayons différents ont été utilisées pour séparer les longueurs d'onde ,les résultats de sa sortie le spectre peut être vu sur la figure(II.31 (b)).

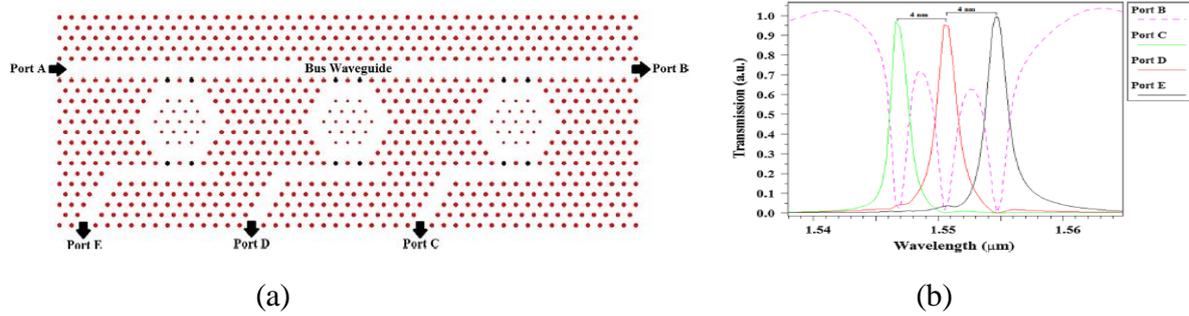


Figure II.31 : (a) La structure proposée d'un filtre à gouttes multicanaux avec trois PhCRR hexagonaux.(b) Spectre de sortie du filtre.

La structure de filtre à gouttes multicanaux conçue a un facteur de qualité approprié et un coefficient de transmission élevé avec un faible espacement des canaux, comme est montré en tableau II-7 :

Transmission (%)	Quality factor	Spectral width (nm)	Central wavelength (nm)	Resonant rod (nm)	Output port
97.5	1406	1.1	1546.8	65	Port C
95.3	1292	1.2	1550.7	67	Port D
100	1151	1.35	1554.7	69	Port E

Tableau II -7 : Résultats de simulation de la chute multicanal proposée filtre.

II.7.3.4 Conception d'un MUX / DEMUX optique à utiliser dans un système CWDM avec guide d'onde à chute indirecte :

Dans ce qui suit, les changements créés dans les guides d'ondes en baisse ont été discutés et leurs effets sur les résultats du spectre de sortie pour rendre la structure plus fonctionnelle ont été étudiés. Dans ce cas, le guide d'onde de sortie indirect a été utilisé ,avec seul une sortie en raison de la réduction de la structure en les plaçant ensemble, comme le montre la figure (II.32(a)) . Cette structure a été capable de séparer la longueur d'onde (λ) de 1550,5 nm avec un coefficient de transmission de 98%, une largeur de bande (λ) de 1,2 nm et un facteur de qualité de 1292, comme le montre la figure (II.32 (b)). Comment la longueur d'onde est séparée est présenté sur la figure (II.32(c)). Dans la structure ADF donnée, le niveau de puissance normalisé dans le port C a été de 98%, alors qu'il était égal à 0 dans les autres sorties ,figure (II.32(d)).

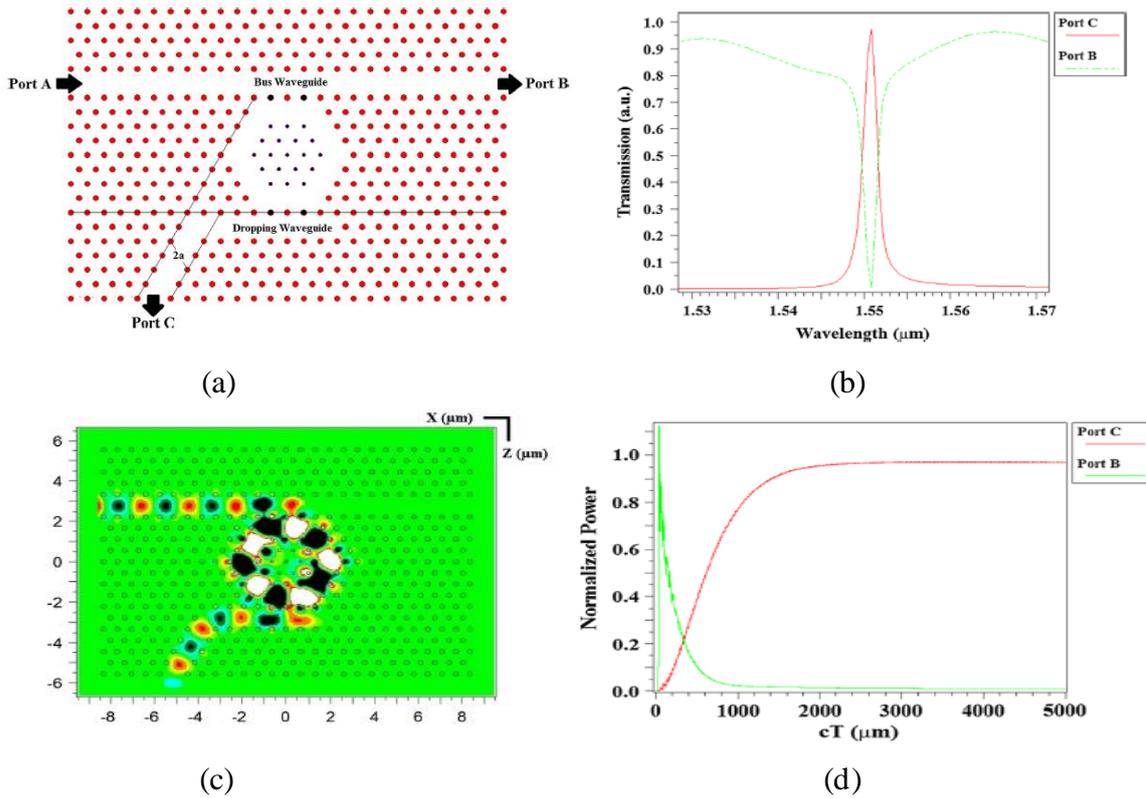


Figure 0.32 : (a) Schéma de l'ADF proposé avec guide d'ondes à chute indirecte. (b) Spectre de sortie de l'ADF proposé avec guide d'onde à chute indirecte. (c) Comportement optique de l'ADF avec guide d'onde à chute indirecte en $\lambda = 1550,5$ nm. (d) champ électrique et puissance de sortie normalisée .

En utilisant la structure ADF donnée, un filtre anti-chute multicanal capable de séparer différentes longueurs d'onde et pouvant jouer le rôle d'un démultiplexeur optique a été conçu. Dans la conception de ce filtre, trois PhCRR hexagonaux proposés ainsi qu'un guide d'onde d'entrée pour transmettre la lumière d'entrée aux résonateurs en anneau ont été utilisés. Pour transmettre les longueurs d'onde séparées, des guides d'ondes indirectes ont été utilisés pour chacun des résonateurs en anneau, comme le montre la figure (II.33(a)). Des tiges intérieures de rayons différents ont été utilisées pour séparer les longueurs d'onde, les résultats de sa sortie le spectre peut être vu sur la figure (II.33(b)).

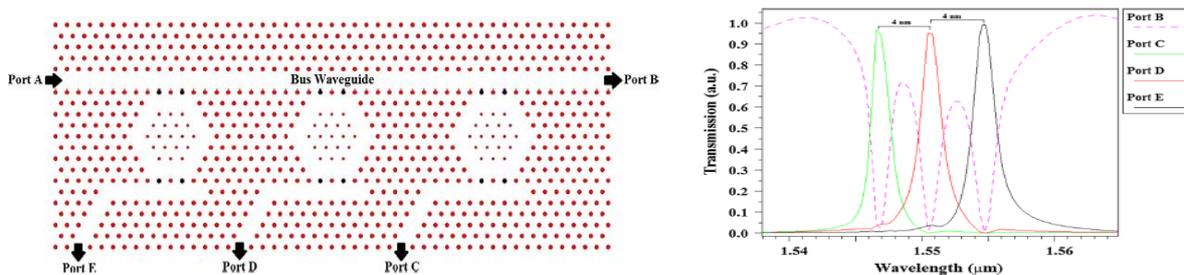


Figure II.33 : (a) La structure proposée d'un filtre à gouttes multicanaux avec trois PhCRR hexagonaux.(b) Spectre de sortie du filtre à gouttes multicanal proposé avec trois PhCRR hexagonaux.

Le coefficient de transmission, largeur de bande, facteur de qualité et l'espacement des canaux du filtre sont donné en détail dans le tableau II-8:

Transmission (%)	Quality factor	Spectral width (nm)	Central wavelength (nm)	Resonant rod (nm)	Output port
95.2	1546	1	1546.6	65	Port C
92	1409	1.1	1550.6	67	Port D
100	1351	1.15	1554.7	69	Port E

Tableau II -8 : Résultats de simulation du filtre à gouttes multicanal proposé .

II.7.4 Démultiplexeur de longueur d'onde compact à huit canaux utilisant des résonateurs à anneaux de cristal photonique modifiés pour les applications CWDM [84]:

Le démultiplexeur de longueur d'onde est un élément essentiel du réseau de communication optique. Il y'a de nombreuses techniques pour concevoir des démultiplexeurs optiques avec la plate-forme CPh comme l'utilisation de cavités résonantes, nanofils de silicium sur isolant (SOI) , magnéto-optique circulateurs, résonateurs en anneau (RR) ...

II.7.4.1 La structure proposée :

Dans l'étude qui a été faite, en introduisant une nouvelle forme de CPh RR, ils ont conçu un nouveau démultiplexeur de longueur d'onde à huit canaux en cascade huit RR avec différentes tiges intérieures RI (structure à cristal photonique). Un faible espacement des canaux, de faibles valeurs de diaphonie et de petite empreinte au sol est l'un des avantages cette structure par rapport à d'autres ouvrages.

La figure II.34 représente la structure du démultiplexeur qui est composé d'un réseau carré de CPh avec diélectrique tiges. La région RR, qui sert de cavité résonante, est composé d'un ensemble de points et de défauts disposés en cercle dans le substrat CPh. Comme le montre la

figure II.34, r , r_i , r_d et r_c indiquent le rayon des tiges CPh, du noyau RR, du RR et de la paroi RR respectivement.

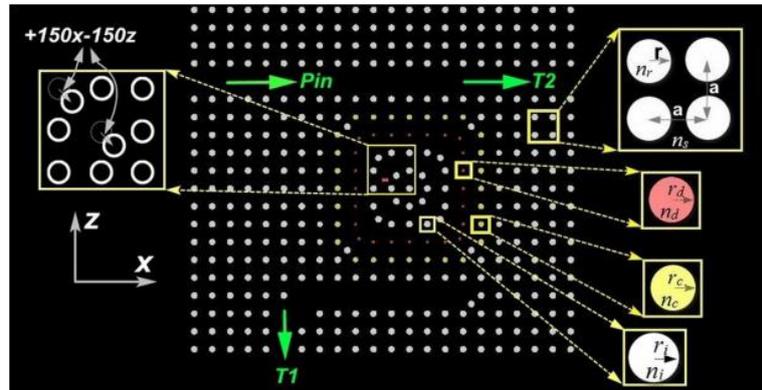


Figure II.34 : Le diagramme schématique du démultiplexeur proposé avec un seul RR.

La figure II.35 représente le diagramme de bande obtenue afin d’extraire les données photonique bandgap (PBG).

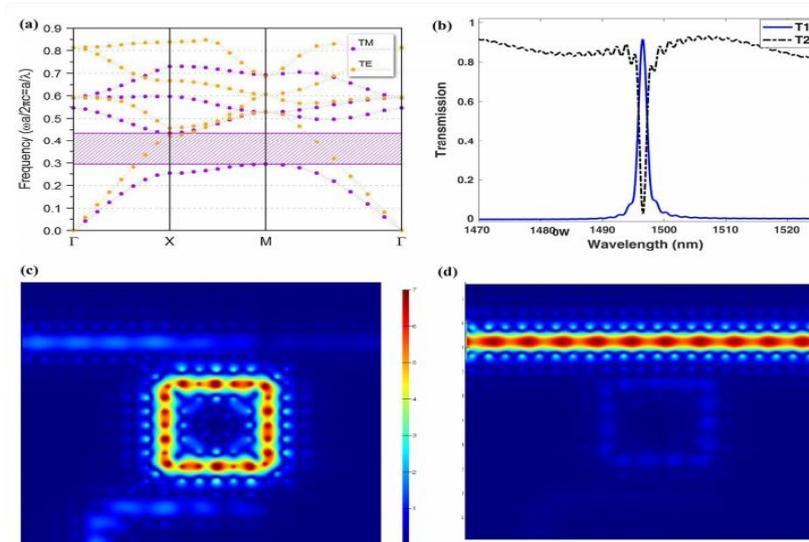


Figure II.35 : (a) Le diagramme de bande et le calcul PBG pour le CPh sans défaut, (b) le diagramme de sortie calculé pour les ports T1 et T2. (c) diagramme de champ magnétique pour une longueur d’onde de résonance de $\lambda=1496$ nm et (d) de résonance de $\lambda=1510$ nm.

Comme indiqué dans la figure (II.35 (a)), pour le réseau CPh carré, Il existe une région PBG pour Onde polarisée TM pour les fréquences indiquées, alors qu’aucune PBG n’existe pour l’onde de propagation TE. Comme le montre la figure (II.35 (b)) le RR conçu résonne dans $\lambda=1496$ nm avec 96% d’efficacité dans le port de largage (T1).

La méthode FDTD a été utilisé pour résoudre la propagation des ondes électromagnétique à l’intérieur de la structure CPh.

Ils ont pu obtenir le démultiplexeur suivant :

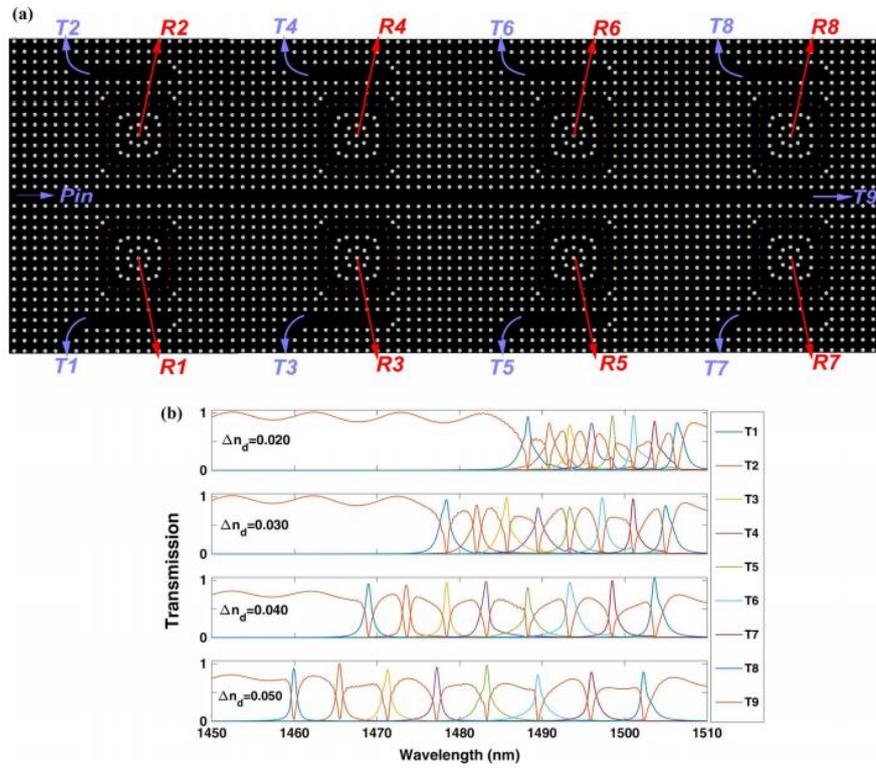


Figure II.36 : (a) un schéma la proposition de CPh à huit canaux démultiplexeur. (b) Les spectres de transmission du démultiplexeur à huit canaux proposés. Seul le RI des barres RR est varié, tandis que les autres Les paramètres sont supposés être constants. Chaque canal diffère de précédent en un. (Les étapes de Δn_d pour ces quatre spectres sont de 0,020,0,030, 0,040 et 0,050).

X_{ij}	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-	-62	-59	-70	-68	-67	-58	-73
2	-70	-	-35	-65	-66	-66	-57	-73
3	-99	-83	-	-58	-63	-57	-58	-75
4	-101	-98	-60	-	-53	-53	-54	-72
5	-108	-99	-120	-80	-	-46	-52	-65
6	-109	-105	-130	-110	-52	-	-36	-60
7	-110	-110	-135	-100	-115	-110	-	-50
8	-118	-115	-160	-120	-160	-130	-54	-

Tableau II -9 : Valeurs de diaphonie du démultiplexeur (dB) pour $\Delta n_d = 0,050$.

En conclusion, Cet objectif est résultant de l'ajustement de certains éléments physiques et structurels des paramètres tels que RR RI, le milieu environnant RI, les treillis RI Le facteur de qualité (Q) et la puissance transmise pour le RR unique sont déterminés respectivement à 1000 et 96%.

Les résultats de la simulation montrent que le démultiplexeur conçu fonctionne correctement. L'encombrement de l'appareil conçu est d'environ $\sim 115 \mu\text{m}^2$, ce qui en fait un appareil prometteur pour les futurs circuits intégrés photoniques.

II.7.5 Une nouvelle proposition de démultiplexeur à 4 canaux haute performance basé sur un cristal photonique 2D utilisant trois résonateurs en anneau en cascade pour des applications dans des systèmes optiques avancés [85]:

Les circuits intégrés tout optique (OIC) à base de cristaux photoniques (PC) ont gagné en importance ces dernières années en raison de leurs performances exceptionnelles dans les capteurs optiques, le traitement des données à grande vitesse et les réseaux optiques.

Les DEMUX sont les parties principales des réseaux optiques modernes ; ils permettent la séparation entre les longueurs d'onde fonctionnelles. Cette séparation est nécessaire pour transmettre et recevoir des données sur différentes longueurs d'onde. Dans cette étude, un nouveau DEMUX optique à 4 canaux basé sur une architecture de cristal photonique est proposé.

II.7.5.1 La structure proposée :

Chaque canal de la structure proposée est composé de trois résonateurs en anneau à cristaux photoniques (PCRR) en cascade, pris en sandwich entre un bus et un guide d'ondes de chute.

Il est démontré que le dispositif présente une perte d'insertion relativement faible et une isolation élevée pour chaque canal, ce qui indique réellement que le DEMUX optique à 4 canaux peut être utilisé dans les systèmes de communication optique DWDM.

II.7.5.2 Le cristal photonique :

Ce cristal photonique est un réseau cubique de tiges diélectriques immergées dans l'air. Les barreaux diélectriques sont constitués de silicium ayant un indice de réfraction de 3,46 ($\epsilon_{\text{Si}}=11,56$). Le nombre de barreaux diélectriques est de 28 et 32 dans les directions x et z, respectivement.

Comme le montre la Figure II.37, cette structure PC possède les deux modes TE et TM. Comme le mode TE a une bande passante plus large, il est considéré comme le mode souhaité. Ici, pour augmenter la largeur du mode TE, le rayon des barres diélectriques doit être augmenté. Dans une telle condition, le mode TE devient plus large et le mode TM devient plus étroit.

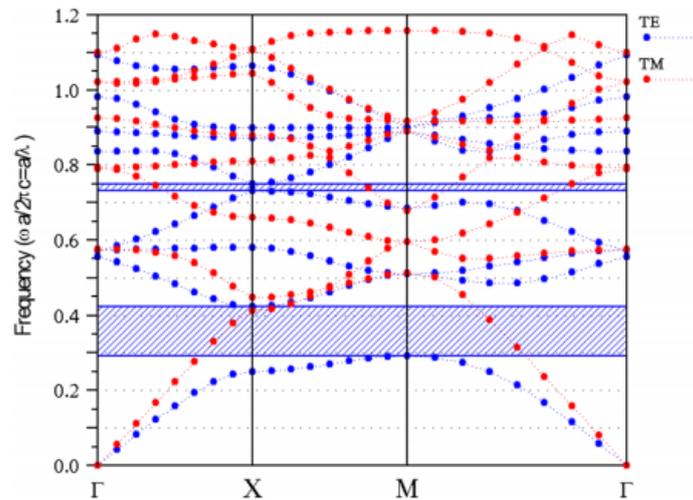


Figure II.37 : Schéma de photonique de la bande interdite avant l'introduction de la ligne et des défauts ponctuels.

Selon la BIP de $0.292 \leq a/\lambda \leq 0.423$ et le diagramme de la carte des écarts correspondant, le rayon des barres diélectriques et la constante de réseau sont calculés pour être respectivement de 118 nm et 590 nm.

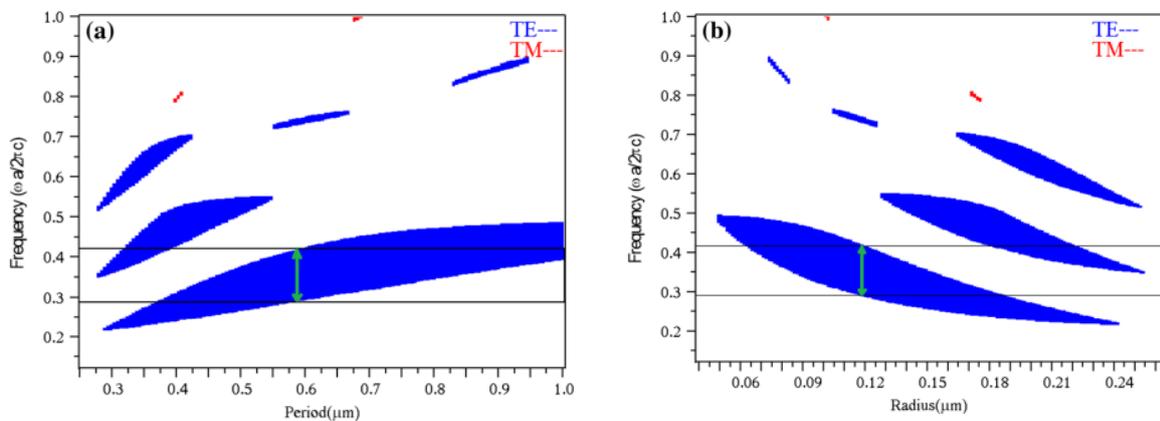


Figure II.38 : diagramme de carte d'écart : (a) variation de la BIP en fonction de (a) période et (b) rayon.

En conséquence, le cristal photonique qui est considéré comme le substrat du DEMUX proposé à une constante de réseau de 590 nm, un indice de réfraction de 3,46 et un rayon des barreaux diélectriques de 118 nm.

II.7.5.3 Principe de la structure proposé :

Dans cette étude, ils ont analysé un nouveau DEMUX optique à 4 canaux basé sur quatre guides d'ondes de bus en forme de L, quatre guides d'ondes de goutte et douze résonateurs en anneau dans un cristal photonique de silicium bidimensionnel.

La structure utilisé est illustrée sur la figure II.39 :

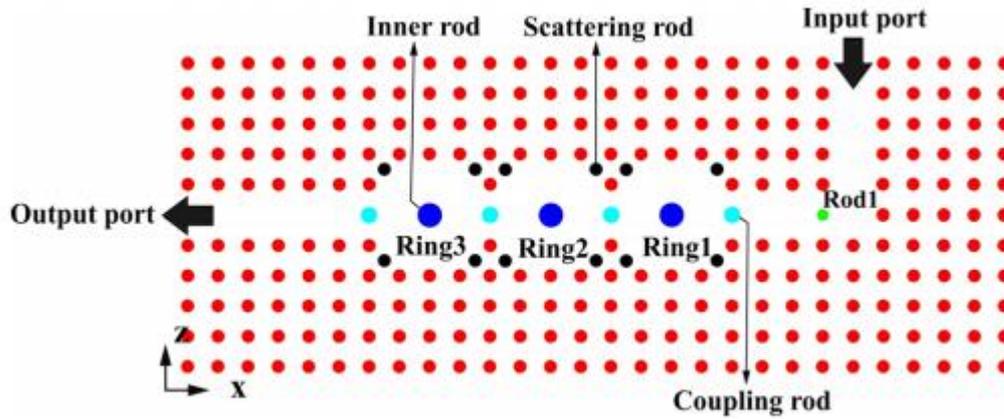


Figure II.39 : La structure de base du DEMUX proposé.

La méthode FDTD est recommandée pour étudier la propagation de la lumière dans les structures ci-dessus.

La figure II.40 illustre la variation de la transmission optique des trois résonateurs en anneau en cascade en fonction des changements de rayon des barres de couplage. Comme le montre la figure, en augmentant le rayon des tiges de couplage, de 112 à 122 nm, la transmission optique et les longueurs d'onde de sortie varient comme suit : la longueur d'onde de sortie augmente de 1532 à 1536 nm, et la transmission optique augmente de 80 à 98%.

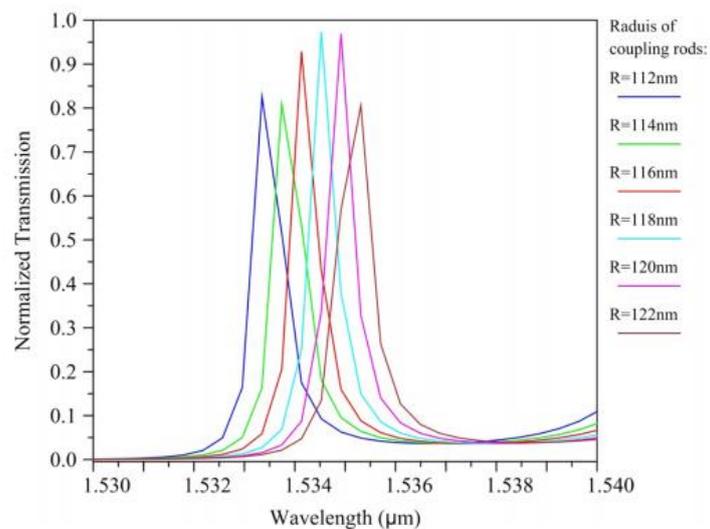


Figure II.40 : Variation de la longueur d'onde de sortie en fonction des changements de rayon des tiges de couplage dans la base structure.

II.7.5.4 Les résultats :

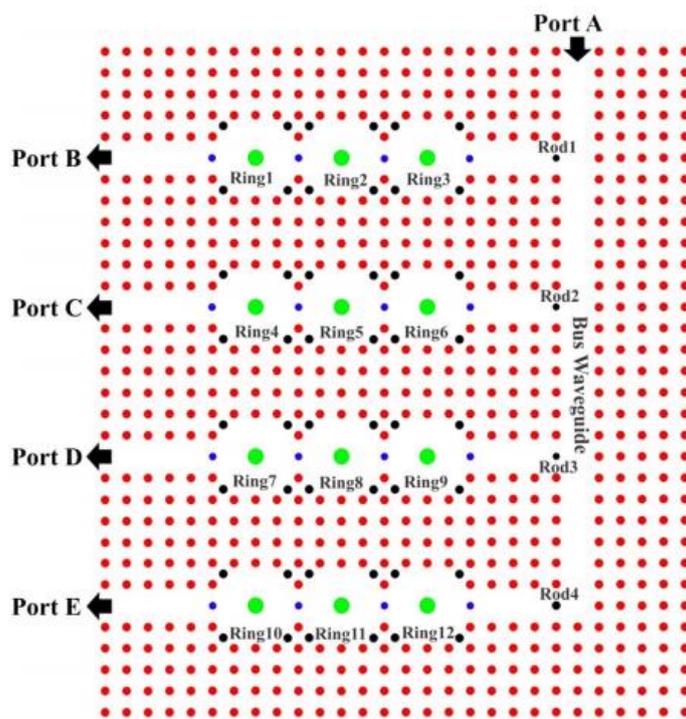
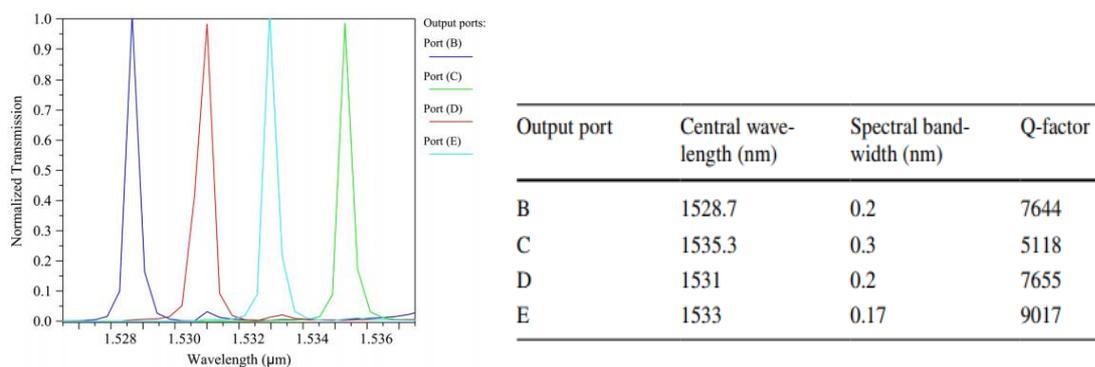


Figure II.41 : Représentation schématique du DEMUX basé sur un PC 2D avec treillis carré.

La structure se compose de douze PCRR, d'un guide d'ondes de bus et de quatre guides d'ondes de chute et de couplage. Dans le DEMUX proposé, trois PCRR en cascade sont utilisés dans chaque port. Les spécifications pour chacun de ces trois résonateurs en anneau en cascade sont les mêmes. En réglant les paramètres des résonateurs en anneau en cascade, les puissances de sortie et les longueurs d'onde du DEMUX sont calculées et sont présentées à la figure II.42.



(a)

(b)

Figure II.42 : (a) Spectres de transmission normalisés du DEMUX à quatre canaux proposés, (b) tableau montrant les résultats du projet 4 canaux 2DPC DEMUX.

Les valeurs de diaphonie sont présentées dans le tableau se trouvant dans la figure II.42. On peut voir dans le tableau que les valeurs minimales et maximales de la diaphonie sont respectivement de - 46,68 dB et - 9,79 dB.

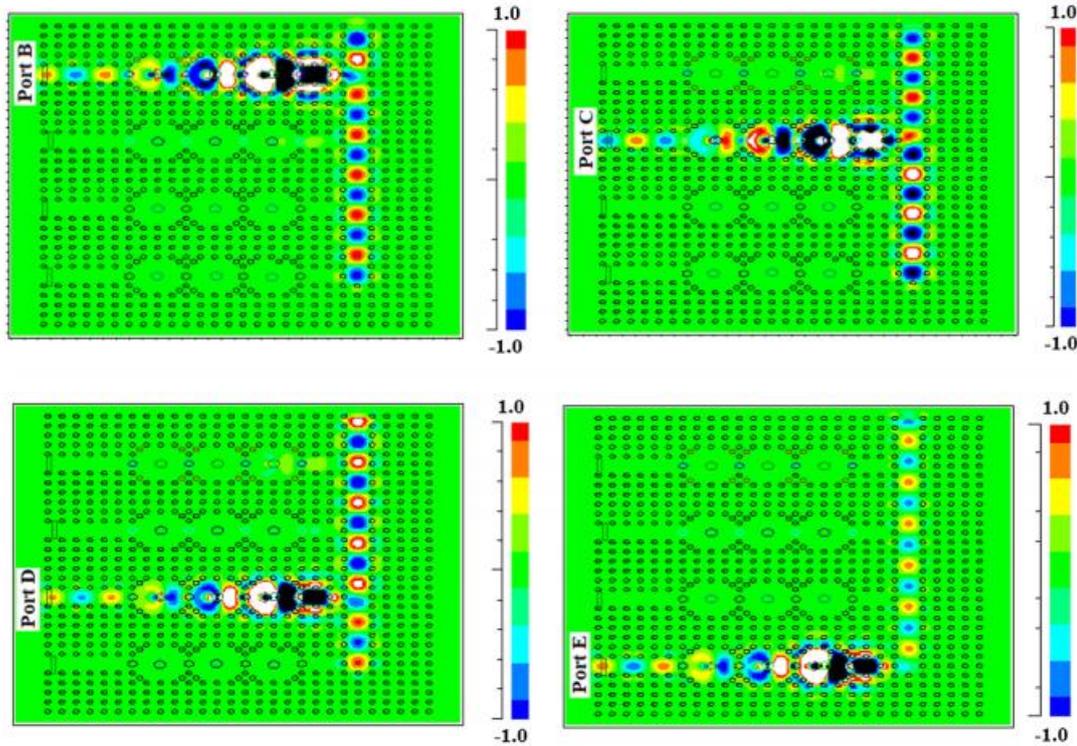


Figure II.43 : Distribution des champs optiques dans le DEMUX 4 canaux proposé. (a) $\lambda = 1528,7$ nm (port de sortie B), (b) $\lambda = 1535,3$ nm (port de sortie C), $\lambda = 1531$ nm (port de sortie D) et $\lambda = 1533$ nm (port de sortie E).

La figure II.43 présente la distribution du feutre optique dans les ports B, C, D et E aux longueurs d'onde de 1528,7 nm, 1535,3 nm, 1531 nm et 1533 nm, respectivement.

En conclusion, Selon les simulations, le facteur de qualité moyen et l'efficacité de transmission de notre appareil sont respectivement de 7358,5 et 99,25%.

Le DEMUX à 4 canaux proposé est accordable pour différentes puissances de sortie et longueurs d'onde en modifiant le rayon du couplage et des tiges internes, l'indice de réfraction des tiges internes et le positionnement des tiges de diffusion dans la structure des résonateurs en anneau. Le DEMUX proposé présente des propriétés significatives pour être utilisé dans les systèmes de communication optique.

II.8 CONCLUSION :

Dans ce chapitre, nous avons abordé, la possibilité de concevoir des dispositifs pour l'optique intégrée avec des cavités et des guides d'ondes en introduisant des défauts dans un cristal photonique, ce qui amène à des possibilités de filtrage et de multiplexage en longueur d'onde. En premier lieu on a donné une description générale et principe de fonctionnement associées aux démultiplexeurs a cristaux photonique qui a pour objectif d'insérer ou d'extraire des longueurs d'onde bien précise, puis nous avons fait une étude sur la cavité d'un CP-2D et son principe de contrôler ses propriétés optiques en modifiant ses paramètres géométriques, ensuite nous somme passée au guide d'onde ainsi que les filtre add-drop réaliser par le couplage entre les guides et les cavités à cristaux photoniques. Pour finir nous avons présenté les différentes applications très récentes, afin d'avoir un aperçu sur la fonction de démultiplexage en longueur d'onde, obtenu par l'introduction des défauts.

Chapitre III

Résultats et discussions.

III.1 Introduction :

La plupart des applications sur les cristaux photoniques sont basées sur leur bande interdite. Pour disposer d'une fréquence permise à l'intérieure de cette bande, il est nécessaire d'ajouter des défauts dans cette structure périodique. Ces défauts sont réalisés en modifiant localement la géométrie du cristal.

Les géométries possibles sont quasi-infinies et peuvent aller de la modification de la taille ou de l'indice d'un seul motif du cristal à des défauts plus étendus comme le retrait de rangées entières de motif [2].

Dans ce chapitre nous présenterons la conception de nouveaux démultiplexeurs à cristaux photoniques bidimensionnels, ainsi que ses résultats de simulation qui sont obtenu à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics.

En premier lieu, nous allons exposer les résultats obtenus pour les guides d'onde avec et sans défaut en structure à base de cristaux photonique 2D en maille carrée et triangulaire. Mais avant cela, nous présenterons un bref rappel sur le logiciel COMSOL qu'on va utiliser dans nos simulations.

III.2 Définition du logiciel COMSOL :

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 [86].

COMSOL est un Programme de calcul, basée sur l'équation différentielle partielle de la solution numérique par la méthode des éléments finis. Utilisé pour des problèmes scientifiques et techniques complexes, permettant de simuler quasiment tous les processus physiques décrits par une équation différentielle partielle. Le programme fait face à toute les tache, même les plus difficile grâce aux divers solveurs qui contient, offrant la simplicité et flexibilité d'utilisation avec une gamme de tâches extrêmement large qui peut être modélisées dans le programme [87].

Le logiciel COMSOL version 5.4a est utilisé pour la simulation des phénomènes liés aux matériaux, ainsi que pour la technologie de la photolithographie [86].

III.3 Etude des structures bidimensionnelles sans défaut :

Notre travail consiste à réaliser une structure de démultiplexeurs en cristaux photoniques, et de déterminer les performances du démultiplexeur conçus en termes de transmission et de réflexion avec certain cahier de charge.

Notre étude est sur une structure à maille élémentaire carrée et triangulaire 2D déconnectée constituée de tiges à GaAs dans l'air ayant un indice de réfraction $n=3,37$. Les performances de ces structures en termes de transmission et réflexion obtenues par simulation seront discutées, et le champ magnétique sera présenté.

III.3.1 Structures bidimensionnelles sans défaut à maille carrée :

L'étude est conçue sur une structure cristalline bidimensionnelle sans défaut dans un réseau carré qui fait 17 rangées de longueur et 17 rangées de largeurs. Le nombre de motifs dans le réseau est égal à 289 tiges cylindriques.

La figure III.1 illustre la structure d'un CP-2D sans défaut à maille carrée :

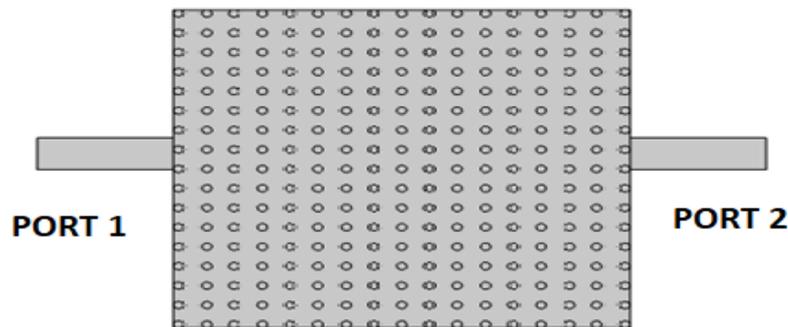


Figure III.1 : structure carrée sans défaut, $a=0.614 \mu\text{m}$, $r=0.113 \mu\text{m}$.

La figure III.2 représente la réponse spectrale en termes de transmission en fonction de la longueur d'onde :

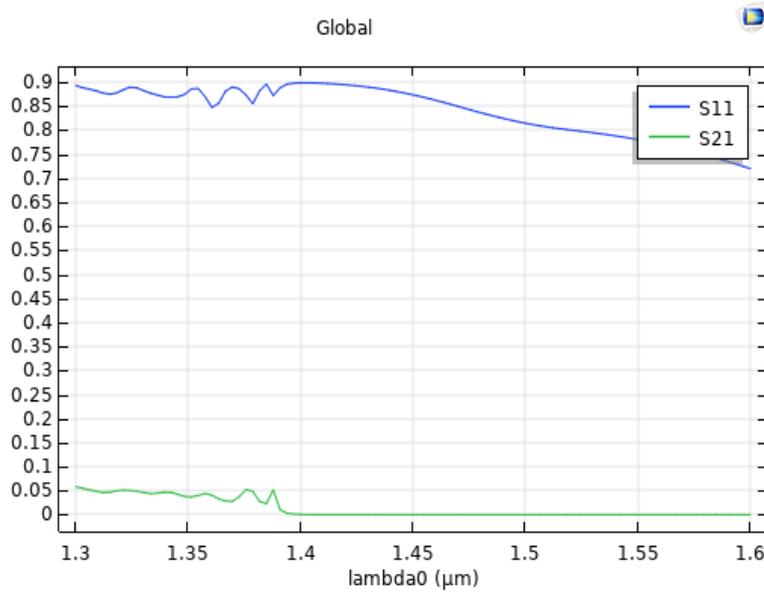


Figure III.2 : Réponse spectrale de transmission et réflexion d'un CP-2D déconnecté sans défaut à motif carré.

On remarque que la transmission est quasiment nulle sur l'intervalle $[1.3, 1.6] \mu\text{m}$, par contre la quantité de réflexions est très élevée, qui est de 90%. Ceci prouve clairement que dans la structure à maille carrée sans défaut, le phénomène de guidage est absent.

La figure III.3 représente la cartographie du champ électrique E_z d'une structure à CP carrée dont le phénomène du guidage de l'onde électromagnétique est absent au sein du cristal, ce qui confirme notre résultat de la figure III.2 :

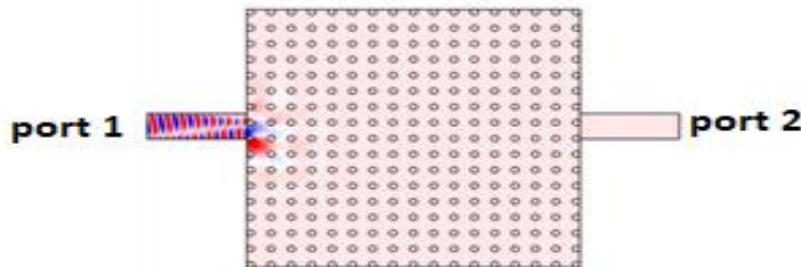


Figure III.3 : Illustration de la propagation du champ électrique E_z dans un cristal photonique 2D carré sans défaut.

III.3.2 Structures bidimensionnelles sans défaut à maille triangulaire :

L'étude se fait en second lieu sur une structure composée de piliers de GaAs de section circulaire dans l'air à réseau triangulaire qui fait 10 rangées de longueur et 10 rangées de largeur. Le nombre de motifs dans le réseau est égal à 100 tiges cylindriques.

La figure III.4 illustre la structure d'un CP-2D sans défaut à maille triangulaire :

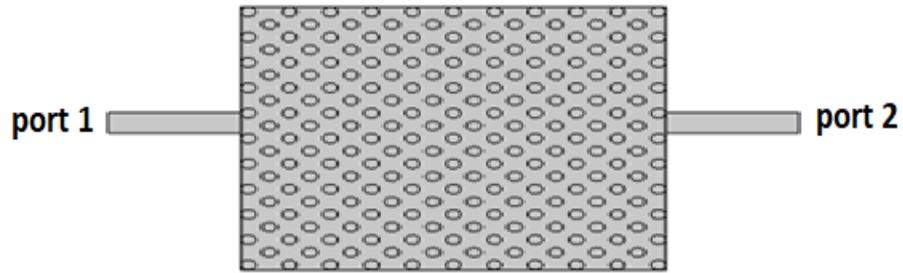


Figure III.4 : Structure triangulaire sans défaut, $a=0.614\mu\text{m}$, $r=0.113\mu\text{m}$.

La figure III.5 illustre la réponse spectrale en termes de transmission et de réflexions en fonction de la Longueur d'onde sur l'intervalle $[1.3-1.6]\mu\text{m}$. On remarque que le coefficient de transmission est nul, donc pour un réseau à maille triangulaire le guidage est aussi absent qu'un réseau à maille carrée, lorsqu'on introduit aucun défaut.

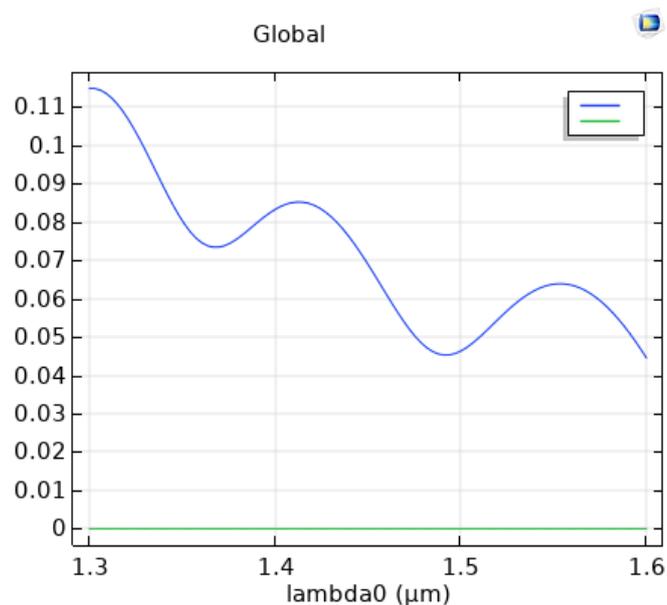


Figure III.5 : Réponse spectrale de transmission et réflexion d'un CP-2D déconnecté sans défaut à motif triangulaire.

La figure III.6 représente la cartographie du champ électrique E_z de la structure CP à maille triangulaire, où on remarque clairement le retour de l'onde à l'entrée de la structure :



Figure III.6 : Illustration de la propagation du champ électrique E_z dans un cristal photonique 2D triangulaire sans défaut.

III.4 Etudes des structures bidimensionnelles avec défaut :

En introduisant des défauts au sein du cristal, des guides d'onde sont créés. La lumière se propage tout au long du guide selon une direction bien choisit, ayant une fréquence appartenant à la bande interdite photonique. Les défauts introduit (défauts linéaire) consiste a éliminé une rangée ou plus dans le cristal de structure parfaite et périodique à réseau carré et de tiges diélectrique à base de GaAs plongées dans l'air.

III.4.1 Conception du guide mono-rangée $W_1^k A$ à maille carrée :

La figure III.7 présente un guide d'onde à base d'un CP 2D à maille carrée, obtenue par la suppression d'une seule rangée de trous d'air, Le guidage tout au long de ce défaut linéaire, produit un guide d'onde mono-rangée $W_1^k A$.

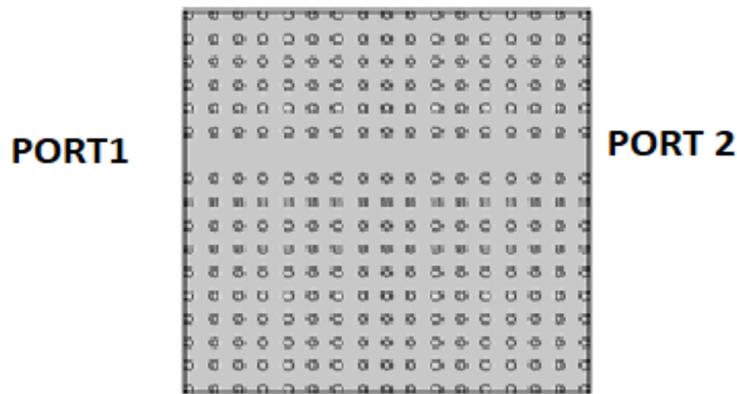


Figure III.7 : Représentation de la structure carrée avec défaut : $a=0.614 \mu m$, $r=0.113 \mu m$.

La figure III.8 illustre les résultats de la simulation obtenus en termes des coefficients de transmission d'un guide d'onde à base d'un CP-2D déconnecté à maille carrée $W_1^k A$. Le spectre simulé est dans l'intervalle de longueur $[1.3, 1.6] \mu m$.

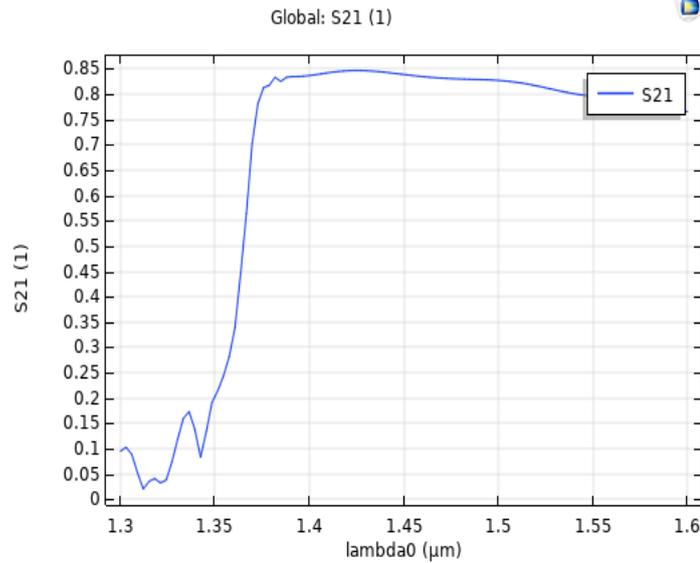


Figure III.8 : La réponse spectrale en transmission du guide mono-rangée.

On remarque que la réponse spectrale atteint son maximum au niveau de l'ordre de 85% pour une longueur d'onde de 1.424 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 III.9 représente les répartitions spatiales temporelles du champ électrique E_z du guide mono-rangée W_1^kA 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 :

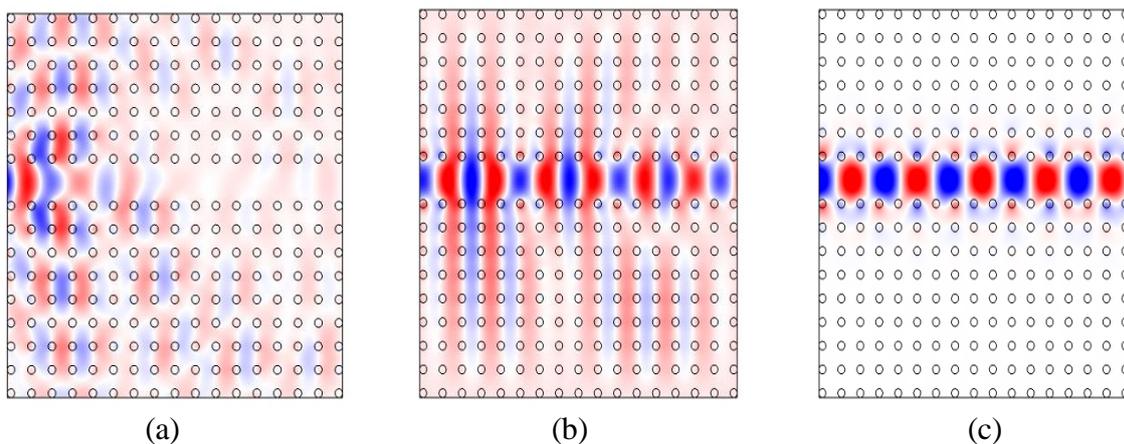


Figure III.9 : Répartition du champ électrique E_z d'un guide d'onde mono rangée à base d'unCP-2D déconnecté à maille carré pour différentes longueurs d'ondes en mode TE : (a) pour $\lambda=1.31 \mu\text{m}$ et (b) pour $\lambda=1.37 \mu\text{m}$. (c) pour $\lambda=1.55 \mu\text{m}$.

III.4.2 Conception du guide à trois rangées omises W_3^kA à maille triangulaire :

Dans le cas d'un guide d'onde à trois rangées omises W_3^kA à maille triangulaire, trois rangées de piliers de GaAs sont supprimées comme il est représenté sur la figure ci-dessous. Les paramètres géométriques et physiques utilisés dans la conception de la structure sont : $a=0.6$, $r=0.12$, $n= 3,37$.

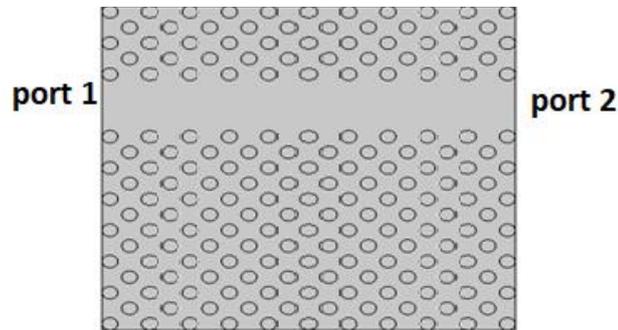


Figure III.10 : Représentation schématique d'un guide d'onde W_3^kA à base d'un CP-2D déconnecté à maille triangulaire.

La figure III.11 illustre le spectre de transmission et de réflexion du guide d'onde W_3^kA où on remarque clairement l'ouverture d'une large bande qui atteint les 81%, où la longueur d'onde $1.55 \mu\text{m}$ est inclut.

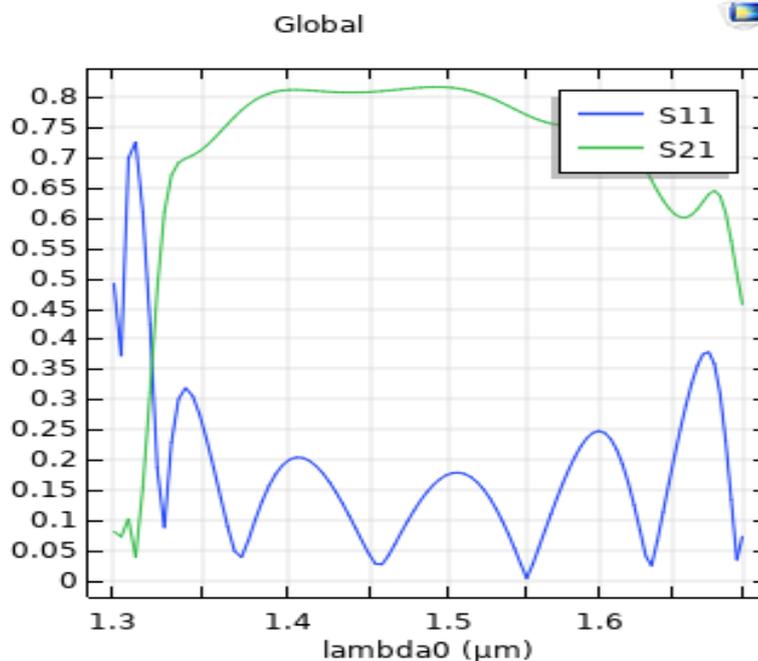


Figure III.11 : Réponse spectrale en termes de transmission et réflexion du guide W_3^kA . $r/a = 0.2$, $a=0.6 \mu\text{m}$.

La figure III.12 montre la répartition du champ électrique d'un guide d'onde W_3^kA à base d'un CP-2D déconnecté à maille triangulaire pour les trois cas de longueurs d'ondes

visualisées. Ceci nous permet de bien voir la différence de distribution du champ tout au long du guide, où l'on remarque bien un confinement total pour la longueur d'onde $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ par rapport à $\lambda = 1.32 \mu\text{m}$ et $\lambda = 1.35 \mu\text{m}$. Donc, on peut déduire que $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ est la longueur d'onde désirée.

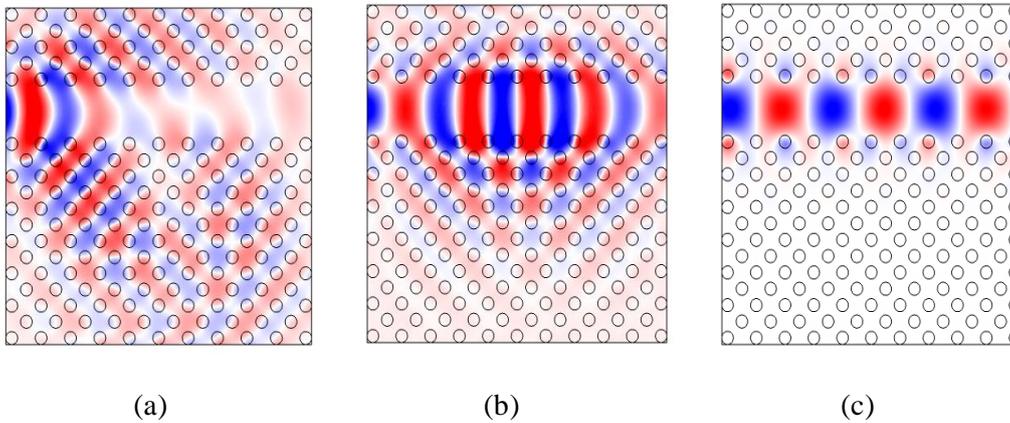


Figure III.12 : Répartition de champ électrique E_z dans un guide d'onde W_3^kA proposé pour les différentes longueurs d'onde $\lambda = 1,3 \mu\text{m}$ (a), $1,32 \mu\text{m}$ (b), $1,55 \mu\text{m}$ (c).

III.5 Simulation d'un filtre en anneau :

III.5.1 Filtre Channel drop à base de CPs-2D avec un seul résonateur en anneau à noyau en forme de cercle :

L'étude est sur un filtre channel drop, avec 17 rangées de longueur et 17 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 port 1 et 2 sont les terminaux de sortie du guide bus, et le port 3 est le terminal du guide drop comme est montré sur la figure III.13.

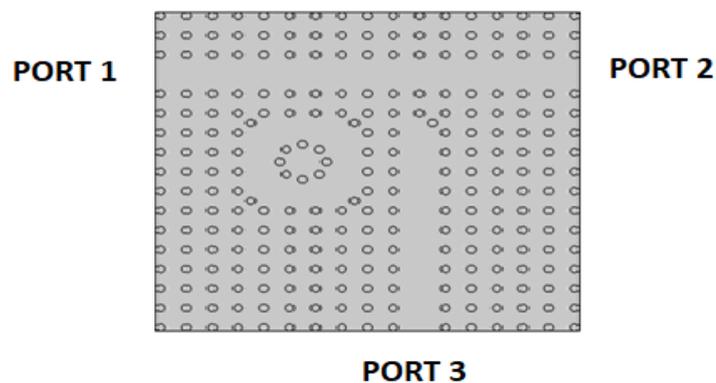


Figure III.13 : Structure carrée avec un seul anneau : $a = 0.614 \mu\text{m}$, $r = 0.113$, $n = 3,37$.

Les spectres de la transmission normalisée du filtre ont été obtenus à l'aide du simulateur COMSOL Multiphysics comme est montré sur la figure III.14.

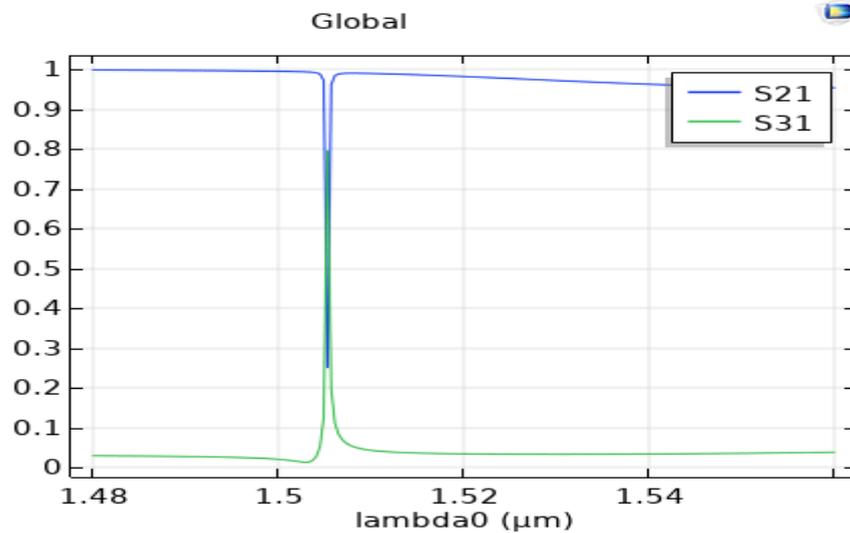


Figure III.14 : Représentation de la réponse spectrale en transmission dans la bande [1.48-1.56] μm .

Notre but est d'adapter le filtre autour de 1.55 μm . 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 les résultats suivants :

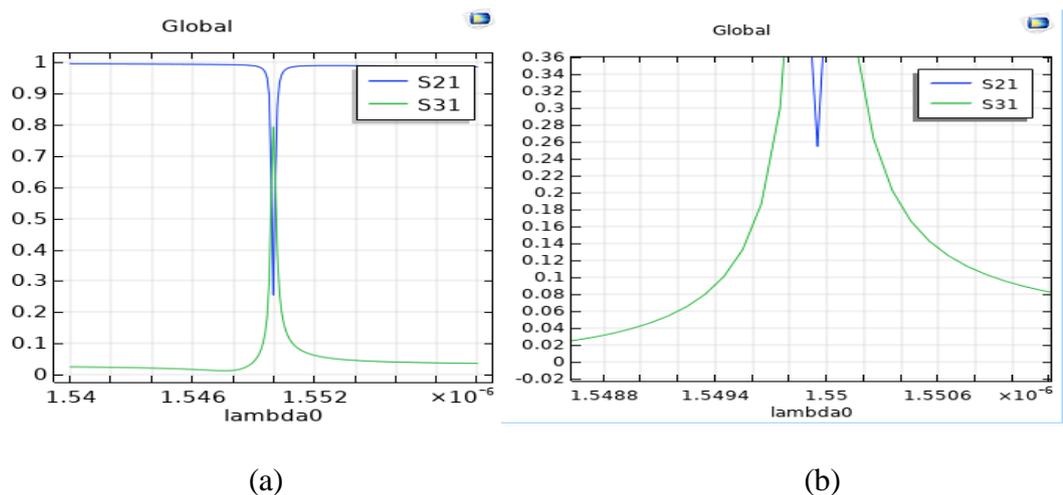


Figure III.15 : (a) La réponse spectrale après redimensionnements entre [1.54-1.56] μm . (b) la réponse spectrale après avoir zoomer.

On remarque bien que l'efficacité de notre structure est élevée, qui atteint les 80% pour le port 3 et 25% pour le port 2, autour de la longueur d'onde 1.55 μm .

Sur la figure III.16, on schématise la répartition du champ électrique E_z dans la structure carrée à un seul anneau.

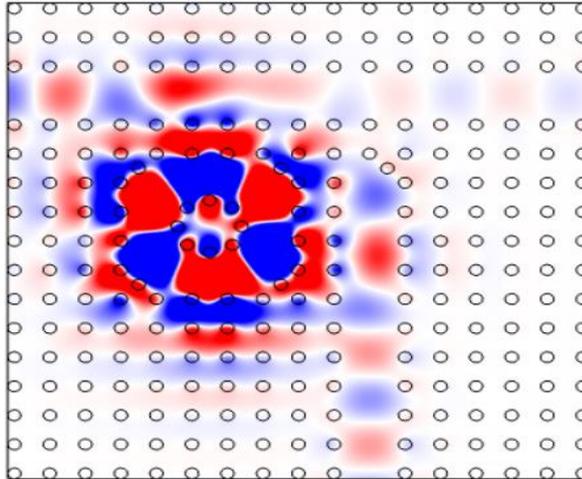


Figure III.16 : Répartition de champ électrique E_z dans un filtre en anneau proposé.

III.5.2 Résonateur en anneau quasi carré (QSRR) à noyau en forme de diamant conçu sur des PhC à réseau carré :

Les étapes pour réaliser un démultiplexeur à deux guides d'onde perpendiculaires couplés à travers un noyau QSRR en forme de diamant sont les suivantes :

- Supprimer une rangée de tiges pour former un guide d'onde à une seule rangée W_1 (le bus principal).
- Retirer 11 tiges de la 12^{ème} colonne afin d'obtenir le guide d'onde de la sortie
- On a ajouté deux tiges réfléchissantes afin d'obtenir le plus d'énergie à la sortie du filtre.
- Pour finir, on a conçu une cavité grâce à la suppression du réseau 5×5 qui est séparés de deux rangées par rapport au guide d'ondes du bus principal, la cavité est ensuite remplie par un noyau en forme de diamant 3×3 , qu'on a obtenu en effectuant une rotation à 45° .

Après avoir réalisé ces étapes, on obtient la structure de la figure III.17 :

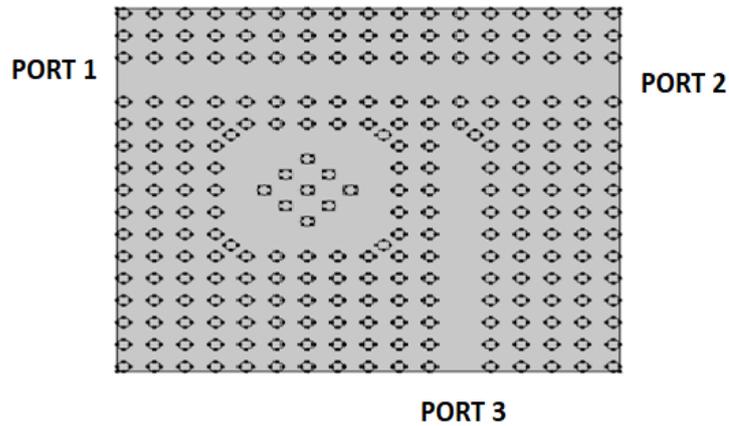


Figure III.17 : structure carrée avec un seul anneau : $a=0.62\mu\text{m}$, $r=0.134$.

La figure III.18 représente la réponse spectrale du filtre, qui atteint une énergie maximale vers la sortie à l'ordre de 73% pour le port 3 et 20% pour le port 2, adaptée autour de la longueur d'onde $1.55\mu\text{m}$.

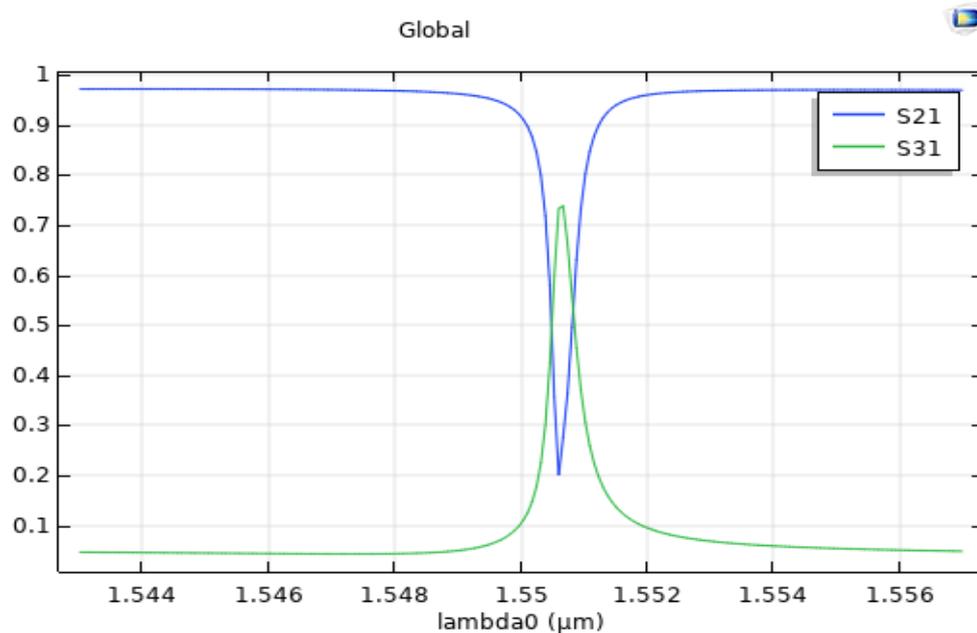


Figure III.18 : Représentation de la réponse spectrale en transmission dans la bande $[1.54-1.56]\mu\text{m}$.

Sur la figure III.19, on schématise la répartition de champ électrique E_z dans la structure carrée à un seul anneau QSRR.

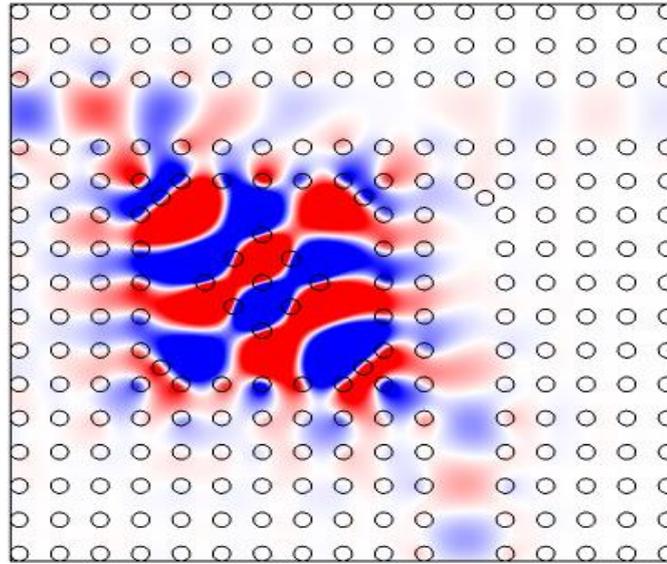


Figure III.19 : Répartition de champ électrique E_z du filtre QSRR.

III.6 Les démultiplexeurs en longueur d'onde :

L'introduction de défaut linéaire dans un CP, est l'élément de base pour la conception d'un DEMUX. Notre étude est de concevoir de nouvelles topologies de démultiplexeur en longueur d'onde à plusieurs canaux, en utilisant le filtre Channel Drop QSRR multicanal qui est capable de séparer les différentes longueurs d'onde et peut jouer le rôle d'un démultiplexeur optique.

III.6.1 Démultiplexeur à deux canaux à base des cristaux photoniques 2D :

Le démultiplexeur proposé est basé sur deux filtres add-drop QSRR à noyau en forme de diamant qu'on a déjà étudié, avec l'introduction d'une seule tige à la sortie du guide d'onde principal, pour que l'énergie atteint son maximum à la sortie des deux guides port 2 et port 3 comme il est montré sur la figure III.20 :

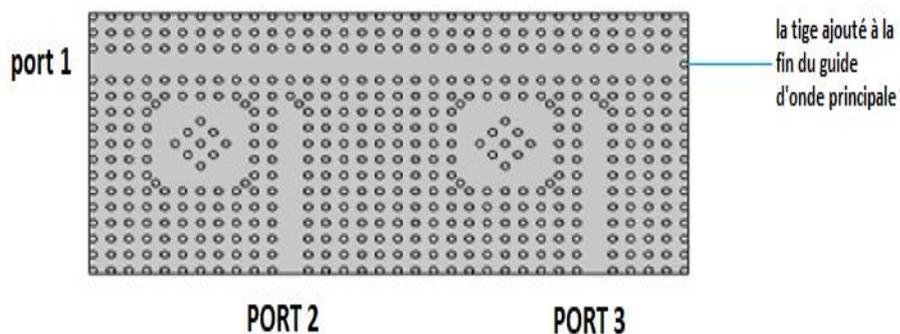


Figure III.20 : Structure schématique du démultiplexeur à base de CP-2D à deux anneaux avec $a=0.62\mu m$, $r=0.134\mu m$, $n=3,37$.

Par la suite, nous allons varier le rayon relatif "R" de l'anneau intérieur. Le rayon est défini par la relation : $R=X_i*r$, où :

r : est le rayon de la tige ($r=0.134$)

X_i varie entre 1 et 1.013.

La variation des rayons relatifs de l'anneau intérieur est faite afin d'acquérir le déplacement de la longueur d'onde de résonance.

La figure III.21 représente un démultiplexeur optique formé par deux résonateurs en anneau quasi carré, à base d'un CP-2D à maille carrée avec la variation du rayon relatif introduit.

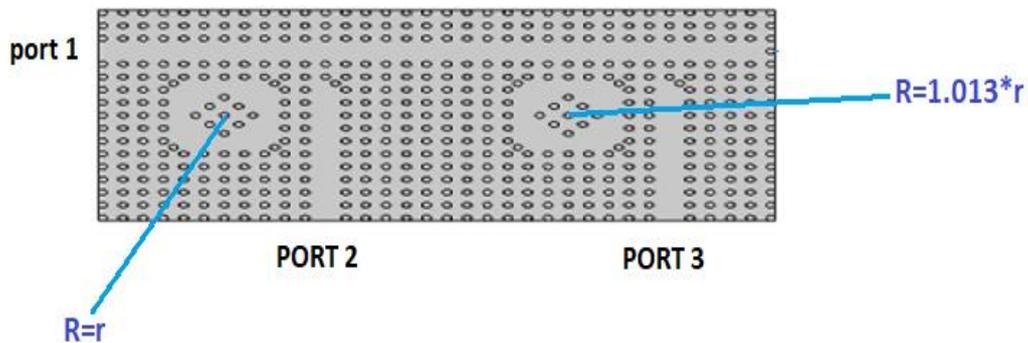


Figure III.21 : Structure schématique du démultiplexeur à base de CPS à deux anneaux avec les rayons relatifs introduit.

La figure III.22 illustre la réponse spectrale du démultiplexeur optique en fonction de la longueur d'onde, s'étalant sur la gamme $[1.545, 1.565]$ μm , pour tous les rayons relatifs "R" de l'anneau intérieur introduit, on obtient une commutation de résonance aux longueurs d'onde correspondantes de $\lambda_{1R} = 1,5507\mu\text{m}$ et $\lambda_{2R} = 1.5548\mu\text{m}$ avec une efficacité de 75% et 83% respectivement .

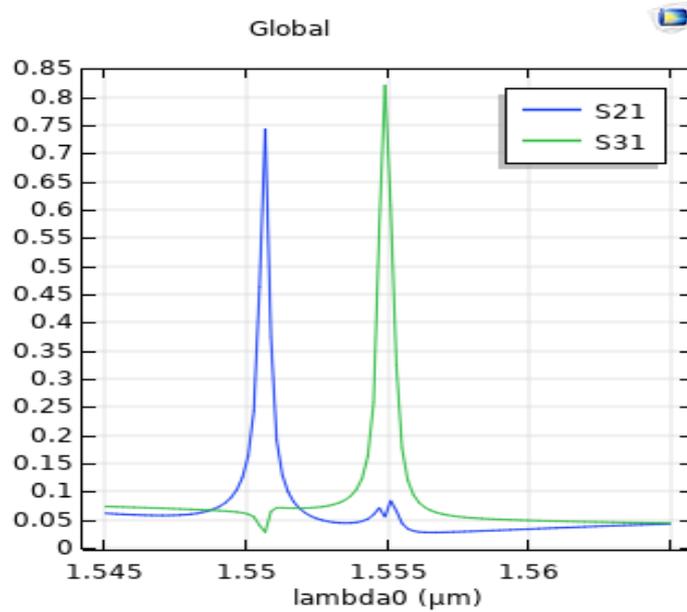


Figure III.22 : Les résultats de transmission simulés à deux anneaux QSRR pour tous les rayons relatifs intérieurs.

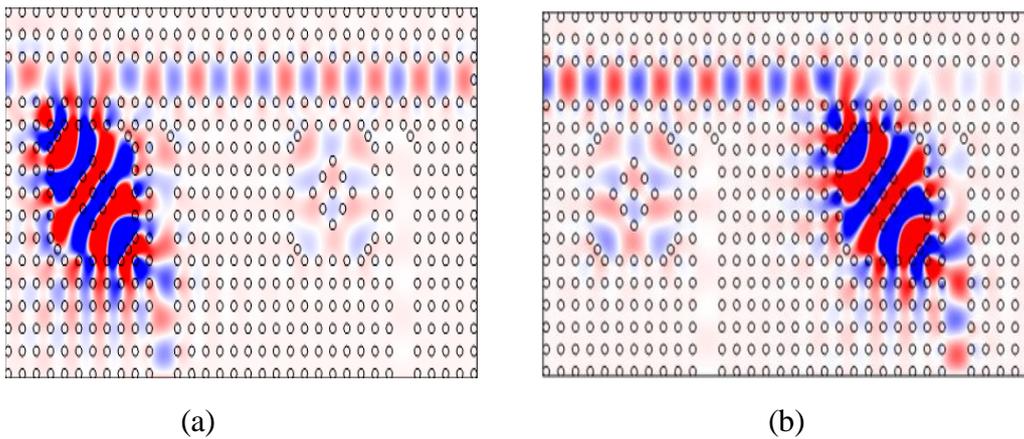


Figure III.23 : Répartition de champ électrique E_z dans un filtre à deux canaux pour les deux longueurs d'ondes $\lambda_{1R} = 1,5507\mu\text{m}$ (a), $\lambda_{2R} = 1,5548\mu\text{m}$ (b).

III.6.2 Démultiplexeur à quatre canaux à base des cristaux photoniques 2D :

Le démultiplexeur proposé est basé sur un ensemble de quatre filtres add-drop QSRR à noyau en forme de diamant, comme est montré sur la figure III.24 :

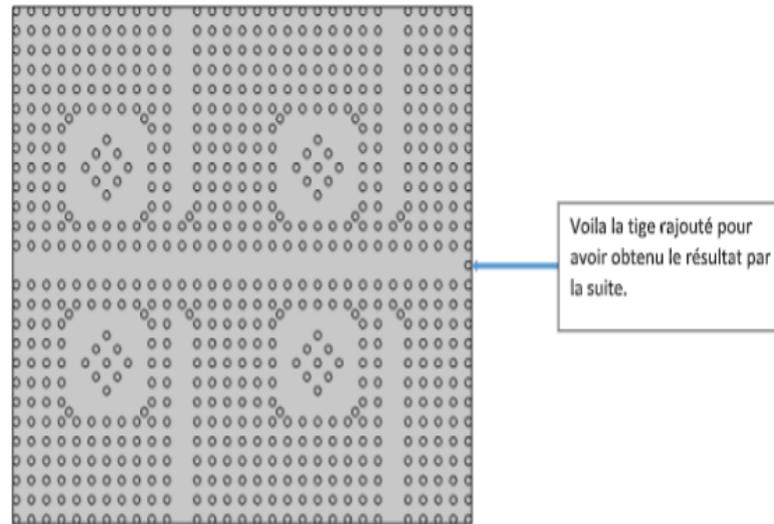


Figure III.24 : Structure schématique du démultiplexeur à base de CPS à quatre anneaux avec $a=0.62\mu m$, $r=0.134$, $n=3,37$.

Par la suite, nous allons varier le rayon relatif "R" ($R=X_i*r$) pour chaque anneau intérieur. La variable X_i varie entre : 0.968 ,0.985 ,1 ,1.013 .

La figure III.25 illustre un démultiplexeur optique formé par quatre résonateurs en anneau quasi carré, à base d'un CP-2D à maille carrée avec les différents rayons relatifs introduits.

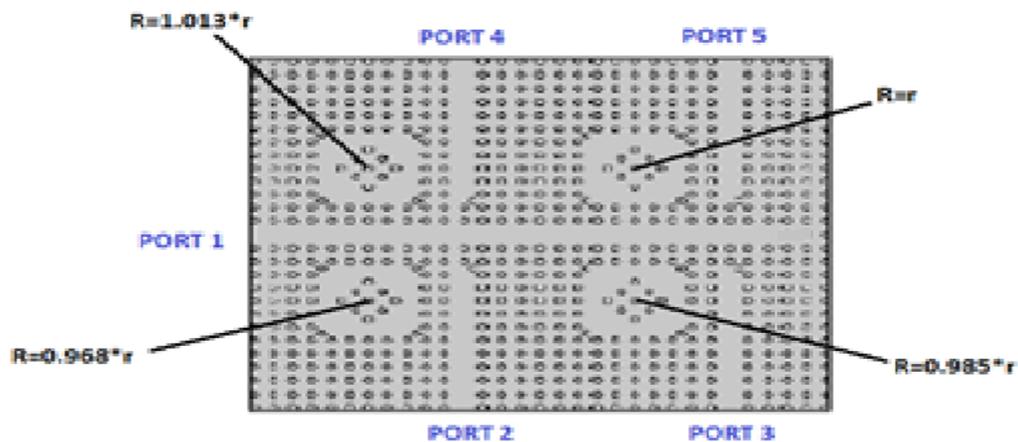


Figure III.25 : Structure schématique du démultiplexeur à base de CPS à quatre anneaux avec les différents rayons R introduit.

La figure III.26 représente la réponse spectrale du démultiplexeur optique en fonction de la longueur d'onde, s'étalant sur la gamme $[1.533, 1.565] \mu m$ pour tous les rayons relatifs intérieurs on obtient une commutation de résonance aux longueurs d'onde correspondantes de $\lambda_{1R} = 1.5423\mu m$, $\lambda_{2R} = 1.5464\mu m$, $\lambda_{3R} = 1.5507\mu m$ et $\lambda_{4R} = 1.5548\mu m$ avec une efficacité de 61%,90%,96% et 79% respectivement .

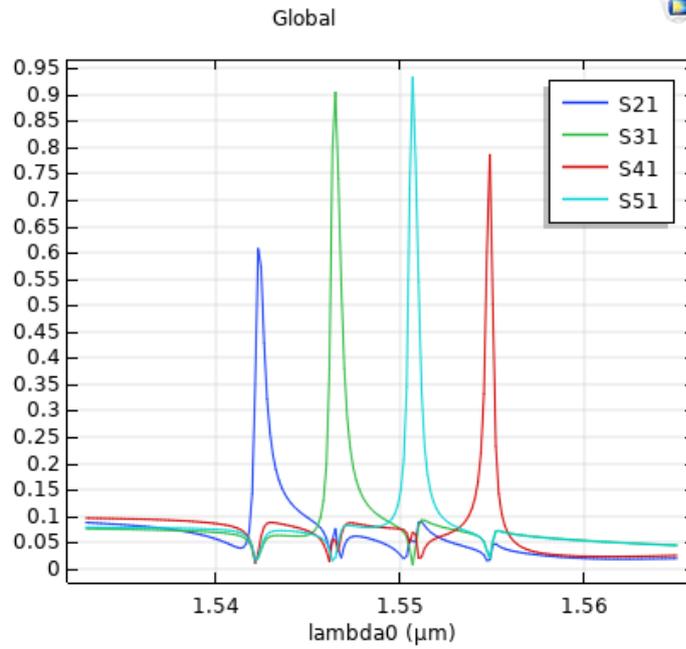


Figure III.26 : Les résultats de transmission simulés à quatre anneaux QSRR pour tous les rayons relatifs intérieurs.

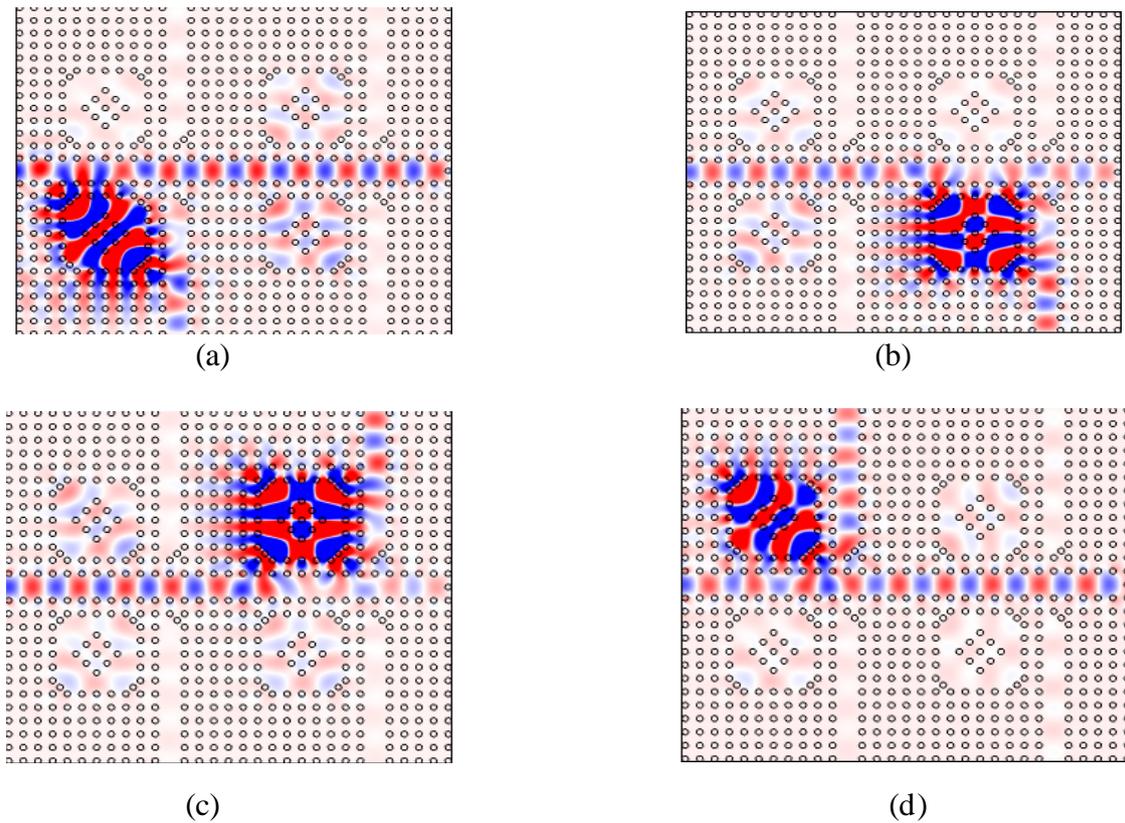


Figure III.27 : Répartition de champ électrique E_z dans un filtre en anneau proposé pour les différentes longueurs d'onde $\lambda_{1R} = 1,5423\mu\text{m}$ (a), $\lambda_{2R} = 1,5464\mu\text{m}$ (b), $\lambda_{3R} = 1,5507\mu\text{m}$ (c), $\lambda_{4R} = 1,5548\mu\text{m}$ (d).

III.6.3 Démultiplexeur à six canaux à base de cristaux photoniques 2D :

Le démultiplexeur proposé est formé par six résonateurs en anneau quasi carré dont le noyau est en forme de diamant, à base d'un CP-2D à maille carrée. Nous avons fait varier le rayon R des tiges internes des résonateurs ($R=X_i*r$). La variable X_i varie entre :0.968 ,0.985 ,1 ,1.013 ,1.025 ,1.0347 . La topologie est montrée sur la figure III-28 :

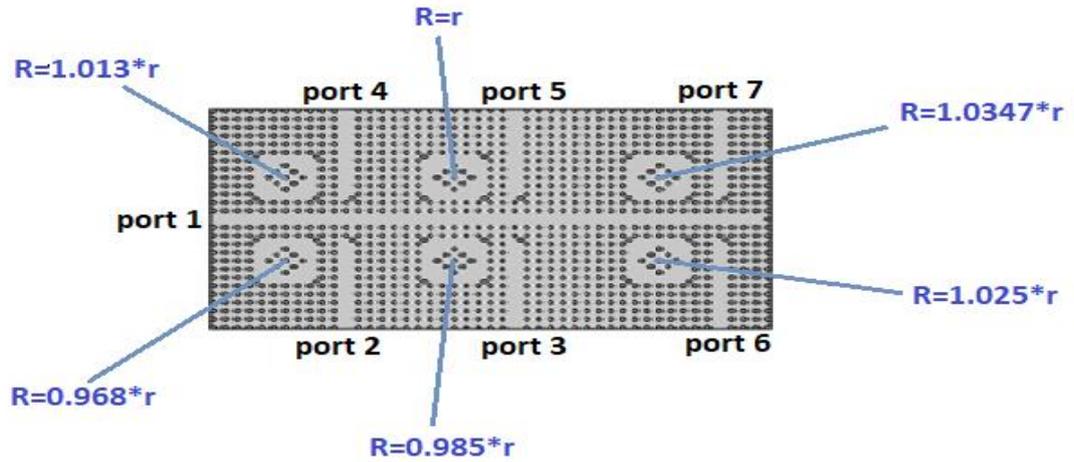


Figure III.28 : Structure schématique du démultiplexeur à base de CPS à six anneaux avec les différents rayons R introduit.

La figure III.29 représente la réponse spectrale du démultiplexeur à base de CPS à six anneaux s'étalant sur la gamme $[1.533, 1.568]$ μm pour tous les rayons relatifs intérieurs où on obtient une commutation de résonance aux longueurs d'onde correspondantes de $\lambda_{1R}=1.5423\mu\text{m}$, $\lambda_{2R}=1.5464\mu\text{m}$, $\lambda_{3R}=1.5507\mu\text{m}$, $\lambda_{4R}=1.5548\mu\text{m}$, $\lambda_{5R}=1.5592\mu\text{m}$ et $\lambda_{6R}=1.5631\mu\text{m}$ avec une efficacité de 63%,89%,91%,79%,90% et 86% respectivement .

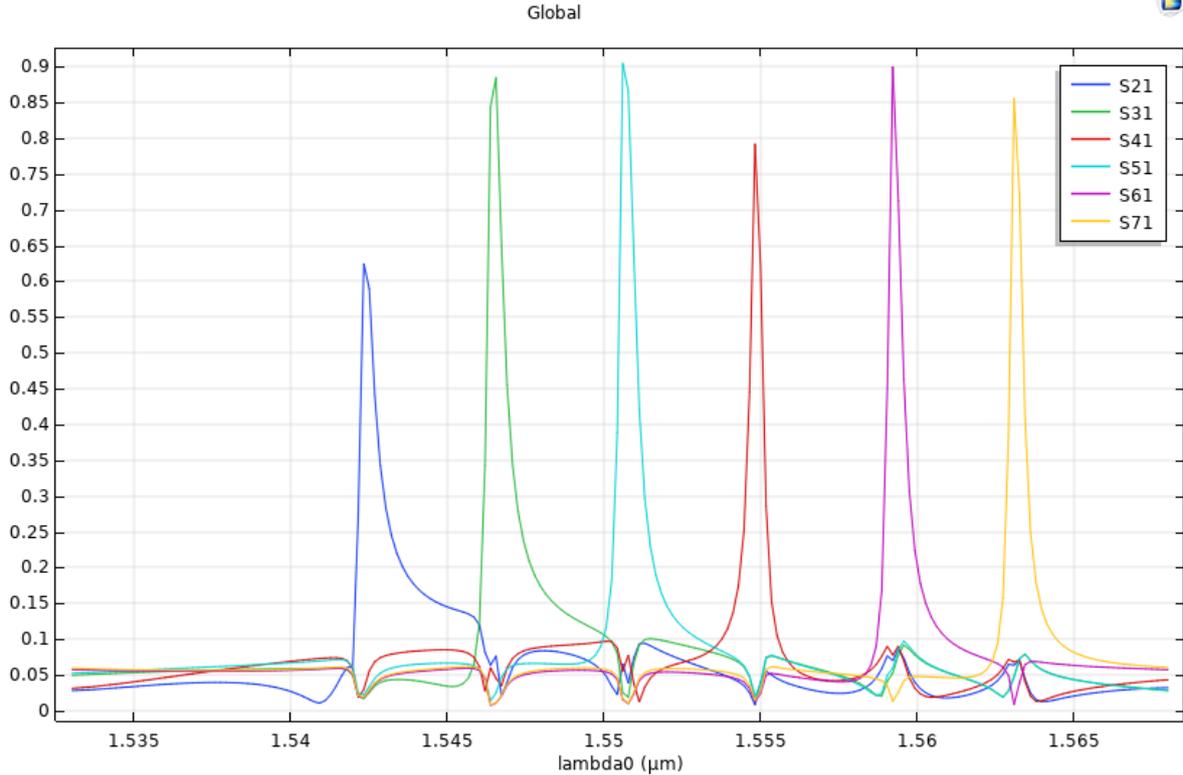


Figure III.29 : Les résultats de transmission simulés à six anneau QSRR pour tous les rayons relatifs intérieurs.

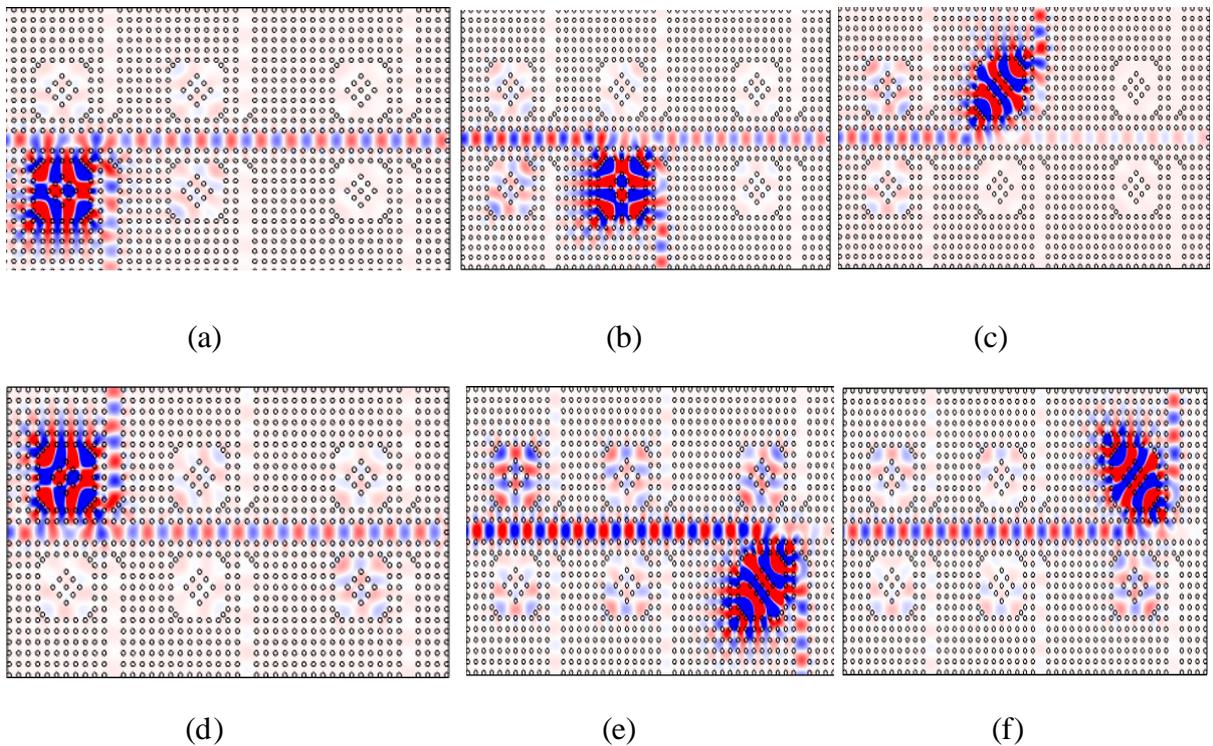


Figure III.30 : Répartition de champ électrique E_z dans un filtre en anneau proposé pour les différente longueur d'onde $\lambda_{1R}= 1.5423\mu\text{m}$ (a), $\lambda_{2R}= 1.5464\mu\text{m}$ (b), $\lambda_{3R}= 1.5507\mu\text{m}$ (c), $\lambda_{4R}= 1.5548\mu\text{m}$ (d), $\lambda_{5R}= 1.5592\mu\text{m}$ (e), $\lambda_{6R}= 1.5631\mu\text{m}$ (f).

III.6.4 Démultiplexeur à huit Canaux à base des cristaux photoniques 2D :

Le démultiplexeur proposé est formé par huit résonateurs en anneau quasi carré. Pour une meilleure séparation des longueurs d'onde au sein de la structure du démultiplexeurs, nous avons fait varier le rayon des tiges internes des résonateurs R ($R=X_i*r$). La variable X_i varie entre : 0.968 ,0.985 ,1 ,1.013 ,1.025 ,1.0347 ,1.0445,1.053 comme est montré sur la figure III.31 .

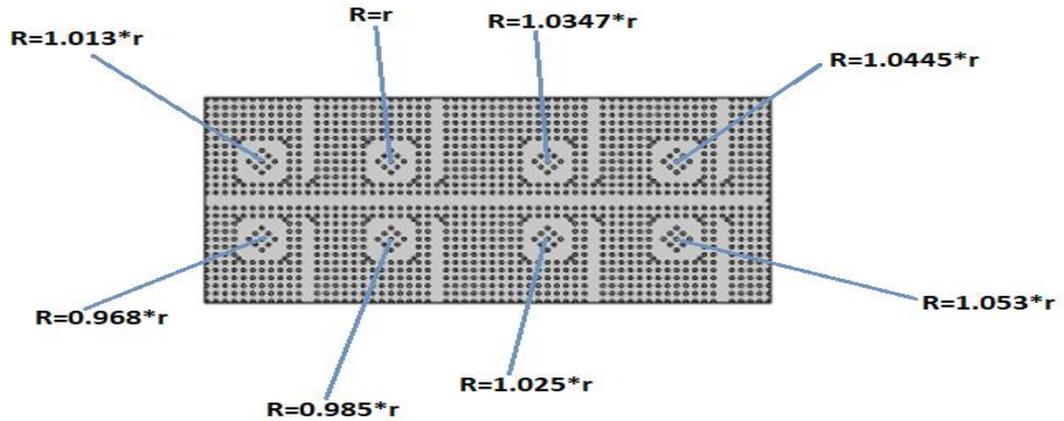


Figure III.31 : Structure schématique du démultiplexeur à base de CPS à huit anneaux avec les différents rayons R introduit.

Nous avons obtenu les résultats de simulation du démultiplexeur à base de CPS à huit anneaux s'étalant sur la gamme $[1.533, 1.574] \mu\text{m}$, comme est affichés sur la figure III.32 où les valeurs de transmission normalisées sont tracées en fonction des valeurs de longueur d'onde, et chaque sortie est définie par sa couleur de disposition correspondante. Pour tous les rayons relatifs intérieurs on a obtenu une commutation de résonance aux longueurs d'onde correspondantes : $\lambda_{1R}=1.5423\mu\text{m}$, $\lambda_{2R}=1.5464\mu\text{m}$, $\lambda_{3R}=1.5507\mu\text{m}$, $\lambda_{4R}=1.5548\mu\text{m}$, $\lambda_{5R}=1.5592\mu\text{m}$, $\lambda_{6R}=1.5633\mu\text{m}$, $\lambda_{7R}=1.5674\mu\text{m}$ et $\lambda_{8R}=1.5713\mu\text{m}$ avec une efficacité de 54% ,88%,73%,80% ,78%,61% ,65% et 63% respectivement .

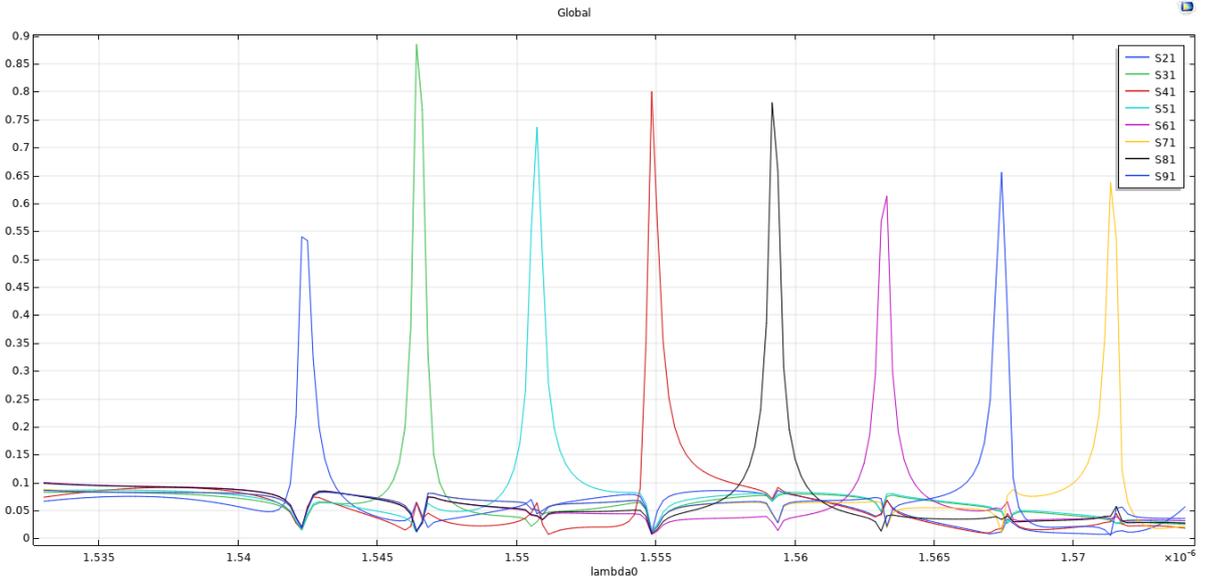
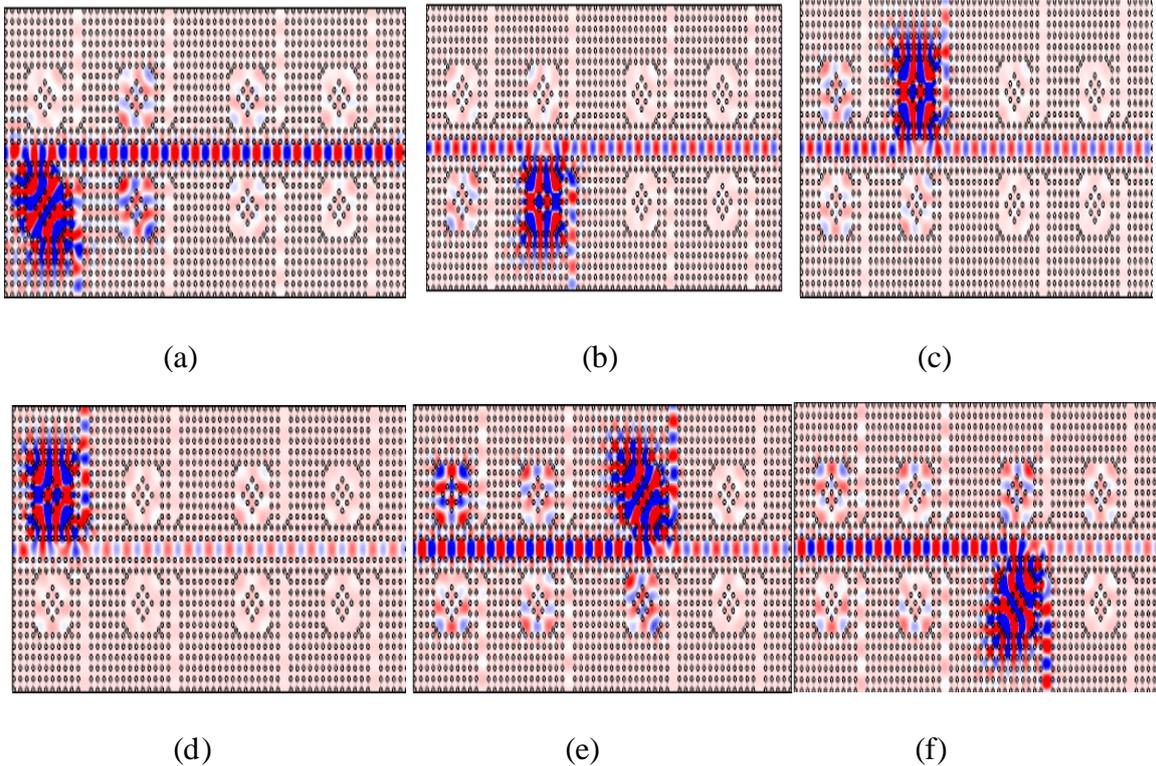


Figure III.32 : Structure schématique du démultiplexeur à base de CPS à huit anneaux avec les différents rayons R introduit.



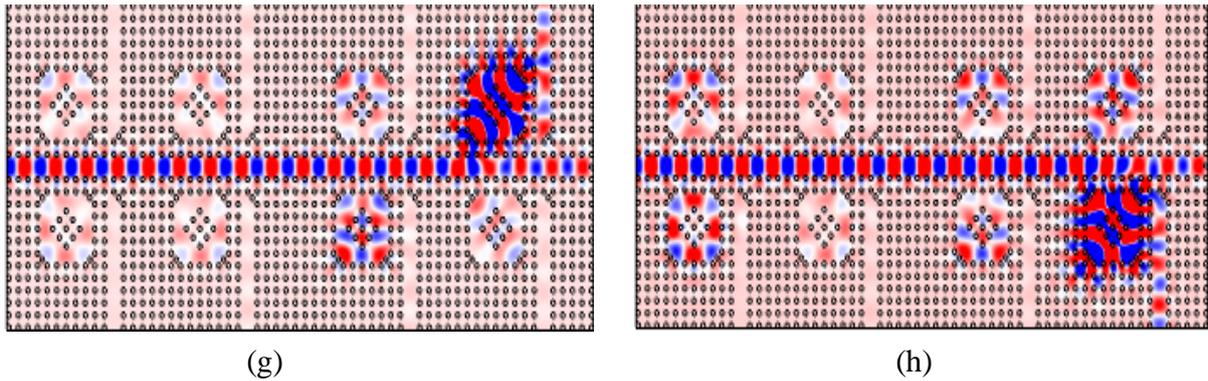


Figure III.33 : Répartition de champ électrique E_z dans un filtre en anneau proposé pour les différentes longueurs d'onde $\lambda_{1R}= 1.5423\mu\text{m}$ (a), $\lambda_{2R}= 1.5464\mu\text{m}$ (b), $\lambda_{3R}= 1.5507\mu\text{m}$ (c), $\lambda_{4R}= 1.5548\mu\text{m}$ (d), $\lambda_{5R}= 1.5592\mu\text{m}$ (e), $\lambda_{6R}= 1.5633\mu\text{m}$ (f), $\lambda_{7R}= 1.5674\mu\text{m}$ (g), $\lambda_{8R}= 1.5713\mu\text{m}$ (h).

La figure III.33 montre que chacun des résonateurs reçoit la lumière à son port d'entrée et sépare la longueur d'onde correspondante qui est transférée ensuite au guide d'onde de sortie. Ceci est possible grâce au rayon des tiges intérieures qui ont la capacité de séparer des longueurs d'onde particulières.

Les longueurs d'onde de résonance correspondant au pic de la transmission de sortie sont déduites pour chaque valeur " λ_i " et pour les huit longueurs d'onde avec un espacement de canaux d'environ 4 nm et un coefficient de transmission qui a atteint son maximum à 88%. Le tableau III-1 représente en détails sur la largeur de bande, le facteur de qualité ($Q = \lambda_0 / \Delta\lambda$) supérieur à 2600 ainsi le coefficient de transmission de chacun des huit canaux :

λ_R	$\lambda_i(\lambda_R)$	Largeur d'onde de résonance $\lambda(\mu\text{m})$	Largeur spectrale(nm)	Facteur de qualité	Coefficient de transmission
λ_1	0.968	1.5423	0.7	2203.28	54%
λ_2	0.985	1.5464	0.6	2577.33	88%
λ_3	1	1.5507	0.6	2584.5	73%
λ_4	1.013	1.5548	0.5	3109.6	80%
λ_5	1.025	1.5592	0.5	3118.4	78%
λ_6	1.0347	1.5633	0.6	2605.5	61%
λ_7	1.0445	1.5674	0.6	2612.33	65%
λ_8	1.053	1.5713	0.6	2618.83	63%

Tableau III-1 : Résultats obtenus pour un démultiplexeur multicanaux.

Selon les résultats obtenus, la structure de filtre à QSRR multicanaux conçue à un coefficient de transmission élevé avec un faible espacement des canaux, ce qui est adapté pour les applications en systèmes WDM.

Un autre facteur qu'on va citer qui joue un rôle important dans la conception des démultiplexeurs qui sera utilisé dans les systèmes WDM est la diaphonie, on a obtenu les valeurs représentées dans le tableau III-2, à travers la figure III.34.

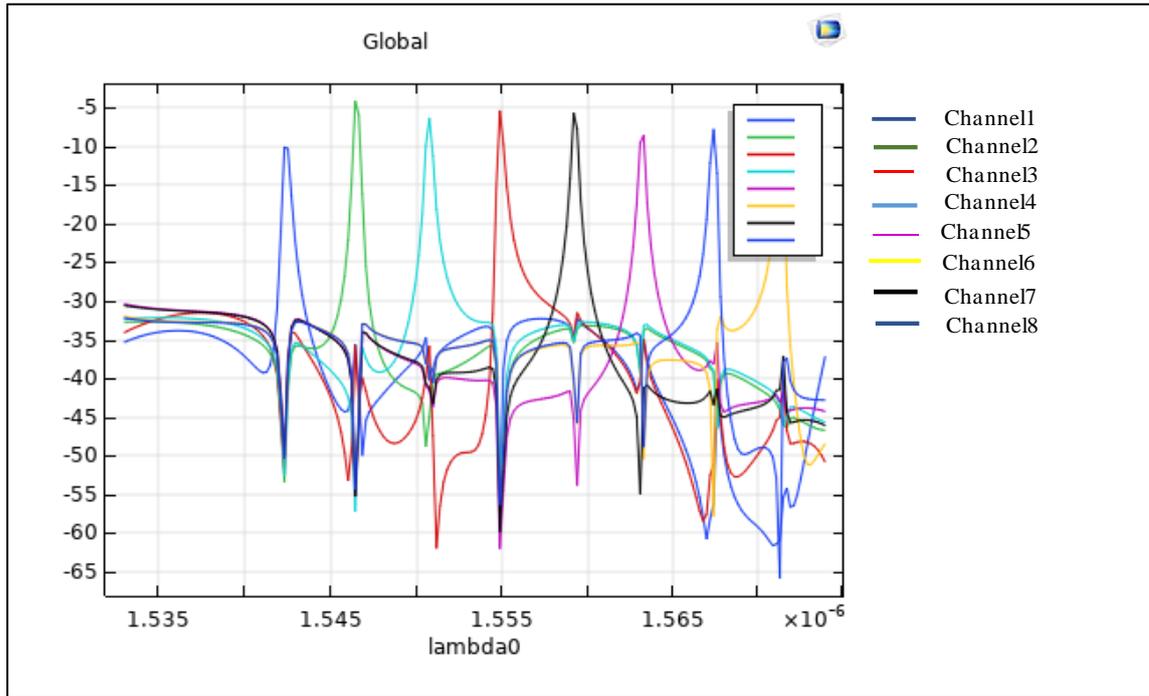


Figure III.34 : Spectre représentant la diaphonie du DEMUX proposés.

Xij	Channel1	Channel2	Channel3	Channel4	Channel5	Channel6	Channel7	Channel8
Channel1	-	-53.37	-52.5	-52.41	-49.9	-49.85	-50.38	-50.31
Channel2	-35.6	-	-57.2	-35.8	-55.26	-55.25	-54.4	-54.31
Channel3	-38.5	-48.8	-	-35.86	-41.15	-41.5	-40.25	-38.46
Channel4	-56.4	-56.66	-38.86	-	-59.8	-62	-57.2	-56.45
Channel5	-35.19	-35.38	-35.1	-34.5	-	-45.2	-39.8	-40.4
Channel6	-35	-34	-33.4	-34.95	-41.3	-	-48.8	-50.5
Channel7	-56.2	-39.2	-38.9	-51.1	-43.3	-38.2	-	-57.5
Channel8	-65	-44.2	-43.3	-45.2	-41.5	-42.8	-60	-

Tableau III-2 : Valeurs de diaphonie du démultiplexeurs proposés en (dB).

Les valeurs de diaphonie sont nommées Xij (i et j varient de 1 à 8) ou l'indice 'i' représente la colonne et 'j' représente la ligne qui varient de 1 à 8 canaux.

Sur le tableau III-2 est montré l'effet du $i^{\text{ème}}$ canal sur le $j^{\text{ème}}$ canal à la longueur d'onde du $j^{\text{ème}}$ canal. La résolution au niveau de la sortie des canaux est meilleure, plus le niveau de diaphonie est bas.

III.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, 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 de type $W_1^K A$ et $W_3^K A$ à maille carrée et triangulaire, 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.

Pour finir, nous avons conçu plusieurs démultiplexeurs à base de cristaux photoniques 2D, allant jusqu'à 8 canaux, et simuler les différents résultats montrant que la position des longueurs d'onde dépend des valeurs du rayon relatif R de l'anneau intérieur. Par conséquent en variant le rayon, on peut atteindre n'importe quelle fréquence située dans la bande interdite photonique.

Conclusion générale

Les cristaux photoniques sont des matériaux diélectriques semi-conducteur, leur indice de réfraction varie périodiquement à l'échelle de la longueur d'onde. C'est grâce à cette périodicité qu'une bande interdite apparaît à la propagation de la lumière à l'intérieur du CP, sur des plages de longueurs d'onde qui dépendent des caractéristiques de celui-ci (dimensions et indice du motif de répétition).

Notre travail concerne la conception et l'étude de nouveaux démultiplexeurs optiques à base d'un Matériau à bande interdite photonique à plusieurs canaux, en utilisant le logiciel COMSOL.

Dans le 1^{er} chapitre, nous avons étudié le principe de base des cristaux photoniques afin de mieux comprendre qu'ils ont une particularité intéressante, qui est le contrôle de la propagation de la lumière, nous avons aussi compris que la structure périodique bidimensionnelle 2D est la plus utilisée puisqu'elle est considérée comme la meilleure structure pour le guidage d'un signal, ce qui amènent à la rendre intéressantes pour de nombreuses applications dans l'optique, telle que les filtres, les guide d'onde ainsi que le démultiplexage qui est notre principale étude.

Le deuxième chapitre comporte une généralité sur les démultiplexeurs photoniques afin de mieux comprendre leurs principes de fonctionnement. Nous nous sommes intéressés au couplage entre des guides et des cavités à cristaux photoniques, permettant la réalisation de filtrage directionnel et sélectif en longueurs d'onde, comme le filtre ADD-DROP. Enfin nous avons exposé quelques applications très récentes avec leurs différents résultats.

Dans le dernier chapitre de ce mémoire, l'étude été consacrée sur les cristaux photoniques 2D déconnectée planaires gravées sur GaAs. En premier lieu nous avons présenté les structures avec et sans défaut à mailles carrée et triangulaire, afin de remarquer la différence sur les réponses spectrales simulée en termes de transmission et de réflexion ainsi que la répartition du champ électrique. Nous avons également conçu plusieurs topologies de démultiplexeurs à base de cristaux photonique allant jusqu'à 8 canaux, ce qui nous a permis de mieux comprendre la circulation du champ sur les différentes structures et d'exploiter cette possibilité de contrôler la propagation de la lumière pour la réalisation de plusieurs applications futures.

Annexe :

**Fabrications des cristaux
photoniques.**

La fabrication des cristaux photoniques fait appel à quatre étapes très utilisées en micro-électronique, qui sont détaillé par la suite :

A.1. Croissance des hétéros structure par épitaxie par jets moléculaires (En anglais : Molecular Beam Epitaxy) :

A.1.1. Fabrication des hétérostructure [87] :

La réalisation des couches monocristallines requies une maîtrise exceptionnelle de la composition chimique, des quantités, cristallographiques et de l'épaisseur.

La condition nécessaire à la réalisation d'une bonne hétéro-épitaxie d'un semi-conducteur (GaAlAs par exemple) sur un autre semi-conducteur (GaAs(substrat) par exemple) est évidemment que les deux matériaux aient d'une part la même structure cristalline et d'autre part des paramètres de maille voisins (conditions satisfaites pour les GaAs et GaAlAs).

En effet : si les structures cristallines sont différentes, le dépôt est généralement amorphe, autrement si les paramètres de maille sont différents, le matériau constituant la couche de plus grande épaisseur impose sa maille à l'autre, au moins de voisinage de l'interface ce qui conduit par des désordres.

Cependant, les différents types des semi-conducteurs peuvent être épitaxies les uns sur les autres pour former différents types d'hétérostructures.

A.1.2. L'épitaxie par jets moléculaires [88] :

La technique d'épitaxie par jets moléculaires, encore appelée Molecular Beam Epitaxy (MBE), consiste à faire interagir dans une enceinte sous ultra-vide (typiquement 10^{-10} à 10^{-11} Torr) un flux atomique ou moléculaire avec un substrat monocristallin.

Cette interaction donne lieu à l'adsorption des atomes/molécules sur la surface. L'organisation des atomes adsorbés à la surface se fait de manière ordonnée et produit un arrangement cristallin.

Le dépôt par épitaxie s'effectue d'une manière contrôlée à la surface du substrat monocristallin, permettant aux atomes ou molécules de s'organiser suivant la cristallographie du substrat.

Lors de la croissance, les éléments moléculaires ou atomiques arrivant sur le substrat forment une phase gazeuse proche de la surface. La croissance épitaxiale a lieu au niveau de la surface

du substrat et fait intervenir plusieurs processus dont les plus importants sont présentés schématiquement sur la figure A.1 :

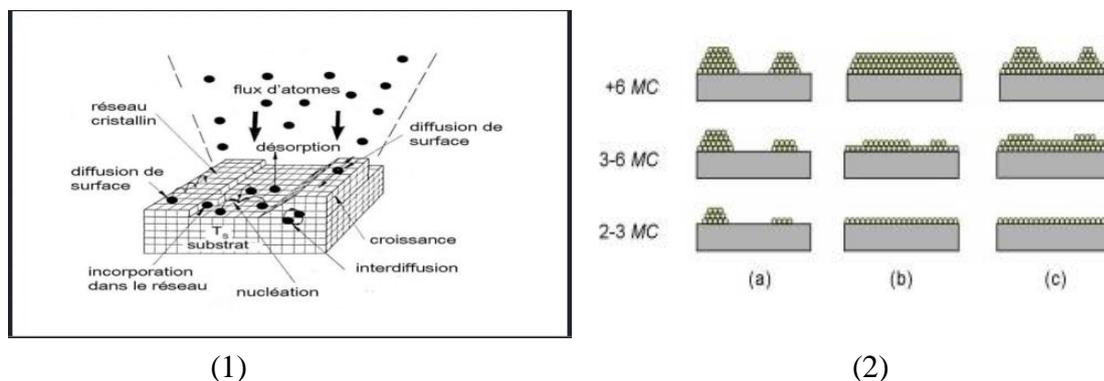


Figure A.1 : (1) Illustration schématique des différents processus intervenant lors de la croissance épitaxiale par MBE. (2) Classification des différents modes de croissance : (a) Croissance 3D par formation d'îlots (Volmer-Weber). (b) Croissance 2D couche par couche (Frank-van der Merwe). (c) : Croissance 2D puis 3D (Stranski-Krastanov).

A.2. Écriture des structures par lithographie électronique [88] :

Grâce à une technique dérivée de la microscopie électronique à balayage, la lithographie électronique, ou lithographie "e-beam", permet de dessiner directement le motif souhaité sur une résine photosensible, à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB). Le MEB permet de piloter le faisceau d'électrons en contrôlant sa position et sa vitesse (et donc la durée d'insolation de la résine [89]).

En pratique, il existe un effet de rétrodiffusion (ou "effet de poire") des électrons dans le silicium ainsi qu'une diffusion des électrons dans la résine (Figure I-10). La zone sensibilisée est donc plus large que la taille du faisceau. Ce phénomène doit être pris en considération lors du tracé des motifs. La résolution limite atteinte en pratique oscille entre 8 et 10 nm [89].

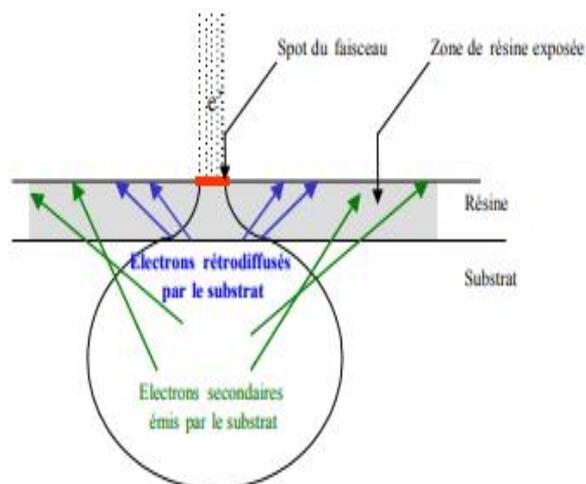


Figure A.2 : Influence de la diffusion des électrons dans la résine et le substrat sur la résolution de la lithographie par faisceau d'électrons [89].

La lithographie électronique permet donc de réaliser des motifs avec une haute précision. Cependant, cette technique n'autorise qu'une écriture en série et reste donc lente et inadaptée dans le cadre d'une fabrication de masse [89].

A.3.Gravure :

A.3.1. Gravure ionique réactive :

La gravure ionique réactive (ou RIE: Reactive Ion Etching) est un procédé anisotrope qui consiste à introduire un gaz à base d'espèces halogénées dans l'enceinte contenant l'échantillon [89] .

L'échantillon est placé sur la cathode d'un condensateur plan soumis à une polarisation continue. Le gaz situé dans l'entrefer du condensateur est ionisé grâce à un fort champ électrique RF de façon à créer un plasma. Les ions de ce plasma sont accélérés jusqu'à la surface où ils vont s'adsorber. Ils réagissent alors avec la surface de manière sélective, selon la nature chimique des constituants de cette surface. Dans d'un wafer de silicium, seul le silicium sera attaqué et la résine restera intacte. Les produits volatiles de la réaction sont ensuite évacués vers l'extérieur par pompage (Figure A.3) [89].

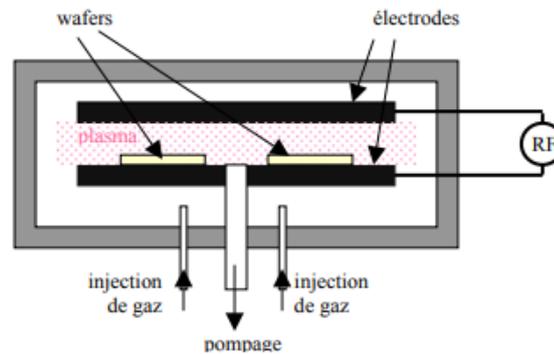


Figure A.3 : principe de la gravure réactive [89].

La gravure s'effectue à l'aide de deux mécanismes différents : une attaque chimique isotrope par les espèces réactives et un bombardement ionique réalisant une gravure anisotrope verticale. Le taux de gravure dépend de la concentration en espèces réactives ainsi que de l'énergie des ions. La concentration des ions contrôle le taux de réaction, tandis que l'énergie des ions contrôle le degré d'anisotropie. Si la pression du gaz est suffisamment faible, les ions vont heurter l'échantillon en incidence verticale. La gravure sera anisotrope et verticale, ce qui permet de creuser le matériau sans altérer les motifs initialement tracés [89].

A.3.2. Gravure ICP :

La gravure ICP (Inductively Coupled Plasma) utilise le même principe de fonctionnement que la RIE sauf que le plasma est créé par le champ magnétique résultant d'un couplage inductif. L'induction permet d'atteindre une densité de plasma plus grande) et d'avoir une pression de travail plus faible.

Une pression faible autorise un meilleur contrôle de l'anisotropie de la gravure dans les structures à fort facteur d'aspect. De plus, la gravure ICP permet d'avoir une vitesse de gravure plus rapide qu'avec une RIE classique, ainsi qu'une rugosité de surface moindre [89].

La figure A.4 représente un schéma dans l'enceinte du bâti ICP, un plasma de gaz est créé en appliquant un signal RF entre chaque électrodes (cathode et anode) ionisant ainsi le gaz présent et apportant de l'énergie nécessaire aux ions pour accélérer en direction du substrat où l'espèce ionisée sera absorbée. Ce plasma de haute densité permet en outre de travailler à basse pression [90] .

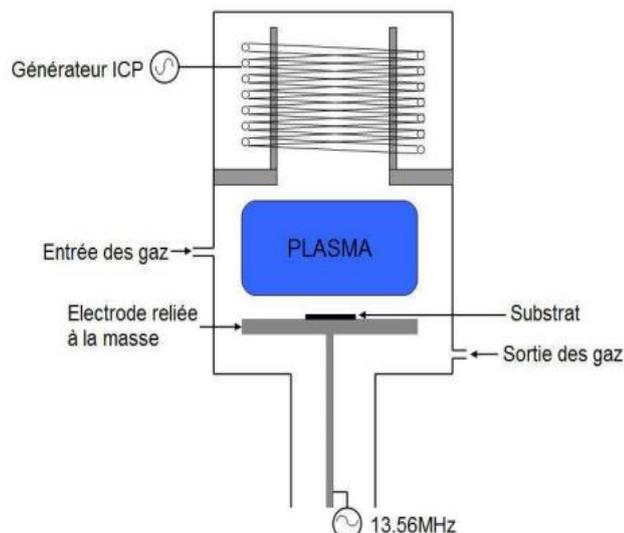


Figure A.4: schéma simplifié à l'intérieur du bâti ICP [90] .

Cette gravure est délicate car chaque paramètre peut influencer sur le résultat final de la gravure. Que ce soit sur les dimensions ou la forme du dessin à reproduire ou encore sur la rugosité et la verticalité dans le profil de gravure [89].

A.4.Observation des structures par microscopie électronique à balayage (En anglais : Scanning Electron Microscopy) [91]:

Ces marques sont réalisées en salle blanche par procédé de “lift-off” : une première lithographie UV (résine positive AZ5214) est effectuée sur l'échantillon permettant de définir les zones marquées. Ensuite, après un recuit (1min à 110°C), une seconde insolation pleine plaque est réalisée. Ces étapes permettent d'inverser la résine. La figure A.5 montre un exemple de la définition des marques avant le dépôt métallique. Un dépôt métallique de Nickel (50Å, couche d'accroche) et d'or (1500Å, épaisseur nécessaire pour l'observation au microscope électronique) est ensuite réalisé par évaporation. Un nettoyage à l'acétone permet de retirer les zones que l'on souhaite dépourvues de métal. La figure A.5 montre une image des marques réalisées. La zone de définition des cristaux photoniques est de 100 * 100µm. Un exemple de structures à réseaux de microplots réalisées est donné (Figure A.6 et A.7).

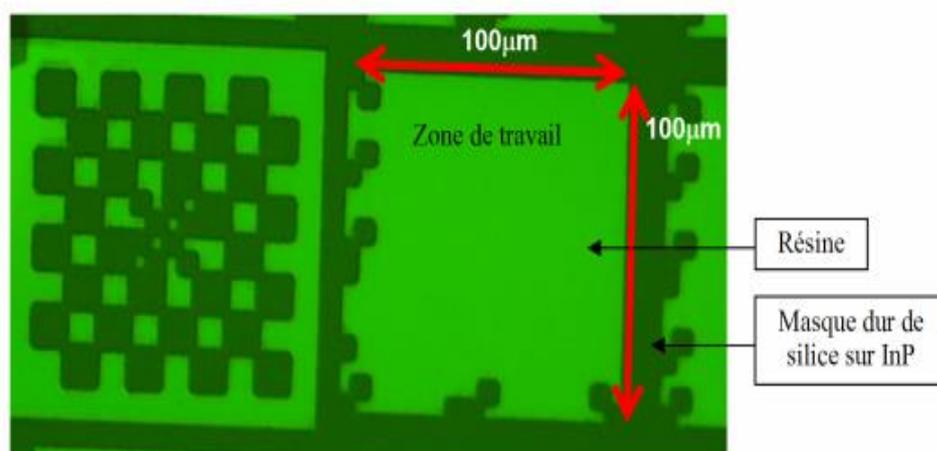


Figure A.5 : Image de la définition des marques métalliques par procédé de lift-off avant le dépôt métallique. Le damier de gauche permettra lors de la lithographie électronique un réglage fin du faisceau (focalisation, astigmatisme). Les cristaux photoniques seront définis dans une zone de $100 \times 100 \mu\text{m}$.

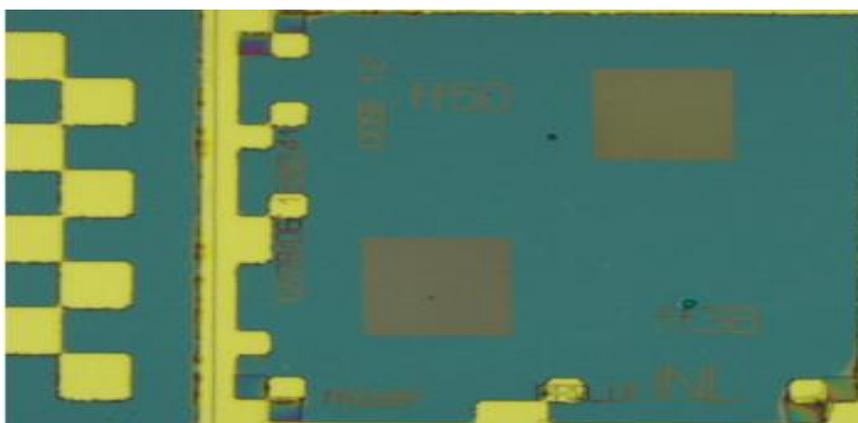


Figure A.6 : Image réalisée au microscope optique des marques d'or réalisées par procédé de lift-off. Des cristaux photoniques à réseaux de piliers ont été définis par lithographie électronique sur les zones prévues de $100 \times 100 \mu\text{m}$.

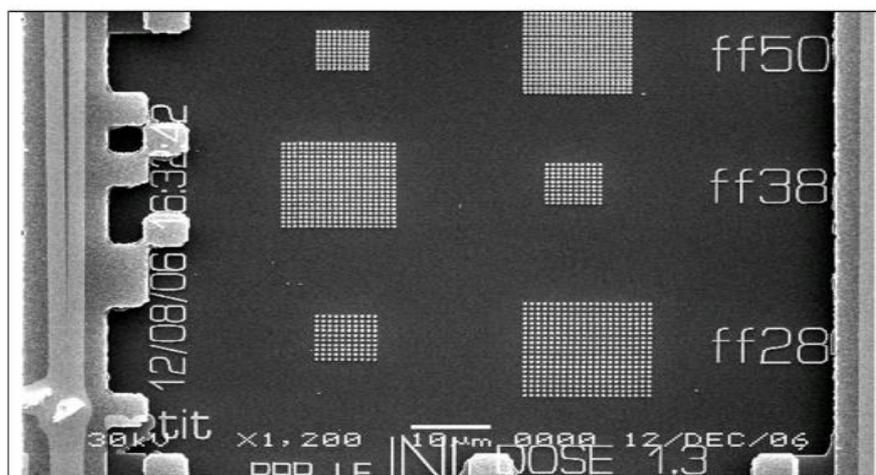


Figure A.7 : Image réalisée au microscope électronique donnant un exemple de structures à cristaux photoniques 2D à réseaux de piliers réalisés sur un substrat SOI.

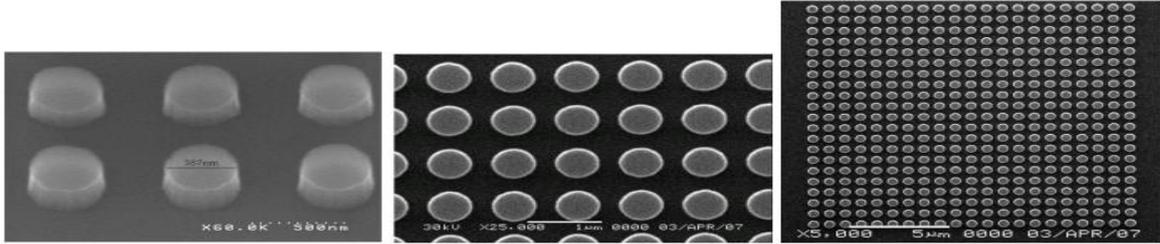


Figure A.8 : Image réalisée au microscope électronique donnant un exemple de structures à cristaux photoniques 2D à réseaux de piliers réalisés sur un substrat SOI PAR LETI-CEA.

Les différentes étapes de fabrication des cristaux photonique déjà citer en détail sont résumer par la figure A.9 :

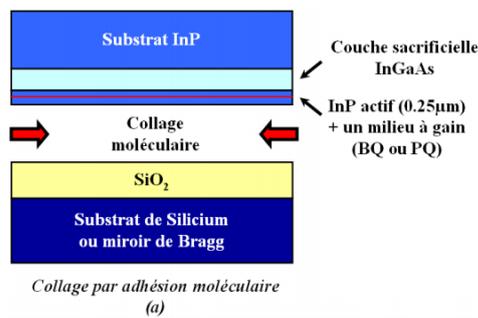


Figure A.9 (1) : Collage par adhésion moléculaire entre le miroir de Bragg et la membrane d'InP.

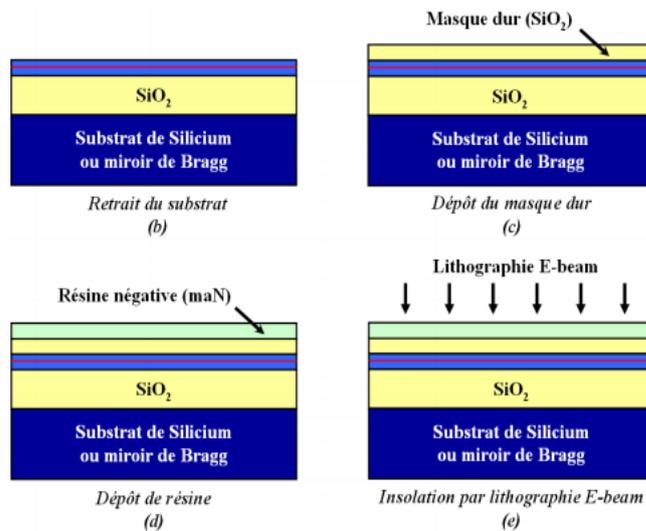


Figure A.9 (2) : Définition du motif par lithographie électronique.

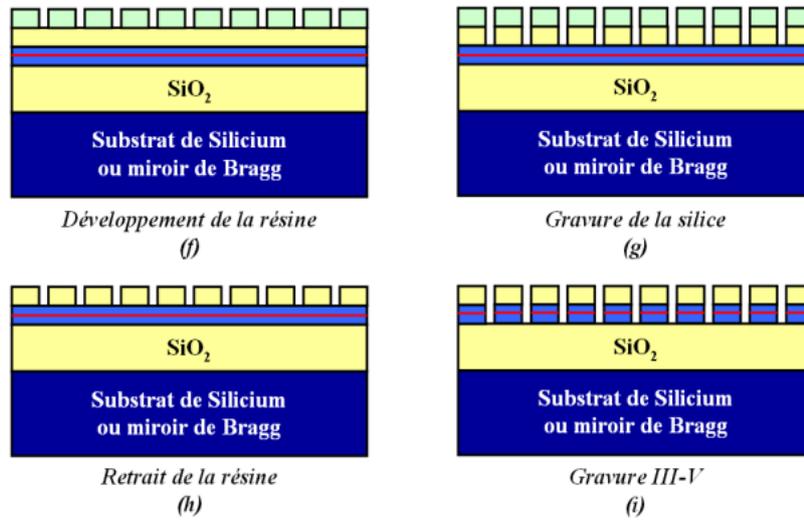


Figure A.9 (3) : Gravure des cristaux photoniques par RIE.

Figure A.9: processus de fabrication des cristaux photoniques [91].

Références bibliographiques :

- [1] LOMBARDET, Benoît, «étude et réalisation des cristaux photoniques pour l'optique intégrée,» *thèse de doctorat, École polytechnique fédérale de LAUSANNE*, n° %13254, 2005.
- [2] Hadjira, ABRI née BADAOU, «étude et conception des micro composants à base des cristaux photoniques bidimensionnels,» *thèse de doctorat, université de TLEMCEM*, Décembre 2012.
- [3] E. Yablonovitch, «Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics,» *Physical Review Letters* , vol. 58, n° %120, pp. 2059-2062, 1987.
- [4] S. John, «Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices,» *Physical Review Letters* 58, p. 2059, 1987.
- [5] E. Yablonovitch, T.J. Gmitter and K.M. Leung, «Structure de la bande photonique: Le cas cubique à face centrée utilisant des atomes non sphériques,» *Physical Review Letters*, vol. 67, n° %117, p. 2295, 1991.
- [6] OYHENART, Laurent, «Modélisation, réalisation et caractérisation de cristaux photoniques tridimensionnels,» *thèse de doctorat, université de BORDEAUX*, 13 Décembre 2005.
- [7] MASSAOUDI, Soumia, «Etude théorique et expérimentale des matériaux à bandes interdites photoniques bidimensionnels (BIP 2D) en Micro-Ondes: Application à l'ultraréfraction,» *thèse de doctorat, UNIVERSITE PARIS XI UFR SCIENTIFIQUE D'ORSAY*, 25 Février 2005.
- [8] GRAYDON, «Nature's nanosstructures colour wings and stones,» *Optol_ser Europe*, vol. 51, p. 31, juillet 1999.
- [9] M. Pomarède, «la couleur des oiseaux,» *pour la Science*, n° %1261, p. 92, juillet 1999.
- [10] «wikipedia,» [En ligne]. Available: https://fr.wikipedia.org/wiki/Cristal_photonique. [Accès le 20 février 2020].
- [11] «chimie magique,» [En ligne]. Available: <https://www.chimie magique.fr/?p=28>. [Accès le 20 février 2020].
- [12] MASSY, Sandrine, «Contribution à la réalisation de fonctions optiques à base de cristaux photoniques sur LiNbO₃,» *thèse de doctorat, Université de LIMOGES*, 2004.

- [13] INOUE, Kuon et OTHAKA, «cristaux photoniques: physique, fabrication et applications,» *Springer Science and Business Media*, 2004.
- [14] Sukhoivanov IA, Guryev IV, «Introduction to Photonic Crystals,» *springer, berlin, heidelberg*, vol. 152, 2009.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] L. Bigot, «Fibres à cristal photonique : 10 ans d'existence et un vaste Champ d'applications,» *Laboratoire de physique des lasers, atomes et molécules*.
- [18] S. Noda, K. Tomoda, N. Yamamoto, and A. Chutinan, «Full Three-Dimensional Photonic Bandgap Crystals at Near-Infrared Wavelengths,» *Science*, vol. 289, n° 15479, pp. 604-606, 2000.
- [19] P.R. VILLENEUVE, M. PICHE, «Photonic band gap in two-dimensional square lattices: Square and Circular rods,» *Physical Review B*, vol. 46, pp. 8565-8571, 1992.
- [20] M. PLIHAL, A.A. MARADUDIN, «Photonic band structure of two-dimensional systems: The triangular lattice,» *Physical Review B*, vol. 44, pp. 8565-8571, October 1991.
- [21] D. CASSAGNE, C. JOUANIN, D. BERTHO, «Hexagonal photonic band gap structures,» *Physical Review B*, vol. 53, pp. 7134-7141, March 1996.
- [22] ZELSMANN, Marc, «Cristaux photoniques en silicium sur isolant pour le guidage, le filtrage, l'émission et l'extraction de la lumière,» *thèse de doctorat, UNIVERSITE JOSEPH FOURIER, Grenoble 1*, 1 novembre 2003.
- [23] GRILLET, Christian, «Microcomposants optiques à base de cristaux photoniques bidimensionnels pour l'optique intégrée,» *thèse de doctorat, Ecole Centrale de LYON*, 2003.
- [24] S. Kheffache, «Propagation d'ondes élastiques dans les cristaux phononiques bidimensionnels,» *thèse de doctorat, UNIVERSITE DE TIZI-OUZOU*, Septembre 2011.

- [25] D. Felbacq, E. Centeno, «Theory of diffraction for 2D photonic crystals with boundary,» *Optics Communications*, vol. 199, pp. 39-45, 2001.
- [26] C.Kittel, *Physique de L'état Solide*, paris: 7ème édition (Dunod), 2005.
- [27] F. Lallam, H. Abri Badaoui, M. Abri and A. Fedouch., «Design of a Novel Photonic Crystal 1.31/1.55 μm Biband Filter for Near Infrared Application,» *Optica Applicata*, vol. 48, n° %13, pp. 341-348, 2018.
- [28] B. WILD, «Etude expérimentale des propriétés optiques des cristaux photoniques bidimensionnels et de leur accordabilité,» *thèse de doctorat, Ecole polytechnique fédérale de LAUSANNE*, 2006.
- [29] Joannopoulos, R. D. Meade, J. N. Win, «Photonic Crystal: Molding the Flow of Light,» *PRINCETON University*, 1995.
- [30] B. Rahima, «Etude du couplage dans les guides d'onde à cristaux photoniques,» *mémoire de magister, université de CONSTANTINE*, 11 Novembre 2009.
- [31] Fleming, S. Y. Lin et J. G., «a three-dimensional optical photonic crystal,» *IEEE Journal of Microwave Technologie* 17, p. 1944, 1999.
- [32] Joannopoulos, S. G. Johnson and J. D., «Three-dimensionally periodic dielectric layered structure with omnidirectional photonic band gap,» *App.Phys.Lett*, vol. 77, n° %122, pp. 3490-3492, 2000.
- [33] D. R. Smith, S. Schultz, N. Kroll, M. Sigalas, K. M. Ho; Soukoulis, and M., «Experimental and theoretical results for a two-dimensional metal photonic band-gap cavity,» *Applied Physics Letters*, vol. 65, 1994.
- [34] F.Gadot, «Modélisation et caractérisation expérimentale de matériaux à Bandes Interdites Photoniques (BIP) en Micro-Ondes,» *thèse de doctorat, université de PARIS sud*, Janvier 1999.
- [35] K.Sakoda, «Optical Properties Of Photonic Crystals Manual,» *Springer Science and Business Media*, vol. 80, 2004.
- [36] «Wikipedia,» [En ligne]. Available: https://fr.wikiversity.org/wiki/Introduction_%C3%A0_la_science_des_mat%C3%A9riels/D%C3%A9fautes_dans_les_cristaux. [Accès le 28 Février 2020].

- [37] J.M. LOURTIOZ, D. MAYSTRE, H. BENISTY, V. BERGER, J. M. GERARD, A. TCHELNOKOV, «Les cristaux photoniques ou la lumière en cage,» *Hermes-Science*, 2003.
- [38] K.S.Yee, «Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media,» *IEE Trans.Antennas Propag*, vol. 14, n° %11, pp. 302-307, mai 1996.
- [39] S. Sakamoto, S. Takuma, et H. Tachibana, «Visualization of sound reflection and diffraction using finite difference time domain method,» *Acoust. Sci. Technol*, vol. 23, n° %11, pp. 34-39, 2002.
- [40] Marklein, C. Bommaraju et R., «Optimally accurate second-order time-domain finitedifference scheme for acoustic, electromagnetic, and elastodynamic wave modeling: onedimensional case,» *IEEE Antennas Propag. Soc. Int. Symp.*, vol. 2, n° %15, pp. 1499-1502, 2004.
- [41] D.Botteldooren, «Acoustical finite-difference time-domain simulation in a quasi-Cartesian grid,» *J Acoust Soc*, vol. 95, n° %14, pp. 1924-1931, 1996.
- [42] S.Wang, «Finite-difference time-domain approach to underwater acoustic scattering problems,» *J Acoust Soc Am*, vol. 99, pp. 1924-1931, 1996.
- [43] J.-J. BONNEFOIS, «modélisation d'effets non linéaires dans les cristaux photoniques, application a la limitation optique,» *thèse de doctorat, université de PARIS*, 30 Novembre 2006.
- [44] P.Yeh, «Optical Waves in Layered Media,» *Wiley,New York*, 1988.
- [45] J.B.Pendry, «Calculating photonic band structure. Journal of physics: condensed matter 8,» *Journal of Physics:Condensed Matter*, vol. 8, n° %19, p. 1085, 1996.
- [46] J.B.Pendry, «Photonic band structures,» *Journal of modern optics* , n° %141, p. 209, 1994.
- [47] Bostan, Cazimir Gabriel, «CONCEPTION ET FABRICATION DE COMPOSANTS DE CRISTAUX PHOTONIQUES QUASI-2D BASÉS SUR LA TECHNOLOGIE SILICIUM-SUR-ISOLATEUR.,» *thèse de doctorat, Université de TWENTE*, 25 Février 2005.
- [48] F. F. a. Y. Lu, «Microwave and optical waveguide analysis by the Finite,» *Research studies press Ltd*, 1996.

- [49] G.L.Maile, «Three-Dimensional Analysis of Electromagnetic Problems by Finite-»,
Thèse de doctorat, université de CAMBRIDGE, 1979.
- [50] Popov, E. G. Loewen and E., «Diffraction Gratings and Applications»,
MarcelDekker,New York, 1997.
- [51] Maystre, D, «Electromagnetic study of photonic band gaps», *Pure and Applied Optics*,
vol. 3, p. 975, 1994.
- [52] 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.,» *the Optical Society of America*, vol. A12, p. 513, 1995.
- [53] d'Yerville, M. Le Vassor, «Losses of linear waveguides in photonic crystal slabs,
Workshop on two-dimensional photonic crystals», *Ascona,Suisse*, 2002.
- [54] Fatima, Benaissa, «Etude et Simulation de la Propagation des Ondes
Electromagnétiques,dans les guides à cristaux photoniques», *magister en physique*,
2012-2013.
- [55] R. e. Al, «Novel applications of photonic band gap materials : Low loss bends and Q
cavities», *Journal of applied physics* 75, p. 4753, 1994.
- [56] C. Manolotou, M.J. Khan, Shanhui Fan, Pierre R. Villeneuve, H.A. Hauss, «Life fellow»,
Journal Of quantum electronics, vol. 35, p. 1322, 1999.
- [57] FARHA, Robert Michael, «Etude d'une structure à cristal photonique «LOM» gravée
dans un guide Ti : LiNbO₃ dopé erbium pour l'émission de lumière à 1.55µm,» *thèse
de doctorat,Université Pierre et Marie curie et Télécom et management Sud PARIS*,
2010.
- [58] S. Noda, K. Tomoda, N. Yamamoto, A.Chutinan *Science*, vol. 289, pp. 604-606, 2000.
- [59] H. Benisty, J.M.Lourtioz, A. Chelnokov, S. Combrie, et X.Checoury, «Recent advances
toward optical devices in semiconductor based photonic crystals», *App.Phys.Lett*, vol.
94, n° 15, pp. 997-1023, 2006.
- [60] Y. Akahane, T. Asano, B. S. Song, et S. Noda, «High-Q photonic nanocavity in a two-
dimensional photonic crystal», *Nature*, vol. 425, n° 16961, pp. 944-947, 2003.
- [61] H-Y. Ryu, H-G. Park, et Y-H. Lee, «Two-dimensional photonic crystal semiconductor
lasers: Computational design, fabrication, and characterization», *IEE Sel.Top.Quantum
Electron*, vol. 8, pp. 891-908, 2002.

- [62] H-Y. Ryu, M. Notomi, et Y-H. Lee, «High-quality-factor and small-mode-volume hexapole modes in photonic-crystal-slab nanocavities,» *App.Phys.Lett*, vol. 83, n° 121, p. 4294, 2003.
- [63] S. Fan, P. R. Villeneuve, J. D. Joannopoulos, and H. A. Haus, «Channel drop tunneling through,» *Phys.Rev.Lett*, vol. 80, pp. 960-963, 1998.
- [64] Jaskorzynska, M. Qiu and B., «A design of a channel drop filter in a two-dimensional triangular,» *Appl.Phys.Lett*, vol. 83, pp. 1074-1076, 2003.
- [65] M. Qiu, M. Mulot, M. Swillo, S. Anand, B. Jaskorzynska, A. Karlsson, M. Kamp, and A. Forchel, «Photonic crystal optical filter based on contra-directional waveguide coupling,» *App.Phys.Lett*, vol. 83, pp. 5121-5123, 2003.
- [66] S. Olivier, H. Benisty, C. Weisbuch, C. J. Smith, T. F. Krauss, and R. Houdré, «Coupled-mode theory and propagation losses in photonic crystal waveguides,» *Optic Express*, vol. 11, pp. 1490-1496, 2003.
- [67] S. Olivier, C. Weisbuch, and H. Benisty, «Fault-tolerant and compact add-drop filter proposal,» *Optics Letters*, vol. 28, pp. 2246-2248, 2003.
- [68] Emilie Schwoob, Henri Benisty, Claude Weisbuch, Lucio Martinelli, Helmut Heidrich, Klemens Janiak, Sebastian Golka, G-H Duan, O. Drisse, F. Pommereau, «proposition et validation optique d'un demultiplexeur tout cristaux-photoniques sur inp exploitant le guidage multimode,» *Laboratoire de physique de la Matière Condensée, Ecole Polytechnique*.
- [69] Farhad Mehdizadeh, Mohammad Soroosh, Hamed Alipour, «An optical demultiplexer based on photonic crystal ring resonators,» *Banaei*, 2016.
- [70] S. ARAFA, «Étude des composants à base de cristaux photoniques : Application dans le domaine du démultiplexage et de la détection,» *thèse de doctorat*, 2018.
- [71] LENGLE Kévin, «Traitement tout optique du signal à base de composants à cristaux photoniques en matériaux semi-conducteurs III-V,» *thèse de doctorat, université de RENNES*, 19 juin 2013.
- [72] A.Rostami, H. Alipour Banaei, F. Nazari, A. Bahrami, «An ultra compact photonic crystal wavelength division demultiplexer using resonance cavities in a modified Ybranch structure,» vol. 122, n° 116, pp. 1881-1985, 2011.

- [73] L.Weijia, Y. Daquan, S. Guansheng , T.Huiping, J. Yuefeng, «Optimization transmission of photonic crystal coupled cavity and design of demultiplexer for wevlength division multiplexing application».
- [74] Nawal BENLADGHEM, «Conception des Démultiplexeurs en Cristaux Photoniques 2D pour les Système DWDM,» *thèse de doctorat*, 04 Juillet 2019.
- [75] FILALI Meryem, «Etude et Conception d'un démultiplexeur 8 canaux à cristaux photoniques bidimensionnels,» *thèse de doctorat,université MOHAMED BOUDIAF-M'SILA*, 17 juin 2018.
- [76] Faïda, BOUGRIOU, «Etude théorique des matériaux à bandes interdites photoniques bidimensionnels:Applications dans le domaine du guidage optique et la détection,» *thèse de doctorat*, 16 Décembre 2013.
- [77] MAHI Amel,MALACHE Hadjer, «Nouvelles Structures Des Démultiplexeurs En Cristaux Photoniques 2D Pour Les Systèmes Très Hauts Débits,» *mémoire de master ,université de TLEMCEM*, 27 juin 2018.
- [78] Boudissa, Abdelali, «conception des filtres optiques a base des cristaux photonique pour application dans les routeurs optiques dans les réseaux de télécommunication optique,» *thèse de doctorat,université de CONSTANTINE*, 11 avril 2013.
- [79] T. Charvolin, E. Hadji, E. Picard, M. Zelsmann, M. Assous, B. Dal'Zotto, M. E. Nier, S. Tedesco, X. Letartre, P. Rojo-Roméo et C. Seassal, «Realization of two-dimensional optical devices using photonic band gap structures on silicon-on-insulator,» *Microelectronic Engineering* 61, p. 545, 2002.
- [80] S.Noda,A.Chutinan et M.Imada, «Trapping and emission of photons by a single defect in a photonic bandgap structure,» *Nature*, vol. 407, p. 608, 2000.
- [81] Abdelbasset Mounzar,Hadjira Badaoui, Mehadji Abri, «16-Channels wavelength efficient demultiplexing around 1.31/ 1.55 μm in 2D photonic crystal slab.,» *Optik*, vol. 193, p. 162685, 2019.
- [82] Vahid Fallahi, Masoud Mohammadi & Mahmood Seifouri, «Design of Two 8-Channel Optical Demultiplexers Using 2D Photonic Crystal Homogeneous Ring Resonators,» *Fiber and Integrated Optics*, 2019.
- [83] Fallahi.V,Seifouri.M and Mohammadi.M, «a new design of optical add/drop filters and multi-channel filters based on hexagonal PhCRR for WDM systems,» *Photonic Network Communications* , vol. 37, n° %11, pp. 100-109, 2019.

- [84] Rakhshani, Mohammed Reza, «Compact eight channel wavelength demultiplexer using modified photonic crystal ring resonators for CWDM applications,» *Spring nature* 2020, 13 janvier 2020.
- [85] Masoud Mohammadi , Mahmoud Seifouri, «A new proposal for a high-performance 4-channel demultiplexer based on 2D photonic crystal using three cascaded ring resonators for applications in advanced optical systems,» *Optical and Quantum Electronics*, vol. 51, n° %111, p. 350, 2019.
- [86] BENMALEK Nadra Manel,BENLADGHEM Nawal, «Conception des Démultiplexeurs en Cristaux Photoniques 2D pour les Système DWDM,» *mémoire*, 04 juillet 2019.
- [87] B.BOUHASSOUN,A.KADOUCI, «étude et simulation numérique des composants photoniques uni-dimensionnal,» *mémoire de Master,université de TLEMCEM*, 2018.
- [88] m. d. M. mohammed EL MOUFAKKIR, *études des propriétés optiques dans l'infrarouge lointain des hétérostructures à base de semi conducteurs GaAs/Algaas modèle de la fonction diélectrique.*, université Sidi Mohamed Ben Abdellah des science , Maroc, 2012.
- [89] A. SPIESSER, *Croissance épitaxiale et propriétés magnétiques d'hétérostructures de Mn5Ge3 sur Ge pour des applications en électronique de spin.*, Marseille II: Université de la méditerranée , 6 janvier 2011.
- [90] t. Delphine NEEL, *Etude en champ proche optique de guides à cristaux photoniques sur SOI.*, Lyon, 21 novembre 2006.
- [91] t. Maxence HOFMAN, *Composant optique à base de cristaux photonique pour les applications de l'imagerie infrarouge.*, 23 Novembre 2011.
- [92] t. Lydie FERRIER, *Micro-nanostructures à base de cristaux photoniques pour le controle 3D de la lumière*, 10 Décembre 2008.
- [93] J.D.Joannopoulos, S.G.Johnson, J.N.Winn, R.D.Meade(1995), *Photonic Crystals Molding the Flow of Light*, Princeton University Press,51p, 2008.

Résumé

Les cristaux photoniques sont des matériaux diélectriques ou métalliques artificiellement structurés dont la constante diélectrique varie périodiquement à l'échelle de la longueur d'onde selon plusieurs directions de l'espace. Ces structures sont désignées par l'appellation de cristaux photoniques à une, deux ou trois dimensions, influençant la propagation des ondes électromagnétiques à l'intérieur de la structure CP. Ces derniers possèdent une propriété optique intéressante qui est la bande interdite photonique (BIP), dont laquelle aucun mode électromagnétique ne peut se propager. C'est notamment cette propriété qui offre aux cristaux photoniques la possibilité de contrôler la propagation, sans absorption, des ondes électromagnétiques, ainsi de nouvelles perspectives dans la manipulation de la lumière. Notre travail, consiste à concevoir de nouveaux démultiplexeurs à base de cristaux photoniques bidimensionnels à plusieurs canaux pour la télécommunication optique, en séparant les longueurs d'onde pour les applications WDM, à l'aide du logiciel COMSOL. Les performances du DEMUX conçus en termes de transmission, seront effectuées et analysées.

Mots clés : cristaux photoniques, diagramme de dispersion, PWE, la carte des bandes, filtre, DEMUX, COMSOL.

Abstract

Photonic crystals are artificially structured dielectric or metallic materials whose dielectric constant varies periodically on the wavelength scale in several directions in space. These structures are designated by the name of one, two or three dimensional photonic crystals, influencing the propagation of electromagnetic waves inside the CP structure. The latter have an interesting optical property which is the photonic band gap (BIP), which no electromagnetic mode can propagate. It is in particular this property which offers photonic crystals the possibility of controlling the propagation, without absorption, of electromagnetic waves, thus new perspectives in the manipulation of light.

Our job is to design new demultiplexers based on multi-channel two-dimensional photonic crystals for optical telecommunications, by separating the wavelengths for WDM applications, using COMSOL software. The performance of the DEMUX designed in terms of transmission will be carried out and analyzed.

Keywords: photonic crystals, scatter diagram, PWE, band map, filter, DEMUX, COMSOL.

ملخص

البلورات الضوئية عبارة عن مواد عازلة أو معدنية منظمة بشكل اصطناعي يختلف ثابت عزلها بشكل دوري على مقياس الطول الموجي في عدة اتجاهات في الفضاء. يتم تسمية هذه الهياكل باسم بلورات ضوئية أحادية أو ثنائية أو ثلاثية الأبعاد، مما يؤثر على انتشار الموجات (، والتي لا يمكن لأي BIP. يحتوي الأخير على خاصية بصرية مثيرة للاهتمام وهي فجوة النطاق الضوئي (CP) الكهرومغناطيسية داخل بنية وضع كهرومغناطيسي نشرها. هذه الخاصية على وجه الخصوص هي التي توفر للبلورات الضوئية إمكانية التحكم في انتشار الموجات الكهرومغناطيسية دون امتصاص، وبالتالي منظورات جديدة في معالجة الضوء. مهمتنا هي تصميم مضاعفات تعدد الإرسال البلورية الضوئية ثنائية الأبعاد متعددة القنوات للاتصالات البصرية، لفصل الأطوال الموجية المصمم من DEMUX. سيتم تنفيذ وتحليل أداء COMSOL، باستخدام برنامج WDM لتطبيقات حيث الإرسال.

الكلمات الرئيسية: بلورات ضوئية ، مخطط مبعثر ، PWE ، خريطة نطاق ، مرشح ، DEMUX ، COMSOL.