

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة أبي بكر بلقايد- تلمسان -
Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER

En : Télécommunications

Spécialité : Systèmes de Télécommunications

Par :

SENHADJI Faiza

BENDJEMAI Anes

Sujet

Diviseurs à base des Résonateurs en Cristaux Photoniques

Soutenu publiquement, le 06/09/2020, devant le jury composé de :

| | | | |
|------------------|---------------------------|---------------|------------|
| Mr M. ABRI | Professeur | Univ. Tlemcen | Préside |
| Mme H. BADAoui | Maitre de conférences (A) | Univ. Tlemcen | Encadrai |
| Mme L. BENSEDDIK | Maitre assistante (A) | Univ. Tlemcen | Co-Encadri |
| Mlle F. LALLAM | Maitre de conférences (B) | Univ. Tlemcen | Examinat |

DEDICACES

A ma très chère mère

Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.

A mon très cher père

Tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager. Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection.

A mon très cher frère *Mohammed Islam* et ma belle-sœur *Salsabile*.

A tous mes amis et spécialement *Rahmi Bachir* et *Ben dali Abdelatif*.

Puisse Dieu vous donne santé, bonheur, courage et surtout réussite

ANES

Dédicaces

Je dédie cet humble travail

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

À mes chers parents, que Dieu les préserve ainsi que des milliers de leurs vies À ceux qui sont de plus en plus fiers de leur souvenir et il n'y a pas de sens à la vie près d'eux.

*A l'homme, mon précieux offre du dieu, qui doit ma vie, ma réussite Et tout mon respect : **mon cher père**, je voudrais te remercier pour ton amour, ta générosité, ta compréhension et ta confiance.*

*A toi **chère maman**, à la personne que j'aime le plus au monde, qui a toujours été présente pour moi dans les moments difficiles, qui m'avez toujours encouragé durant ces années d'étude.*

*A ma chère sœur **Nawel** et mon très cher frère **Sid ahmed** que Dieu les garde.*

*Dédicace À tous mes professeurs du primaire à l'université. Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont soutenu, encouragé et ont contribué au bon déroulement de cette mémoire, et spécialement **Rahmi Bachir et Ben dali Abdelatif**.*

FAIZA

Remerciement

Nous remercions ALLAH le tout puissant qui nous a donné durant toutes ces années, la santé, le courage et la foi en nous même pour pouvoir avancer et mener nos études à leurs termes. La réalisation d'un projet et ce qu'elle nécessite de connaissances théoriques et de savoir-faire pratique, est une opportunité intéressante pour apprendre à gérer un travail du début jusqu'à la fin. L'organisation s'avère un élément déterminant pour la bonne conduite du projet et pour les réalisations des différentes phases qui le constituent. Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à nos encadreurs : Madame ABRI Née BADAOUI Hadjira Maitre de conférence classe A à l'université Abou-BekrBelkaid et Mme BENSEDDIK Leila maître assistance (A) à l'université Abou-BekrBelkaid qui n'ont pas épargné le moindre effort dans l'encadrement de ce projet qu'elles trouvent ici l'expression de nos sincères remerciements d'avoir guidé et suivi toute la période de notre travail. Nous sommes très honorés par l'intérêt porté à ce travail par le président et les membres du jury qui ont accepté de l'évaluer.

En premier lieu, nous remercierons Monsieur Abri Mehadji professeur à l'université Abou-Bekr Belkaid d'avoir accepté de présider ce jury. Aussi, nous présentons notamment notre profonde gratitude à Mlle F. LALLAM maitre de conférences (B) à l'université Abou-Bekr Belkaid d'avoir examiné ce modeste travail. Pour la même occasion, nous adressons nos remerciements à tous nos enseignants pour leurs efforts épargnés qui ont guidé nos pas et enrichi nos travaux tout le long de nos études universitaires. Nous adressons, enfin, nos sincères remerciements à toute personne qui a contribué de près ou de loin à la réalisation de notre projet.

Résumé :

Les matériaux à bandes interdites photoniques (CPs) ont été définis comme des structures artificielles qui présentent une modulation périodique de leurs indices de réfraction dans une ou plusieurs directions de l'espace. Selon le nombre de directions, ces structures sont désignées par l'appellation de cristaux photoniques à une, deux ou trois dimensions. Ces structures présentent une propriété optique unique qui est la bande interdite photonique (BIP) dans laquelle aucun mode électromagnétique ne peut se propager. Cette BIP est très intéressante pour plusieurs applications dans le domaine de la télécommunication optique comme le filtrage

Dans ce travail, nous avons abordé des nouvelles topologies du diviseur en longueur d'onde à base des résonateurs en cristaux photoniques bidimensionnels dans le but de séparer les longueurs d'onde très utilisées dans les systèmes de transmission optique. Les performances du diviseur conçus en termes de transmission seront effectuées et analysées avec le logiciel COMSOL.

Mots clés :

Cristaux photoniques 2D, Filtres, optique intégrée, $W_1^k A$, Mailles carrée et triangulaire, Filtre Channel drop, guide d'onde, résonateurs en anneau, réseau carrée, communication optique, diviseur 1x2, diviseur 1x4.

Abstract:

Photonic band gap materials (PFBMs) have been defined as artificial structures that exhibit periodic modulation of their refractive indices in one or more directions in space. Depending on the number of directions, these structures are referred to as one-, two- or three-dimensional photonic crystals. These structures have a unique optical property, which is the photonic band gap (BIP) in which no electromagnetic mode can propagate. This BIP is of interest for several applications in the field of optical telecommunication such as filtering

In this work, we addressed new topologies of the resonator-based wavelength divider made of two-dimensional photonic crystals in order to separate wavelengths widely used in optical transmission systems. The performance of the designed splitter in terms of transmission will be carried out and analyzed with the COMSOL software.

Keywords:

2D photonic crystals, Filters, integrated optics, W_1^{kA} , Square and triangular lattices, Channel drop filter, waveguide, ring resonators, square array, optical communication, 1x2 splitter, 1x4 splitter.

ملخص:

تم تعريف مواد الموجات الضوئية المحظورة بأنها هياكل اصطناعية تعرض التعديل الدوري لمؤشرات إعادة الإنكسار في اتجاه واحد أو أكثر من اتجاهات الفضاء. وتبعاً لعدد الاتجاهات، يشار إلى هذه الهياكل باسم بلورات فوتونية ذات بُعدتين أو ثلاث بُعدتين. CPS وهي تحتوي على خاصية بصرية فريدة وهي نطاق حظر الصور (BIP) الذي لا يمكن أن ينتشر فيه أي وضع كهرومغناطيسي. ويعتبر هذا بروتوكول الإنترنت (BIP) مثيراً للاهتمام بالنسبة للعديد من التطبيقات في مجال الاتصالات الضوئية مثل التصفية.

في هذا العمل، ناقشنا هياكل جديدة لمقسم الطول الموجي القائم على الرنين البلوري الضوئي ثنائي الأبعاد لفصل الأطوال الموجية المستخدمة على نطاق واسع في أنظمة الإرسال البصري. سيتم تنفيذ أداء أجهزة التحويل المصممة من حيث الإرسال وتحليلها باستخدام برنامج COMSOL.

الكلمات الأساسية :

بلورات فوتونية ثنائية الأبعاد، مرشحات، بصريات مدمجة، $W_1^K A$ ، شبكة مربعة ومثلثة، مرشح إسقاط القنوات، وافي متموج، رنان حلقات، مصفوفة مربعة، اتصال بصري، مقسم 2×1 ، مقسم 4×1 .

Liste des figures

CHAPITRE I : Généralité sur les cristaux photoniques

| | | |
|-------------|--|----|
| Figure I.1 | Exemples d'une Structures photoniques naturelles typiques avec diverses couleurs structurelles. (A) Périodicité 1D sous forme de multicouches existantes dans les plumes de couvertes et violettes des pigeons domestiques. (B) Une certaine périodicité 1D discrète trouvée dans les papillons Morpho. (C) Structure PC 2D dans les barbules de paons mâles avec des motifs oculaires colorés et complexes. (D) Périodicité 2D de vides cylindriques noyés dans un milieu solide à indice de réfraction élevé dans des soies irisées de vers polychètes. (E) Structures opales inverses 3D apparaissant dans la couleur verte de Paridés Sésostris. (F) Structure cristalline photonique à base de diamant 3D chez le coléoptère L. Augustus] | 05 |
| Figure I.2 | Micrographies électroniques à balayage des échelles (a) bleu et (b) or-vert | 06 |
| Figure I.3 | Représentation schématique des trois types de cristaux photoniques | 08 |
| Figure I.4 | Images représentant des cristaux photoniques avec périodicité en (a) une dimension, (b) deux dimensions et (c) trois dimensions | 08 |
| Figure I.5 | la structure périodique 1DPC ou le miroir de Bragg | 09 |
| Figure I.6 | Structure (a) des barres diélectriques dans l'air et (b) des trous d'air dans la région diélectrique | 09 |
| Figure I.7 | Les différentes familles de cristaux photoniques bidimensionnels :(a) réseau carrée (b) réseau triangulaire (c) réseau hexagonal | 10 |
| Figure I.8 | Structure des cristaux photoniques en tas de bois 3D | 11 |
| Figure I.9 | Les périodes d'un cristal photonique unidimensionnel | 12 |
| Figure I.10 | Zones de Brillouin des réseaux hexagonaux et rectangulaires | 13 |
| Figure I.11 | Structure, unité primitive et première zone de Brillouin pour les différents cristaux photoniques : (a) le réseau triangulaire ; (b) le réseau carré ; (c) le réseau hexagonal | 14 |
| Figure I.12 | Exemples de défauts dans une structure photonique bidimensionnelle parfaite. (a) cavité, (b) guide | 14 |
| Figure I.13 | (a) Défaut lacunaire, (b) et (c) Défauts de substitutions | 15 |
| Figure I.14 | Exemple de guide W1 à cristal photonique hexagonal de trous d'air sur un substrat de silicium sur isolant | 15 |
| Figure I.15 | Représentation des polarisations TE et TM pour les cristaux photoniques bidimensionnels constitués de trous selon l'axe z | 17 |
| Figure I.16 | diagramme de bande d'un cristal photonique 2D à maille triangulaire en polarisation TE et TM | 17 |
| Figure I.17 | Analyse des données de la bande interdite concernant le rapport et la largeur maximum de cette bande | 18 |
| Figure I.18 | Carte de bande interdite pour les différentes structures cristallines photoniques (a) le réseau triangulaire; (b) le réseau carré ; (c) réseau hexagonal | 18 |
| Figure I.19 | Dispositifs à base de cristaux photoniques 2-D. (a) Coupleur directionnel ; (b) Biocapteur ; (c) Diviseur de puissance ; (d) Filtre ; (e) Démultiplexeur ; (f) Double virage | 19 |
| Figure I.20 | Schéma de guide W5 créée dans un réseau triangulaire de trous d'air suivant les deux directions cristallographiques ΓK et ΓM | 19 |

| | | |
|---|--|----|
| Figure I.21 | Structure du capteur de pression | 20 |
| Figure I.22 | Diagramme schématique de la structure du biocapteur indiquant le nombre de trous fonctionnalisés autour de la cavité résonante; (a) 4 trous fonctionnalisés, (b) 6 trous fonctionnalisés, (c) 14 trous fonctionnalisés, (d) 20 trous fonctionnalisés, (e) 54 trous fonctionnalisés, (f) tous les trous d'air sont utilisés comme trous fonctionnalisés | 21 |
| Figure I.23 | Schéma d'un coupleur optique directionnel | 21 |
| Figure I.24 | Représentation d'un filtre add / drop | 22 |
| Figure I.25 | 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 | 23 |
| Figure I.26 | schéma d'un démultiplexeurs a cristaux photoniques | 23 |
| Figure I.27 | Le démultiplexeur multi canal à double bande | 24 |
| Figure I.28 | structure d'un diviseur : (a) 1x2 avec une jonction Y, (b) 1x4 avec une jonction Y, (c) 1x2 avec une jonction T, (d) 1x3 avec une jonction T | 24 |
| Chapitre II : Diviseurs de puissance à base des résonateurs en Cristaux photoniques 2D | | |
| Figure II.1 | Exemples de cavités de types L_n | 30 |
| Figure II.2 | Exemple de cavité hexagonale dans un cristal photonique | 31 |
| Figure II.3 | Exemples de cavités de types H_n : (a) cavité H1, (b) cavité H2 | 31 |
| Figure II.4 | cavité résonante carré | 31 |
| Figure II.5 | Cavités résonante dans des cristaux photoniques à réseau triangulaire. a) Cavité L1. b) Cavité L3 | 32 |
| Figure II.6 | structure d'un résonateur à cristal photonique rectangulaire emboîté | 32 |
| Figure II.7 | a) Structure de guide d'ondes à cristal photonique; (b) les différents modes de transmission du guide d'onde droit; (c) les différents modes de transmission du guide d'onde courbe | 33 |
| Figure II.8 | (a) guidage par bande interdite photonique, (b) Guide d'onde à courbures extrêmes | 34 |
| Figure II.9 | Guide d'onde linéaire | 34 |
| Figure II.10 | Schéma des guides d'ondes à cristal photonique contenant deux courbures consécutives de 60° | 35 |
| Figure II.11 | Une représentation schématique d'un guide d'onde de bus est couplée verticalement à une cavité PhC | 36 |
| Figure II.12 | (A) La cavité L3 est réalisée en enlevant trois trous au centre, et le facteur Q est optimisé en déplaçant et en rétrécissant les trous (indiqués en vert) de chaque côté de la cavité. (B) La cavité DA est réalisée en ajustant la position des trous de chaque côté du guide d'onde W1 | 37 |
| Figure II.13 | La distribution du champ électrique dans le guide d'onde (a) et la cavité (b). La distribution correspondante dans l'espace K du champ dominant ; (c) guide d'onde ; et (d) cavité | 38 |
| Figure II.14 | : (a) La structure optimisée du séparateur en $Y 1 \times 2$ excitée en mode TE, (b) Réponse spectrale en termes de transmission dans les deux ports de sortie. La puissance est | 39 |

| | | |
|--|---|----|
| | répartie de manière égale entre les voies des deux ports. La transmission totale enregistrée est égale à 86% | |
| Figure II.15 | : (a) Conception du diviseur de faisceau 1×3 optimisé, (b) Réponse spectrale en transmission et en réflexion aux ports de sortie du diviseur 1×3 optimisé | 40 |
| Figure II.16 | Structure du diviseur 1 × 4 optimisé | 41 |
| Figure II.17 | Réponse spectrale en termes de transmission vers les ports de sortie du diviseur 1 × 4 | 41 |
| Figure II.18 | Vue schématique du diviseur de faisceau 1 × 5 PhC optimisé, avec paramètres: $S_x=27\mu\text{m}$, $S_y=24\mu\text{m}$, $\square_x=0,05\mu\text{m}$, $\square_y=0,05\mu\text{m}$, $r=0,167a$, r_1 est le rayon de la tige d'air au centre de la jonction en Y, $L=3,46\mu\text{m}$, $L_1=1,48\mu\text{m}$, $L_2=0,98\mu\text{m}$, $r_3=0,5a$ et $L_3=1,85\mu\text{m}$ | 42 |
| Figure II.19 | ×5 graphiques de transmission du diviseur de faisceau qui est composé sur la géométrie optimisée de division de la jonction Y | 42 |
| Figure II.20 | Conception du diviseur de faisceau 1 × 6 proposé excité en mode TE. Le PC a une matrice de grille triangulaire de rayons de trous d'air ($r = 0,36a$) gravés dans un milieu diélectrique ($n_{\text{eff}} = 3,24$). Les paramètres de la structure PC sont définis comme suit: $S_x = 26 \mu\text{m}$, $S_y = 24 \mu\text{m}$, $\square_x = \square_y = 0,05 \mu\text{m}$ et la disposition du défaut avec les paramètres $r_3 = 0,5a$ et $L_3 = 1,879 \mu\text{m}$ | 43 |
| Figure II.21 | Réponse spectrale en transmission et en réflexion aux ports de sortie du diviseur de faisceau 1×6 optimisé. La puissance est divisée presque également entre les six branches. La transmission totale enregistrée pour la longueur d'onde de $1,55\mu\text{m}$ est égale à 96% | 44 |
| Figure II.22 | (a) Structure du diviseur 1 × 8 optimisé, (b) Réponse spectrale en termes de transmission vers les ports de sortie du diviseur en Y 1 × 8 | 44 |
| Figure II.23 | La conception optimale du diviseur de faisceau 1×10 est sortie en mode électrique transversal avec des guides d'ondes de sortie parallèles basés sur l'intégration de la jonction en Y | 45 |
| Figure II.24 | Graphe de transmission du diviseur de faisceau 1×10 qui est composé sur la jonction Y optimisée | 46 |
| Figure II.25 | le diviseur a cristaux photoniques en Y (1x2) | 46 |
| Figure II.26 | le diviseur a cristaux photoniques en T (1x2) | 47 |
| Figure II.27 | le diviseur a cristaux photoniques en Y (1x4) | 47 |
| Figure II.28 | le diviseur a cristaux photoniques en T (1x4) | 47 |
| Figure II.29 | le diviseur a cristaux photoniques en Y (1x8) | 48 |
| Figure II.30 | le diviseur a cristaux photoniques en T (1x8) | 48 |
| Figure II.31 | le diviseur a cristaux photoniques en Y (1x16) | 49 |
| Chapitre III : Résultats et Interprétations | | |
| Figure III. 1 | Présentation du software COMSOL | 55 |
| Figure III. 2 | structure périodique 2D déconnectée | 56 |
| Figure III. 3 | Représentation de la structure carrée sans défaut avec: $a=0.6 \mu\text{m}$, $r/a =0.2$ | 56 |

| | | |
|---------------|--|----|
| Figure III. 4 | Réponse spectrale de la transmission et la réflexion. | 57 |
| Figure III. 5 | Répartition du champ électrique d'une structure CP carrée sans défaut pour différents longueurs d'ondes en mode TE: (a) pour $\lambda=1.2 \mu\text{m}$ (b) pour $\lambda= 1.3116 \mu\text{m}$.(c) pour $\lambda= 1.5528 \mu\text{m}$ | 58 |
| Figure III. 6 | Guide W1 KA dans une structure carrée | 59 |
| Figure III. 7 | La réponse spectrale en transmission et en réflexion du guide mono-rangée | 59 |
| Figure III. 8 | Répartition du champ électrique d'un guide mono rangée à base de CPs à maille carrée pour différentes longueurs d'ondes en mode TE: (a) pour $\lambda=1.31 \mu\text{m}$ (b) pour $\lambda= 1.37 \mu\text{m}$.(c) pour $\lambda= 1.55 \mu\text{m}$ | 60 |
| Figure III. 9 | Structure schématique | 61 |
| Figure III.10 | Spectre de transmission du CDF aux ports 'B'et 'C' | 62 |
| Figure III.11 | Répartition du champ électrique dans le CDF en polarisation TE | 63 |
| Figure III.12 | Structure schématique du diviseur 1x2 à base de résonateur | 64 |
| Figure III.13 | Spectre de transmission du diviseur 1x2 | 64 |
| Figure III.14 | Répartition de champ électrique E_z dans le diviseur 1x2 à la longueur d'onde $1.5498\mu\text{m}$ (à résonance). | 65 |
| Figure III.15 | Structure schématique du diviseur 1x4 à base de résonateur | 65 |
| Figure III.16 | Spectre de transmission du diviseur 1x4 | 66 |
| Figure III.17 | Répartition de champ électrique E_z dans le diviseur 1x4 à la longueur d'onde $1.5498\mu\text{m}$ (à résonance) | 66 |

Sigles et abbreviations

| | |
|-----------------------------------|---|
| 1D | structure à une dimension |
| 2D | structure à deux dimensions |
| 3D | structure à trois dimensions |
| CP | Cristal photonique |
| WDM | Wavelength Division Multiplexing |
| \vec{H} | Le champ magnétique |
| \vec{E} | Le champ électrique |
| TM | Transverse magnétique |
| TE | Transverse électrique |
| ϵ | Permittivité |
| a_1 | Epaisseur de la couche de permittivité ϵ_1 |
| a_2 | Epaisseur de la couche de permittivité ϵ_2 |
| BIP | Bande Interdite Photonique |
| F | facteur de remplissage |
| BZ | Zone de Brillouin |
| Δn | Contraste d'indice |
| n_h | Indice de réfraction matériau de haut indice |
| n_l | Indice de réfraction matériau de bas indice |
| ϵ_0 | Permittivité diélectrique dans le vide |
| μ_0 | Perméabilité diélectrique dans le vide |
| H1 | La cavité hexagonale |
| a | distance entre le centres de deux motifs |
| K | le rayon normalisé (r/a). |
| R | Rayon |
| Λ | longueur d'onde |
| W₁K_A | Guide d'onde mono rangée |
| CDF | Filtre channel drop |
| PBG | Photonique Band Gap |
| S1 | La cavité de résonance |
| Q | Facteur de qualité |
| CWDM | Coarse Wavelength division multiplexing. |
| DWDM | Dense Wavelength Division Multiplexing |
| PCF | Fibre à Cristaux Photonique |
| FDTD | Finite Difference Time Domain |

Table des matières

| | |
|---|-----|
| <i>Remerciement</i> | i |
| <i>Résumé</i> : | ii |
| <i>Abstract</i> : | iii |
| <i>ملخص</i> : | iv |
| Liste des figures | v |
| Sigles et abbreviations..... | ix |
| Introduction générale | 1 |
| I Introduction | 5 |
| I.1 Historique..... | 6 |
| I.2 Catégorie des cristaux photoniques..... | 7 |
| I.2.1 Cristal photonique à une dimension 1D..... | 8 |
| I.2.2 Cristaux photoniques à deux dimensions 2D..... | 9 |
| I.2.3 Cristal photonique a trois dimensions 3D | 10 |
| I.3 Caractéristiques physiques des cristaux photoniques | 12 |
| I.3.1 Contraste d'indice Δn | 12 |
| I.3.2 Période..... | 12 |
| I.3.3 Le facteur de remplissage f | 12 |
| I.3.4 Zone de Brillouin | 13 |
| I.4 Défauts dans les cristaux photoniques | 14 |
| I.4.1 Défauts ponctuels | 14 |
| I.4.2 Défauts linéiques (étendus) | 15 |
| I.5 La théorie d'étude des cristaux photoniques..... | 15 |
| I.6 Diagramme de bande..... | 16 |
| I.7 La carte de bande [12]..... | 17 |
| I.8 Application sur les cristaux photoniques | 18 |
| I.8.1 Guide d'onde | 19 |
| I.8.2 Capteurs et biocapteurs : | 20 |
| I.8.2.a Capteur :..... | 20 |
| I.8.2.b Biocapteurs : | 20 |
| I.8.3 Coupleur directionnel:..... | 21 |
| I.8.4 Filtres et multiplexeurs..... | 21 |
| I.8.5 Démultiplexeur..... | 23 |

| | | |
|----------|---|----|
| I.8.6 | Les diviseurs..... | 23 |
| I.9 | Conclusion..... | 24 |
| I.10 | Référence:..... | 25 |
| II | Introduction..... | 30 |
| II.1 | Les résonateurs à cristaux photoniques..... | 30 |
| II.1.1 | Résonateur hexagonal..... | 30 |
| II.1.2 | Résonateur carré..... | 31 |
| II.1.3 | Résonateur triangulaire..... | 31 |
| II.1.4 | Résonateur rectangulaire..... | 32 |
| II.2 | Guidage d'ondes dans les cristaux photoniques..... | 32 |
| II.2.1 | Guide à Cristal photonique..... | 33 |
| II.2.2 | Différents types des guides d'ondes..... | 34 |
| II.2.2.a | Guide d'onde linéique..... | 34 |
| II.2.2.b | Guide d'onde courbée..... | 35 |
| II.3 | Couplage résonateur/ guide dans un cristal photonique 2D..... | 35 |
| II.4 | Le diviseur de puissance à cristaux photoniques..... | 38 |
| II.4.1 | Définition..... | 38 |
| II.4.2 | Travaux réalisés sur les diviseurs de puissance à base de cristaux photoniques..... | 38 |
| II.4.3 | Différent types de diviseur à cristaux photoniques..... | 46 |
| II.4.3.a | - Les diviseurs à cristaux photoniques en Y (1x2)..... | 46 |
| II.4.3.b | - Les diviseurs à cristaux photoniques en T (1x2)..... | 47 |
| II.4.3.c | - Les diviseurs à cristaux photoniques en Y (1x4)..... | 47 |
| II.4.3.d | - Les diviseurs à cristaux photoniques en T (1x4)..... | 47 |
| II.4.3.e | - Les diviseurs à cristaux photoniques en Y (1x8)..... | 48 |
| II.4.3.f | - Les diviseurs à cristaux photoniques en T (1x8)..... | 48 |
| II.4.3.g | -Les diviseurs à cristaux photoniques en Y (1x16)..... | 49 |
| II.5 | Conclusion..... | 49 |
| II.6 | Référence..... | 50 |
| III | Introduction..... | 54 |
| III.1 | Présentation de logiciel ComsolMultiphysics..... | 54 |
| III.2 | Présentation des résultats de simulation :..... | 55 |
| III.3 | Etude des structures bidimensionnelles sans défaut :..... | 56 |
| III.3.1 | Structure carré sans défaut :..... | 56 |
| III.4 | Etudes des structures bidimensionnelles avec défaut :..... | 58 |
| III.4.1 | Structure carré avec défaut :..... | 58 |
| III.5 | Filtre Channel drop à base de CPs :..... | 61 |
| III.6 | Les deviseurs à base de résonateur :..... | 63 |
| III.6.1 | Structure d'un diviseur 1x2 à base de résonateur :..... | 63 |

| | | |
|---------|---|----|
| III.6.2 | Structure d'un diviseur 1x4 à base de résonateur: | 65 |
| III.7 | Conclusion: | 67 |
| III.8 | Référence | 68 |
| | Conclusion générale | 70 |

Introduction générale

Introduction générale

Les propriétés des cristaux photoniques (CP) offrent de nouvelles perspectives pour le confinement, le stockage, le filtrage ou même le guidage de la lumière : cela devrait intéresser de nombreux domaines (imagerie, communications, entre autres) [1]. Pour cette raison, depuis quelques années, les chercheurs s'intéressent de plus en plus à l'étude et à la synthèse des cristaux photoniques. Les CPs sont des matériaux artificiels dont la permittivité est une fonction périodique de la position, avec une période comparable à la longueur d'onde de la lumière. Les structures périodiques appelées CPs sont connues pour être des milieux hautement dispersifs pour la propagation des ondes électromagnétiques et acoustiques respectivement lorsque les longueurs d'onde sont de l'ordre de grandeur du paramètre de maillage. En fonction de la géométrie de la structure, les CPs peuvent être divisés en trois catégories principales, à savoir les structures unidimensionnelles (1D), bidimensionnelles (2D) et tridimensionnelles (3D).

Connus depuis longtemps, les CPs font encore l'objet de nombreuses études et développements en vue d'importantes applications pratiques, parmi lesquelles on peut citer la construction de miroirs à très haute réflectivité, très utiles pour améliorer l'émission de lumière. Par les lasers, la construction de guides d'ondes à faibles pertes pour canaliser la lumière dans les dispositifs optoélectroniques utilisés dans les télécommunications, le piégeage de la lumière dans les cellules solaires, et récemment, la conception miniaturisée de capteurs à haute sensibilité [2].

Différentes méthodes existent pour l'émission de lumière dans les dispositifs optiques, mais le choix d'un environnement approprié avec une dissipation de puissance minimale reste un objectif majeur dans ces dispositifs. Les cristaux photoniques CPs ce sont des matériaux aux propriétés exotiques qui se sont avérés être des dispositifs très importants pour l'optique intégrée. Parmi ces dispositifs, on cite le diviseur de puissance [3] qui est un composant clé passif utilisé dans de nombreux systèmes. Idéalement, il assure l'envoi de la lumière dans les virages serrés ou sépare de manière compacte un faisceau de lumière incidente en deux ou plusieurs faisceaux avec des polarisations linéaires orthogonales qui se déplacent dans des directions différentes [4], mais sans réflexion ni pertes de rayonnement importantes et doivent être de taille compacte. Aujourd'hui, les diviseurs de puissance ont été largement étudiés pour leurs applications potentielles dans divers domaines des communications optiques. [5]

L'objectif de ce mémoire est la réalisation d'un diviseur à base de résonateur en cristaux photoniques bidimensionnels.

Ce mémoire se compose par trois chapitres, les deux premiers seront théoriques et le dernier sera consacré à la simulation numérique.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté les notions de base associées aux cristaux photoniques. En premier lieu nous avons énuméré les différents types de cristaux photoniques, ensuite nous avons cité leurs propriétés physiques et Géométriques. En plus, nous étudierons les notions de bande interdite photonique et de carte des bandes et la zone de Brillouin ainsi les principes de défauts qui existent au niveau d'un cristal.

Nous avons terminé ce chapitre par les différentes applications optiques qui peuvent en découler de ces matériaux.

Dans le deuxième chapitre, nous avons étudié les résonateurs à cristaux photonique tel que les guides d'onde à cristaux photoniques et le couplage guide – cavité. Par la suite, nous présenterons quelques travaux réalisés sur les diviseurs à base CP et les différents types de diviseur.

Dans le dernier chapitre de ce mémoire, nous allons présenter en premier lieu brièvement notre outil de simulation le logiciel COMSOL, ensuite nous allons exposer les différents résultats de simulation

Ce mémoire se terminera par une conclusion générale.

- [1]. F. Lallam, H. AbriBadaoui, and M. Abri, " Novel 1.31 μ m narrow-band TE-mode filter design based on a PBG shift in a 2D Photonic Crystal Slab", *Photonics Letters OF Poland*, vol 8 (3), 82-84 (2016). <http://www.photonics.pl/PLP>
- [2]. E. Yablonovitch, « Photonic band-gap crystals », *J. Phys: Condensed Matter*, Vol 5 N°16, pp. 2443-2460, 1993.
- [3]. TianBao Yu, Qi Jie Wang, Jun Zhang, Jian Yi Yang, and Siu Fung Yu, 'Ultra compact 2x2 Photonic Crystal Waveguide Power Splitter Based on Self-Imaging Effect Realized by Asymmetric Interference ', *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 23, No. 16, pp. 1151- 1153, August 15, 2011.
- [4] .Shi, Y., 'A compact polarization beam splitter based on a multimode photonic crystal waveguide with an internal photonic crystal section', *Progress In Electromagnetics Research*, Vol. 103, pp. 393-401, 2010.
- [5] .Ghaffari, A., Djavid, M., Monifi, F. and Abrishamian, M. S., 'Photonic crystal power splitter and wavelength multi/demultiplexer based on directional coupling', *J. Opt. A: Pure Appl.Opt.*10 (7), 1-7, 2008

Chapitre 1 :
Généralités sur les cristaux
photoniques

I Introduction

Au cours des millions d'années d'évolution, les organismes vivants ont créé une étonnante variété de structures photoniques pour produire un monde naturel coloré. Les couleurs structurelles générées par l'architecture photonique dans les organismes ont suscité un grand intérêt au fil du temps. Ces organismes ont la capacité de contrôler le transport de la lumière à l'aide d'unités de nanostructure photonique périodique situées à la surface de leur corps. En général, les couleurs structurelles brillantes des créatures naturelles jouent un rôle important dans l'attraction sexuelle, le comportement social et le camouflage environnemental. Selon les variations de l'indice de réfraction et de la période dans l'espace, les PC naturels peuvent être classés respectivement comme cadres 1 D, 2 D et 3 D, comme le montre la figure I.1.

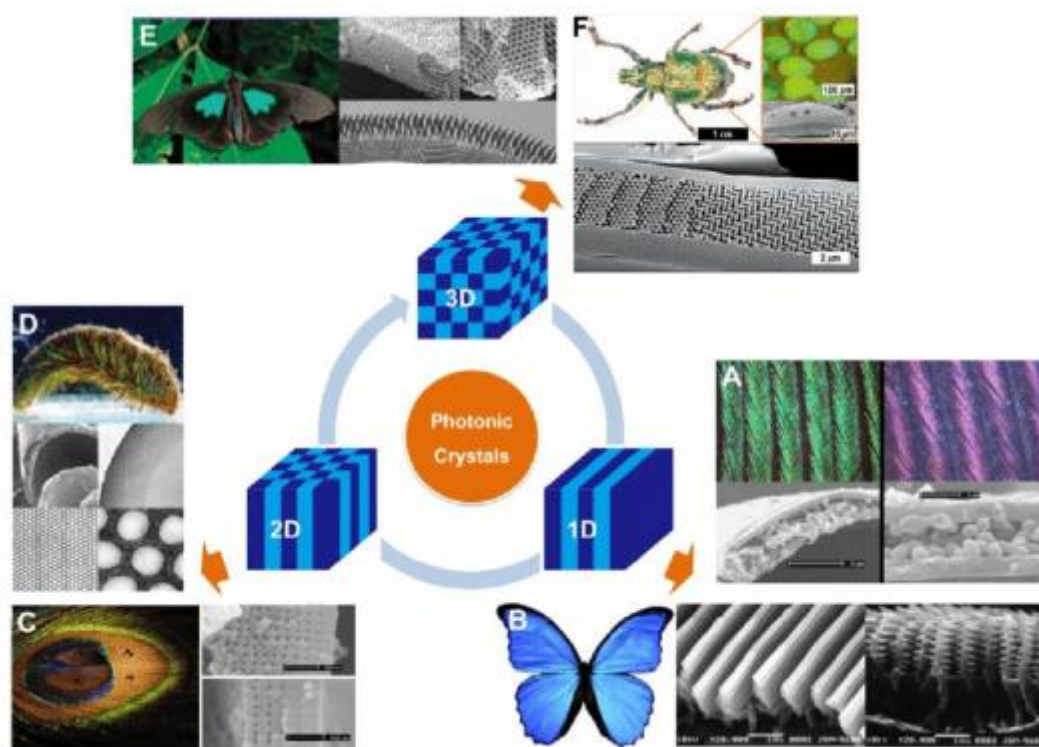


Figure I.1: Exemples d'une structure photonique naturelle typique avec diverses couleurs structurelles. (A) Périodicité 1D sous forme de multicouche existant dans les plumes de couvertes et violettes des pigeons domestiques. (B) Une certaine périodicité 1D discrète trouvée dans les papillons Morpho. (C) Structure PC 2D dans les barbules de paons mâles avec des motifs oculaires colorés et complexes. (D) Périodicité 2D de vides cylindriques noyés dans un milieu solide à indice de réfraction élevé dans des soies irisées de vers polychètes. (E) Structures opales inverses 3Ds apparaissant dans la couleur verte de Paridés Sésostris. (F) Structure cristalline photonique à base de diamant 3D chez le coléoptère L. Augustus]. [1]

Dans le cas des papillons, pour comparer les deux côtés des ailes de papillon, l'auteur [2] étudié les morceaux d'ailes au microscope électronique à balayage. Dans les écailles des ailes, des nano-architectures photoniques de type pot de poivre similaire ont été observées (figure 1). Les encarts de couleur montrent les surfaces d'aile dorsale et ventrale correspondantes des imaginent. Malgré la similitude des nano architecturent quasi ordonnées, les différences spectrales mesurées étaient significatives, les pics de préfectance caractéristiques étant apparus à 420 nm du côté bleu et à 560 nm du côté vert.

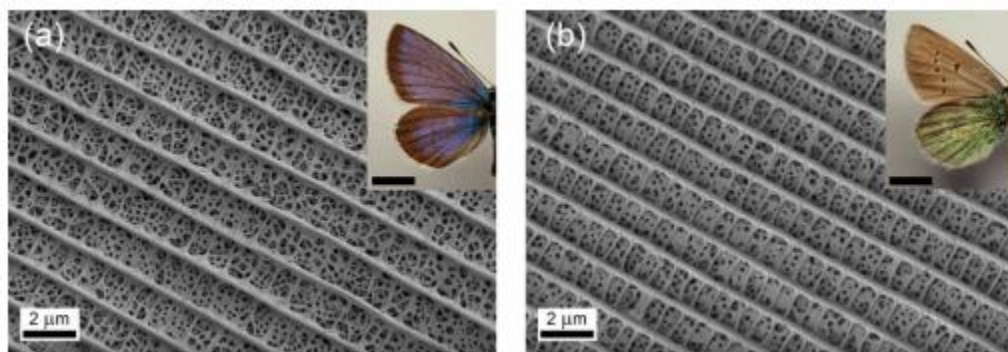


Figure I.2 : Micrographies électroniques à balayage des échelles (a) bleues et (b) or vert [2].

Dans ce premier chapitre, nous allons présenter un rappel historique des cristaux photoniques, ensuite nous avons décrit les différentes catégories de cristaux photoniques avec leurs propriétés physiques et les principes défaut qui existe au niveau des PC. Nous discuterons ensuite sur la théorie des cristaux photoniques, la notion de la carte de bande et diagramme de bande. Nous terminons ce chapitre avec quelques applications de cristaux photoniques.

I.1 Historique

Lord Rayleigh étudie pour la première fois la propagation des ondes électromagnétiques dans les milieux périodiques en 1888. Ces structures sont des cristaux photoniques unidimensionnels (1D) (1D-CP) qui ont un PBG qui interdit la propagation de la lumière à travers les plans. Bien que les PC aient été étudiés sous une forme ou une autre depuis 1887, le terme "cristal photonique" est utilisé pour la première fois plus de 100 ans plus tard, après que Yablonovitch et John aient publié deux articles marquants sur les CP en 1988. Avant cela, Lord Rayleigh a commencé son étude en 1888, en montrant que de tels systèmes ont un PBG 1D, une gamme spectrale de grandes réflectivités, connue sous le nom de bande d'arrêt. De plus, les

1 D-CP sous la forme de piles diélectriques multicouches périodiques (comme le miroir de Bragg) sont étudiés de manière approfondie. Aujourd'hui, ces structures sont utilisées dans une large gamme d'application telle que les revêtements réfléchissants pour améliorer l'efficacité des diodes électroluminescentes (LED) et les miroirs hautement réfléchissants dans certaines cavités laser.

En 1987, Yablonovitch et John ont proposé 2 D-CP et 3 D-CP, qui ont une structure diélectrique périodique en deux dimensions et en trois dimensions, respectivement. Les structures diélectriques périodiques présentent un PBG. Leurs deux propositions concernent des structures optiques périodiques de dimension supérieure (2D ou 3 D). La principale motivation de Yablonovitch est d'ingénierie de la densité photonique des états, afin de contrôler l'émission spontanée des matériaux qui sont intégrés dans le CP. De la même manière, l'idée de John est d'affecter la localisation et le contrôle de la lumière à l'intérieur de la structure périodique du PC. Ses deux travaux traitent de l'ingénierie d'un matériau structuré présentant des plages de fréquences auxquelles la propagation des ondes électromagnétiques n'est pas autorisée, appelée PBG - une plage de fréquences à laquelle la lumière ne peut se propager à travers la structure dans aucune direction.

Après 1987, le nombre de documents de recherche concernant les CPs a commencé à croître de façon exponentielle. Cependant, en raison des difficultés de fabrication de ces structures à des échelles optiques, les premières études sont soit théoriques soit dans le régime micro-ondes et optique, ou les PC peuvent être construits à l'échelle nanométrique beaucoup plus facilement accessible.

En 1991, Yablonovitch a démontré le premier PBG 3D dans le régime micro-ondes. En 1996, Thomas Krauss a fait la première démonstration d'un 2 DPC aux longueurs d'onde optiques. Cela a ouvert la voie moderne de fabrication de PC en matériaux semi-conducteurs par les méthodes utilisées dans l'industrie des semi-conducteurs. Bien que ces techniques doivent encore mûrir dans des applications commerciales, les 2 DPC ont trouvé une utilisation commerciale sous la forme de fibres de cristal photonique (PCF) et de composantes optiques.

I.2 Catégorie des cristaux photoniques

Selon le type de structure, il existe trois catégories de cristaux photoniques :

- périodicité dans un sens : Cristal photonique unidimensionnel 1D ;
- périodicité dans deux directions de l'espace : Cristal photonique bidimensionnel 2D ;
- périodicité dans toutes les directions de l'espace : Cristal photonique tridimensionnel 3D ;

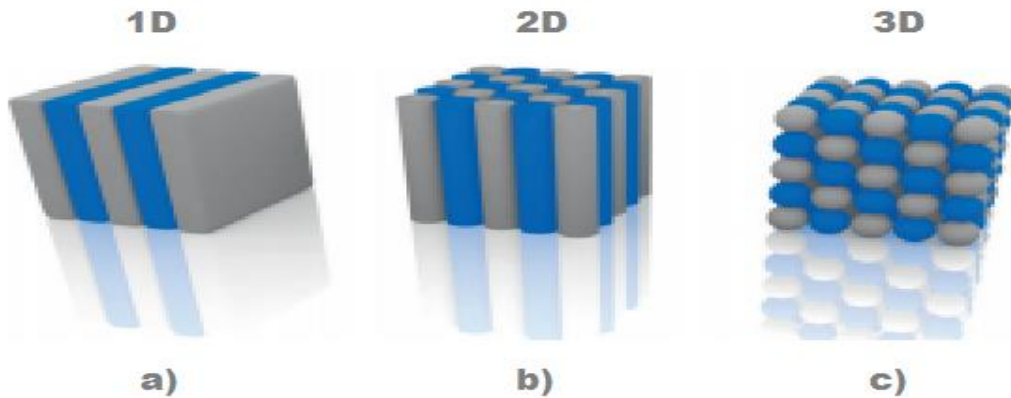


Figure I.3 : Représentation schématique des trois types de cristaux photoniques. Les différentes couleurs représentent des matériaux avec différentes constantes diélectriques. Dans les CPs- 2D ou 3 D, la structure peut également être formée d'un seul matériau avec la bonne distance entre chaque élément.

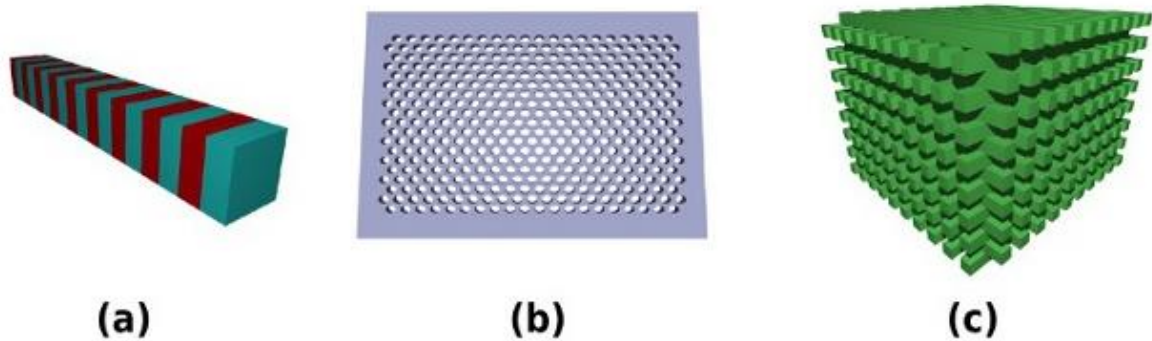


Figure I.4 : Images représentant des cristaux photoniques avec périodicité en (a) une dimension, (b) deux dimensions et (c) trois dimensions.

I.2.1 Cristal photonique à une dimension 1D

Dans les 1D-CP, la modulation périodique de l'indice de réfraction se produit dans une seule direction, tandis que les variations d'indice de réfraction sont uniformes pour les deux autres directions de la structure. Un exemple pour un tel 1D-CP est le miroir diélectrique de Bragg bien connu composé de couches alternées avec des indices de réfraction faibles et élevés, comme le montre la figure I.5.

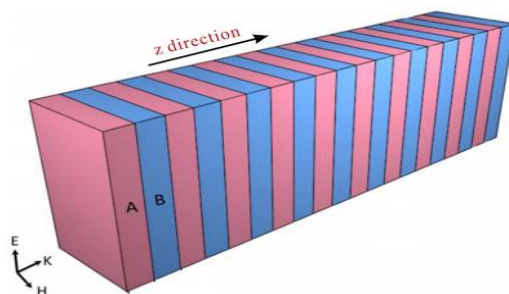


Figure I.5 : la structure périodique 1 D-CP ou le miroir de Bragg.

I.2.2 Cristaux photoniques à deux dimensions 2D

Les structures PC qui sont périodiques dans deux directions différentes et homogènes dans la troisième direction sont appelées 2 D-CP, comme le montrent les figures I.3. (b) et 4 (b). Dans la plupart des 2 D-CP, le PBG se produit lorsque le réseau présente un contraste d'indice suffisamment important. Si le contraste d'indice de réfraction entre les cylindres (tiges) et le fond (air) sont suffisamment importants, le PBG(2D) peut se produire pour une propagation dans le plan de périodicité perpendiculaire à l'axe de la tige.

Généralement, les PBG(2D) sont constitués de tiges diélectriques dans l'air hôtes (piliers à diélectrique élevé noyé dans un milieu à faible diélectrique) ou de trous d'air dans une région diélectrique (tiges à faible diélectrique dans un réseau diélectrique supérieur connecté) comme le montrent les figures II.6(a) et 6(b). Les tiges diélectriques dans l'air hôtes donnent le PBG pour le mode magnétique transversal (TM) où le champ E est polarisé perpendiculairement sur le plan de la périodicité. Les trous d'air dans une région diélectrique donnent les modes TE (Transverse électrique) où le champ H est polarisé perpendiculairement sur le plan de la périodicité. Structure connectée : dans ce cas les motifs élémentaires à un indice n_1 inférieure à l'indice n_2 de la matrice diélectrique (figure I.6.a).

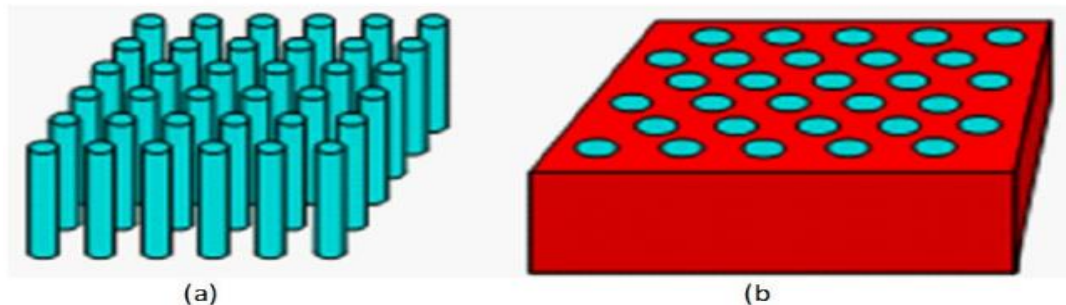


Figure I.6: Structure (a) des barres diélectriques dans l'air et (b) des trous d'air dans la région diélectrique [3].

Les différentes mailles qui existent dans les cristaux photoniques bidimensionnels sont les suivantes :

- Réseau carré :

Les nœuds du réseau sont situés sur un carré avec le côté « a », où a représenté la période du réseau.

- Réseau triangulaire :

Le dû réseau sont placés sur un triangle de côté « a », ou a correspondu au pas du réseau

- Réseau hexagonal :

Contrairement au réseau triangulaire, il s'agit d'un réseau avec deux atomes par maille. Les nœuds du réseau sont situés sur un hexagone du côté « a », où a est le pas du réseau.

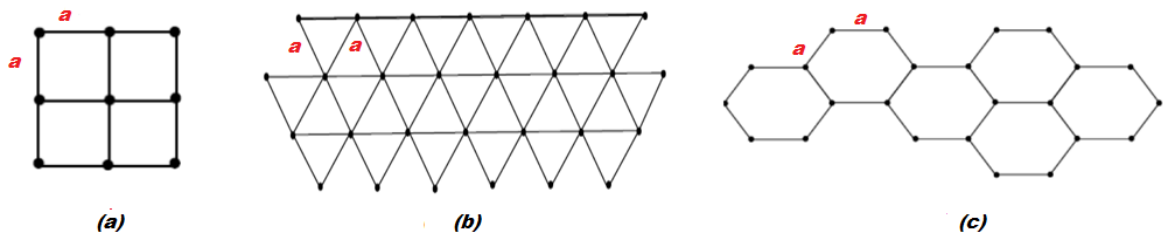


Figure I.7 : Les différentes familles de cristaux photoniques bidimensionnels : (a) réseau carré (b) réseau triangulaire (c) réseau hexagonal.

I.2.3 Cristal photonique à trois dimensions 3D

Un 3D DPC est une structure diélectrique qui a une modulation de permittivité périodique le long de trois axes différents; à condition que les conditions de contraste diélectrique suffisamment élevé et de périodicité appropriée soient remplies, un PBG apparaît dans toutes les directions. Ces PBG 3D, contrairement aux 1D et 2D, peuvent réfléchir la lumière incidente de n'importe quelle direction. En d'autres termes, un matériau PBG 3D se comporte comme un réflecteur haut omnidirectionnel. À titre d'exemple, la figure 4 illustre la structure des tas de bois 3D.

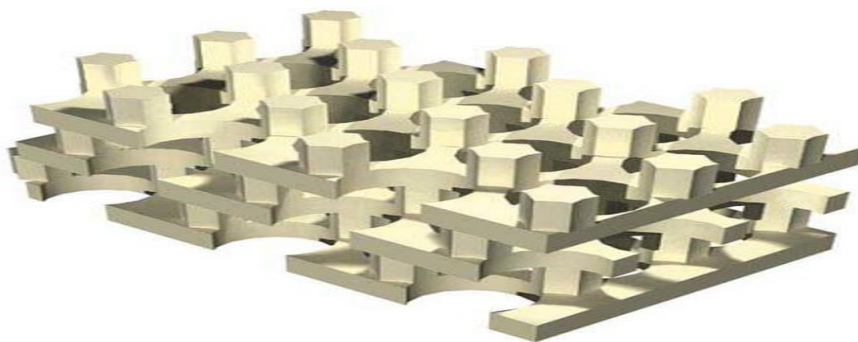


Figure I.8 : Structure des cristaux photoniques en tas de bois 3Ds [3].

I.3 Caractéristiques physiques des cristaux photoniques

Un Cristal photonique se caractérise par plusieurs paramètres :

I.3.1 Contraste d'indice Δn

Le contraste de l'indice Δn est la différence entre les indices de réfraction des matériaux, qui peuvent être comparés avec la hauteur de la barrière potentielle de la physique solide. Elle est donnée par l'équation (I.1) :

$$\Delta_n = n_h - n_l \tag{1}$$

Avec :

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

n_l : L'indice de réfraction matériau de bas indice

I.3.2 Période

La période choisie dépend de la fréquence étudiée. Ce paramètre affecte la valeur de largeur ou ouverture de la bande interdite photonique. Ainsi, pour un cristal photonique unidimensionnel, la période qui donnait par la relation $a = a_1 + a_2$

Avec :

a_1 : épaisseur de la couche de permittivité ϵ_1

a_2 : épaisseur de la couche de permittivité ϵ_2

Notée que l'indice de réfraction et la permittivité sont liés par la relation : $(n = \sqrt{\epsilon})$.



Figure I.9 : Les périodes d'un cristal photonique unidimensionnel.

I.3.3 Le facteur de remplissage f

Le facteur de remplissage en air désigne le rapport entre l'aire du motif et l'aire de la cellule élémentaire du réseau considéré [4] :

$$f = A_{\text{motif}} / A_{\text{maille élémentaire}} \tag{2}$$

I.3.4 Zone de Brillouin

Un aspect fondamental de tout code de modélisation de structure électronique utilisé par les scientifiques des matériaux est le concept de la zone Brillouin (BZ). Dans les années 1930, les scientifiques ont appliqué la mécanique quantique pour étudier les électrons dans un potentiel périodique afin de calculer diverses propriétés des matériaux. Pendant ce temps, Léon Brillouin [5] a apporté une contribution importante en formulant des régions géométriques de l'espace de moment (également appelé espace réciproque). Ces BZ fournissent un moyen de déterminer les énergies électroniques et les fonctions d'onde pour un cristal à chaque point de l'espace réciproque en ne considérant que les points à l'intérieur de la première zone.

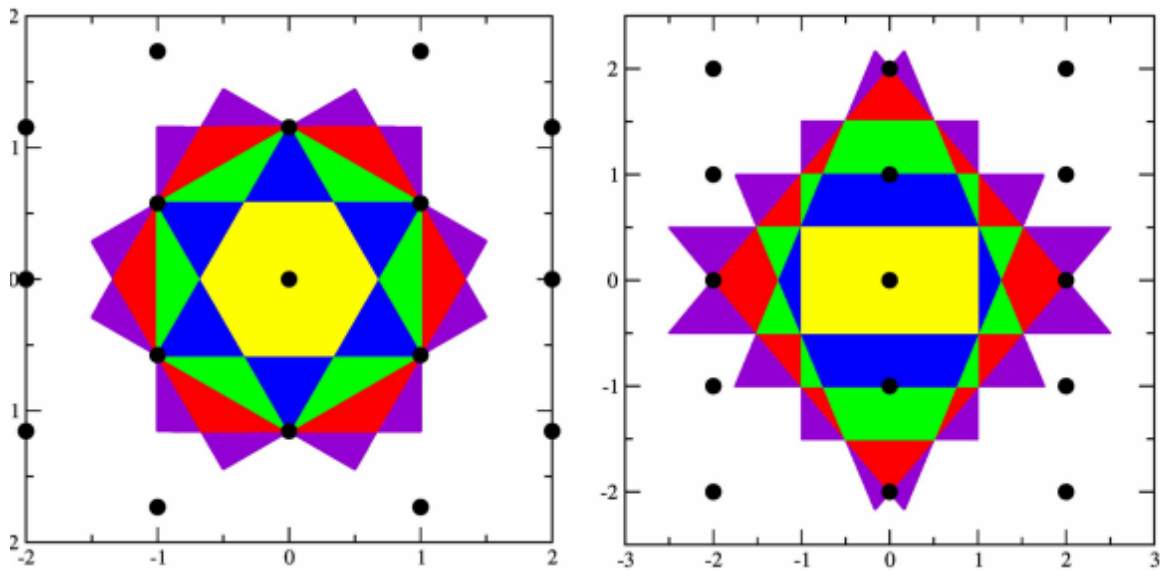


Figure I.10: Zones de Brillouin des réseaux hexagonaux et rectangulaires [5].

Selon différents types de réseaux la première zone Brillouin de chaque structure est représentée sur la figure I.11 respectivement. Les cercles rouges sur la figure représentent des colonnes diélectriques ou d'air, ils sont disposés périodiquement pour former une structure cristalline photonique complexe qui comprend une pluralité d'« atomes » de cellules uniques. La distance centrale des cylindres adjacents est la constante de période a et le rayon est r . Premièrement, en modifiant la valeur du vecteur d'onde K , toutes les valeurs-limites sont substituées dans la région triangulaire (la première zone de Brillouin) [6] formée par $-M-K$ pour obtenir les valeurs propres de la fréquence propre. Deuxièmement, le calcul de la bande d'énergie d'autres réseaux réciproques peut être simplifié par la caractéristique de symétrie de la première zone de Brillouin.

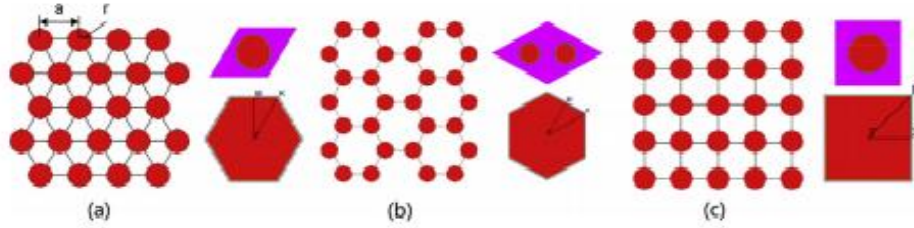


Figure I.11 : Structure, unité primitive et première zone de Brillouin pour les différents cristaux photoniques : (a) le réseau triangulaire ; (b) le réseau carré ; (c) le réseau hexagonal.

I.4 Défauts dans les cristaux photoniques

L'introduction de défauts dans la périodicité du cristal permet d'obtenir des fréquences de probation admissibles, appelées modes de défaut, dans la bande interdite photonique. Ces défauts sont obtenus en brisant localement la périodicité du cristal, autrement dit en créant une imperfection dans la structure périodique. Dans le cas des cristaux photoniques 2Ds on obtient deux types de défaut : les défauts ponctuels (cavités) et les défauts linéaires (guide d'onde). (Figure I.12).

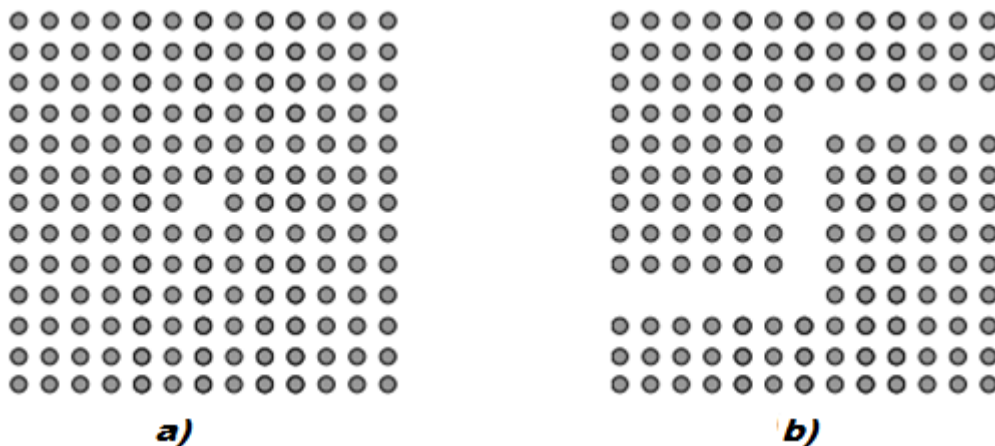


Figure. I.12: Exemples de défauts dans une structure photonique bidimensionnelle parfaite.
(a) cavité, (b) guide.

I.4.1 Défauts ponctuels

Les défauts ponctuels sont créés en modifiant les caractéristiques d'une cellule du réseau. Pour utiliser la terminologie de la physique des cristaux, il est alors possible de produire des lacunes ou des défauts de substitution figure I.13. Cela correspond à une microcavité à l'intérieur du cristal photonique. Pour les cristaux photoniques constitués de trous dans un matériau diélectrique, on peut agir sur la géométrie de ces trous [7]. Les modes

électromagnétiques introduits par le défaut sont appelés modes de défaut. La transmission de ces modes a été étudiée par Joanopoulos et al, qui a montré théoriquement que les propriétés des modes de défaut peuvent être contrôlées en modifiant la taille et le type des défauts [8].

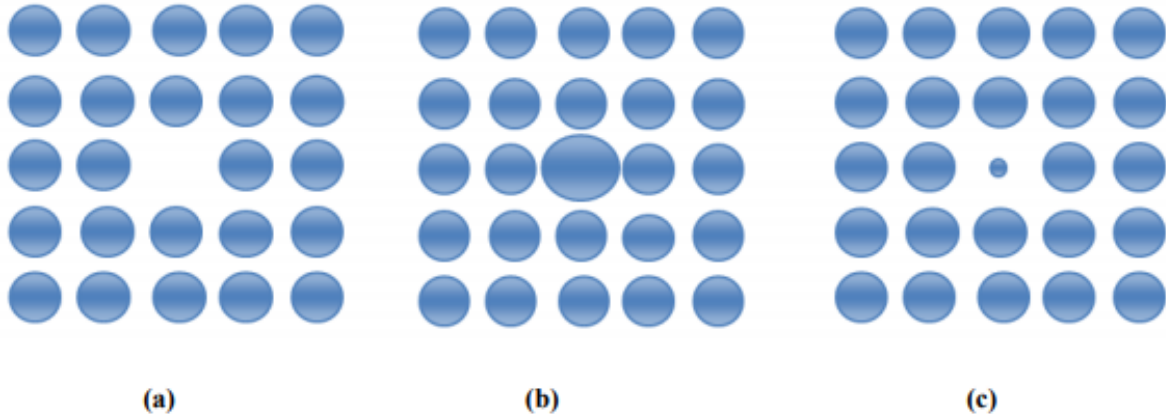


Figure I.13 : (a) Défaut lacunaire, (b) et (c) Défauts de substitutions [8]

I.4.2 Défauts linéiques (étendus)

Parmi les défauts étendus de dimension 1,2 ou 3, il existe les défauts 1Ds appelés couramment (W1). La figure I.14 montre un défaut linéaire W1 dans un cristal photonique 2D réel. Une façon de réaliser un tel guide consisté à omettre une ou plusieurs lignes de trous [9].

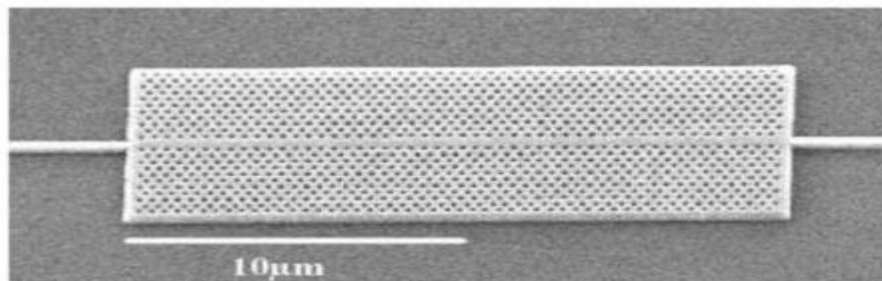


Figure I.14: Exemple de guide W1 à Cristal photonique hexagonal de trous d'air sur un substrat de silicium sur isolant [9].

I.5 La théorie d'étude des cristaux photoniques

La théorie des cristaux photoniques est basée sur la similarité entre un photon se propageant dans un cristal photonique et un électron dans un semi-conducteur. En effet, l'équation de Schrödinger régissant le mouvement des électrons dans un matériau caractérisé par un potentiel périodique est analogue à l'équation de propagation, dérivée des équations de Maxwell, utilisées pour décrire la propagation d'une onde électromagnétique dans un matériau caractérisé par son constant diélectrique périodique. Avant de montrer les similitudes entre ces deux ensembles d'équations, commençons par écrire les équations de Maxwell qui régissent le

comportement des ondes électromagnétiques. Dans le cas d'un milieu diélectrique, linéaire, isotrope, non magnétique et en l'absence des charges et des courants, les équations de Maxwell sont exprimées comme suit [10] :

$$\nabla \cdot (\epsilon(\mathbf{r}) \vec{E}(\vec{r}, t)) = 0 \quad (3.1)$$

$$\nabla \cdot (\vec{r}, t) = 0 \quad (3.2)$$

$$\nabla \times \vec{E}(\vec{r}, t) = \mu_0 \partial \vec{H}(\vec{r}, t) \partial t \quad (3.3)$$

$$\nabla \times \vec{H}(\vec{r}, t) = \epsilon_0 \epsilon(\vec{r}) \partial \vec{E}(\vec{r}, t) \partial t \quad (3.4)$$

Où \vec{E} et \vec{H} désignent, respectivement, les champs électriques et magnétiques.

$\epsilon(\mathbf{r})$ Est la permittivité relative appelée aussi la constante diélectrique.

ϵ_0 et μ_0 représentent la permittivité diélectrique et la perméabilité magnétique du vide, \vec{r} et t représentant les dépendances spatiales et temporelles, respectivement.

L'équation de Schrödinger en régime stationnaire pour la fonction d'onde ψ d'un électron dans un potentiel V s'écrit sous la forme suivante [11] :

$$\nabla^2 \psi(\mathbf{r}) = -2m/\eta^2 (\vec{E} - (\vec{r})) \psi(\mathbf{r}) \quad (3.5)$$

Avec :

E est l'énergie de l'électron, m est sa masse et η a constante de Planck réduite.

I.6 Diagramme de bande

La relation de dispersion des cristaux photoniques bidimensionnels dépendant de la polarisation de la lumière. Dans ces structures, il existe deux types de propagations : dans le plan (dans le plan $K_y = 0$) et hors plan (hors plan $K_y \neq 0$), y et K_y sont respectivement l'axe parallèle aux cylindres et la constante de propagation le long de cet axe figure I.15.

Dans la propagation dans le plan, la résolution des équations de Maxwell renvoie deux des magnétiques et dans l'et le champ électrique est perpendiculaire au plan de propagation, et le mode de polarisation magnétique transverse TM où le champ électrique se trouve dans le plan la propagation et le champ magnétique est perpendiculaire sur le plan de propagation.

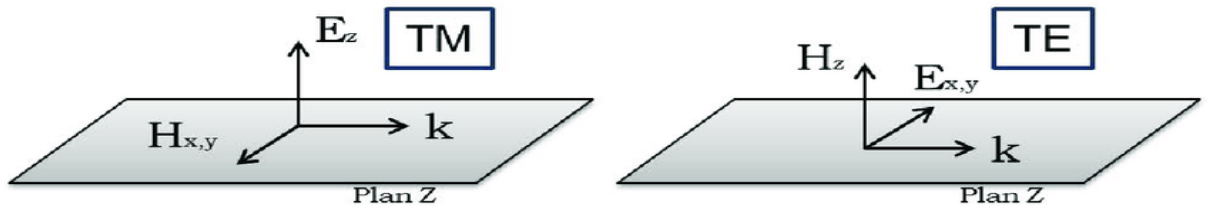


Figure I.15 : Représentation des polarisations TE et TM pour les cristaux photoniques bidimensionnels constitués de trous selon l'axe z.

Donc les ondes électromagnétiques se propagent dans le plan perpendiculaire aux tiges et peuvent être séparées en deux polarisations TE ou TM. Les bandes interdites qui apparaissent dans chaque cas doivent se superposer pour former une bande interdite totale. Elle empêche ainsi la propagation de l'onde incidente quelle que soit sa polarisation. Nous présentons sur la figure I.16, exemple d'un diagramme de bande d'un cristal photonique 2D à maille triangulaire en polarisation TE et TM.

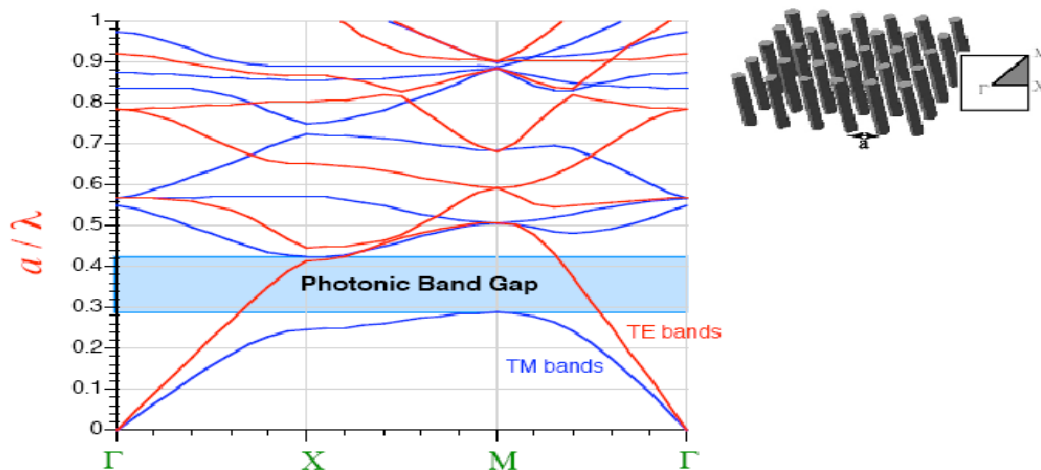


Figure I.16 : diagramme de bande d'un cristal photonique 2D à maille triangulaire en polarisation TE et TM.

I.7 La carte de bande [12]

Le calcul du diagramme de bande vu précédemment nous renseigne, entre autres, sur les propriétés (la position et la largeur) des bandes interdites photoniques pour chaque polarisation.

Une analyse et une comparaison des données de fréquence balayée permettent de répertorier les principaux paramètres de la structure présentant une bande interdite relativement large dans l'histogramme de la figure I.17, dans les conditions de cycle d'utilisation appropriées.

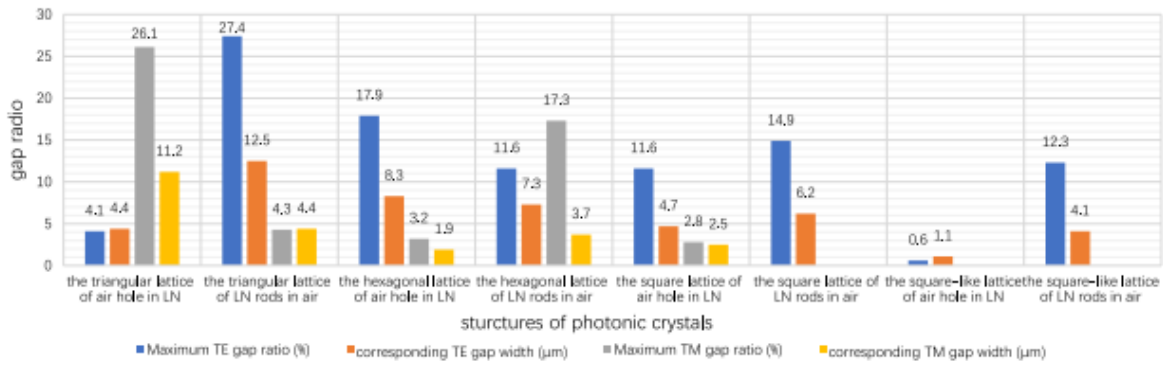


Figure I.17: Analyse des données de la bande interdite concernant le rapport et la largeur maximum de cette bande.

Cependant, deux paramètres peuvent encore être ajustés afin de jouer sur celles-ci : l'indice de la matrice et le facteur de remplissage en air (ou le rapport r/a). Pour un matériau donné (donc pour un indice de la matrice donné), il est intéressant de connaître l'influence du facteur r/a sur la position et la largeur des gaps photoniques : c'est la carte des bandes interdites.

Un exemple est donné figure I.18. Dans le cas d'une structure de la colonne diélectrique ($a = 697 \text{ nm}$ et $r/a = 0.228$) À une bande interdite photonique TE complète (PBG) de 1285 nm à 1768 nm, tandis que la structure de la colonne des trous d'air ($a = 628 \text{ nm}$ et $r/a = 0.351$) A un PBG TM complet de 1372 à 1807 nm.

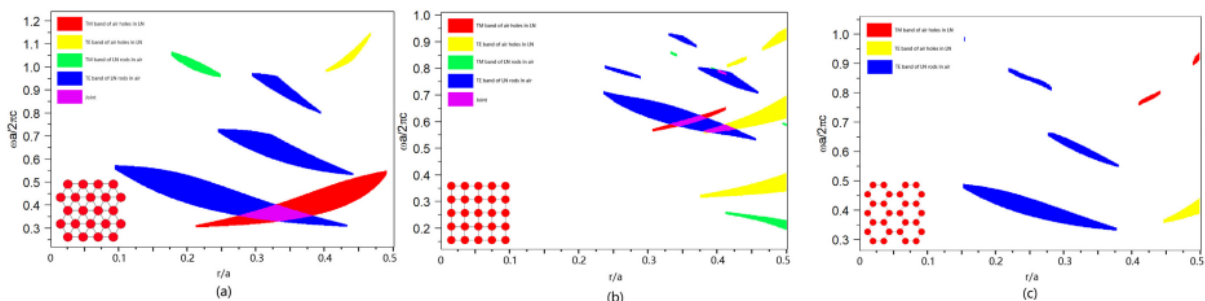


Figure I.18: Carte de bande interdite pour les différentes structures cristallines photoniques (a) le réseau triangulaire; (b) le réseau carré ;(c) réseau hexagonal.

I.8 Application sur les cristaux photoniques

Depuis 1998, les composants optiques basés sur les 2 DPC tels que les guides d'ondes, les capteurs [13,14], les coupleurs directionnels [15], filtres optiques [16,17], les multiplexeurs [18], les démultiplexeurs [19], les commutateurs [20], les diviseurs de puissance [21], etc., sont conçus pour des applications commerciales.

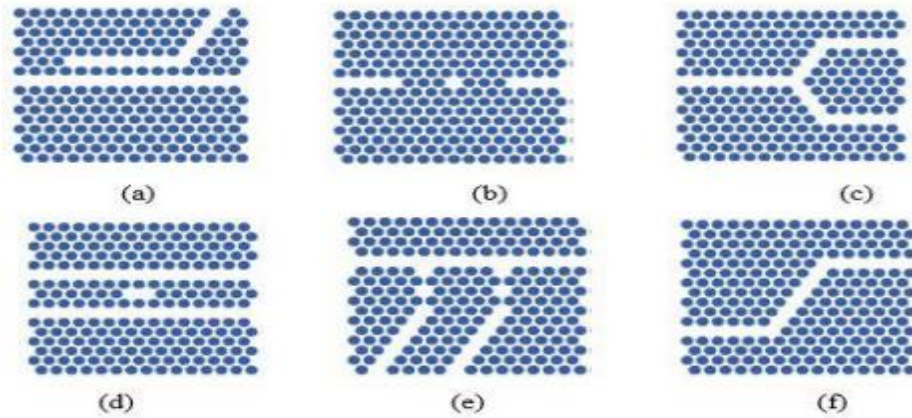


Figure I.19 : Dispositifs à base de cristaux photoniques 2-D. (a) Coupleur directionnel ; (b) Biocapteur ; (c) Diviseur de puissance ; (d) Filtre ; (e) Démultiplexeur ; (f) Double virage.

I.8.1 Guide d’onde

Plusieurs types de guides peuvent être définis en fonction de la direction dans l'espace réel des cristaux photoniques dans lequel ils sont inscrits. Prenons le cas de notre structure, il consiste en une rangée manquante dans un cristal photonique triangulaire de période du cristal, c'est-à-dire la distance entre deux trous plus proches voisins. Les deux directions privilégiées sont TK et TM. Figure I.20.

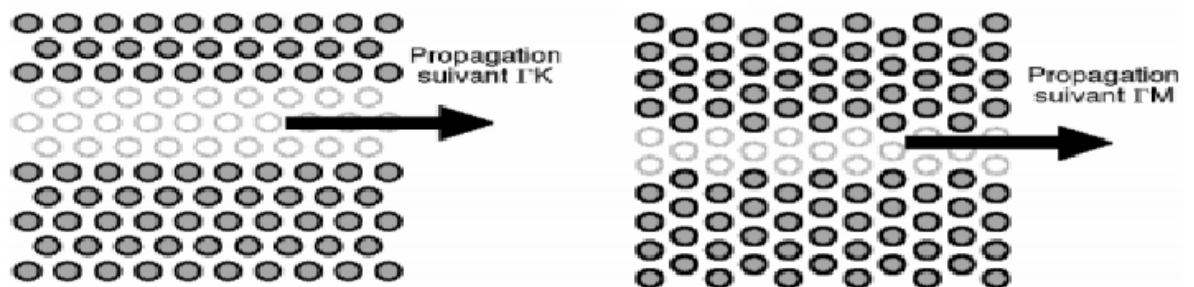


Figure I.20: Schéma de guide W5 créée dans un réseau triangulaire de trous d’air suivant les deux directions cristallographiques TK et TM.

I.8.2 Capteurs et biocapteurs :

I.8.2.a Capteur :

Un capteur est un dispositif qui transforme une grandeur physique observée en une grandeur utilisable, tel qu'une tension électrique, une fréquence, une hauteur de mercure, une intensité ou la déviation d'une aiguille. Il existe un certain nombre de types de capteurs:

- Capteur d'indice de réfraction (RI) à base de cristaux photoniques (RI-bases PhCsensors);
- Capteurs optomécaniques à base de cristaux photoniques;
- Capteurs à cristaux photoniques intégrés basés sur un effet non linéaire;
- Capteurs à base de cristaux photoniques à fibres optiques;
-Etc.

En 2003, Cunningham et al proposaient leurs premiers capteurs de CP de polymère 1D [22].

La structure du capteur et un cristal photonique 2D avec un réseau triangulaire de trous d'air de rayon $r = 111\text{ nm}$ et de périodicité $a = 390\text{ nm}$. À l'entrée et à la sortie du guide d'ondes CP, le couplage de la lumière est assuré par une guide d'ondes monomode de 500 nm de large [23] comme le montre la figure I.21.

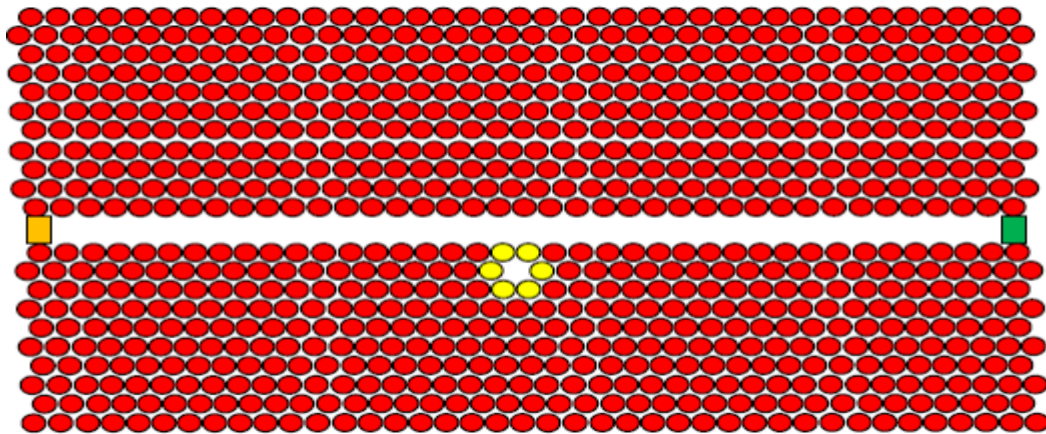


Figure I.21: Structure du capteur de pression [24].

I.8.2.b Biocapteurs :

Un biocapteur est un outil analytique composé d'un élément biologique appelé bio récepteur lié à un transducteur. Le bio récepteur reconnaît spécifiquement une molécule du Milieu et l'information biologique qui en résulte sont convertis par le transducteur en un signal analytiquement utile.

Au cours de l'année 2007, Lee et Fauchet ont présenté pour la première fois un biocapteur CP à base de silicium capable de contrôler l'adsorption des protéines sur les parois des trous de la cavité figure I.22.

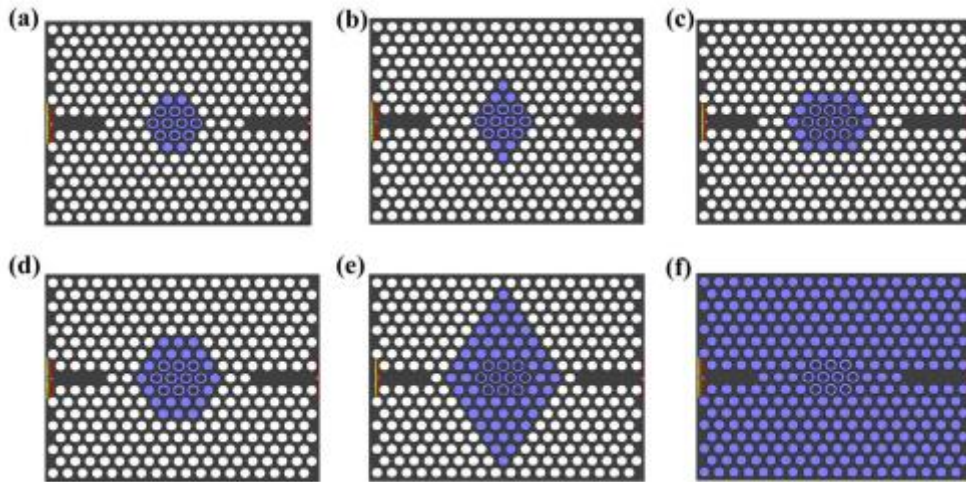


Figure I.22:Diagramme schématique de la structure du biocapteur indiquant le nombre de trous fonctionnalisés autour de la cavité résonante; (a) 4 trous fonctionnalisés, (b) 6 trous fonctionnalisés, (c) 14 trous fonctionnalisés, (d) 20 trous fonctionnalisés, (e) 54 trous fonctionnalisés, (f) tous les trous d'air sont utilisés comme trous fonctionnalisés. [25]

I.8.3 Coupleur directionnel:

Le coupleur directionnel est un dispositif composé de deux guides d'ondes monomodes parallèles. Il a quatre ports dont le premier sert d'entrée et les trois autres de sortie. Le coupleur directionnel est constitué de deux guides monomodes séparés par une distance suffisamment courte. Lorsque deux guides sont placés côte à côte, les guides ne se comportent.

Plus comme deux guides monomodes indépendants, mais plutôt comme un seul guidant multi mode plus large comprenant deux modes guidés, comme le montre la figure I.23.

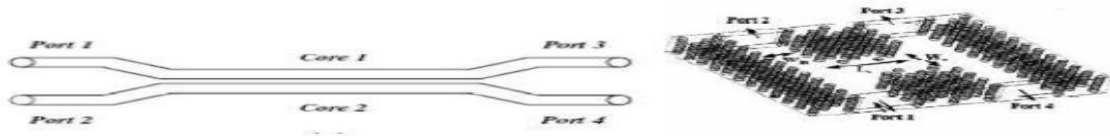


Figure I.23: Schéma d'un coupleur optique directionnel.

I.8.4 Filtres et multiplexeurs

Une fonction particulièrement importante d'optique intégrée pourrait faire avec des cristaux photoniques : le multiplexage en longueur d'onde (WDM, Wavelength division Multiplexing). L'intérêt est d'implanter ou d'extraire des longueurs d'onde bien précises dans

un flux de données. Ce mécanisme peut être matérialisé 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 [26]. Depuis, plusieurs préparations ont indiqué la possibilité du couplage d'une cavité avec un guide [27, 28, 29]. Par exemple, une réalisation de Chutinan et al. [29]. Par exemple, la figure 1.24 permet l'extraction hors du plan ou l'insertion dans un guide d'une longueur d'onde précise (WDM monocanal). 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 [30]. Ce type de dispositif est appelé un filtre « Add-Drop ».

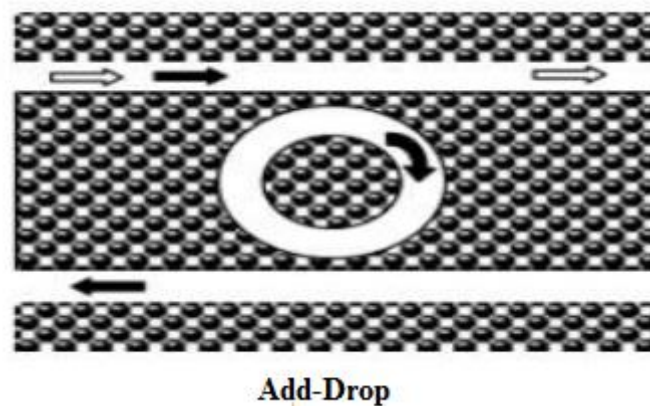


Figure I.24: Représentation d'un filtre add / drop.

Cette fonction peut aussi être réalisée dans le plan en utilisant deux guides comme l'illustre la Figure I.23 [31]. 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 [32]. De plus, la taille du défaut (de la cavité résonante) doit être très bien contrôlée afin de sélectionner les longueurs d'onde désirées.

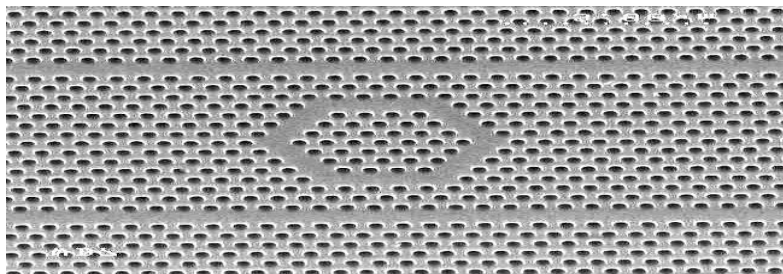


Figure I.25: Exemple de filtre Add-Drop réalisé sur un substrat SOI. Les longueurs d'onde résonnantes de l'anneau peuvent éventuellement se coupler d'un guide à l'autre [31].

I.8.5 Démultiplexeur

Un démultiplexeur en cristaux photonique est un couplage entre le guide d'onde et la cavité photonique.

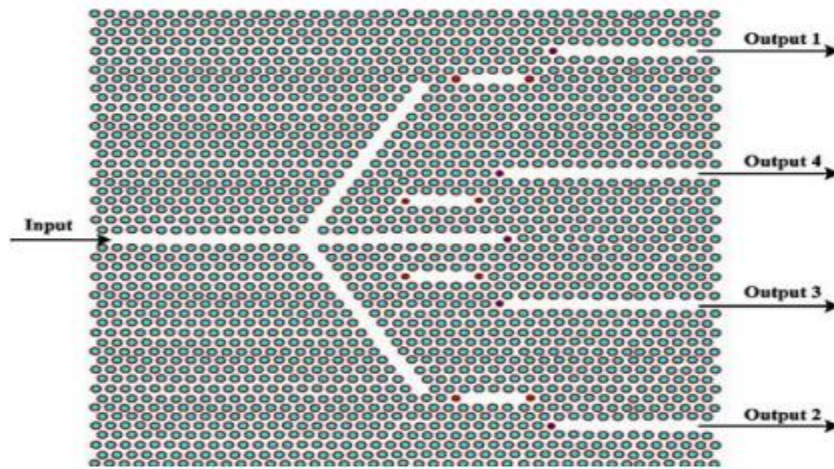


Figure I.26 : schéma d'un démultiplexeur a cristaux photoniques [33].

Comme le montre la figure I.26 du plan Oxyz, le démultiplexeur se compose de trois blocs, dont le premier est le démultiplexeur à large bande situé au milieu du circuit avec une constante de réseau de $a = 0.53\mu\text{m}$ avec un guide d'onde d'entrée résultant en deux guides d'onde de sortie dont celui de droite est couplé au bus principal du premier bloc autour de $\lambda = 1.55\mu\text{m}$ de la même constante de réseau, 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 pose un problème, mais il est modifié par la centralisation mutuelle des deux guides d'ondes autour du même axe, alors que les deux blocs sont espacés par le réseau $a = 0.53\mu\text{m}$.

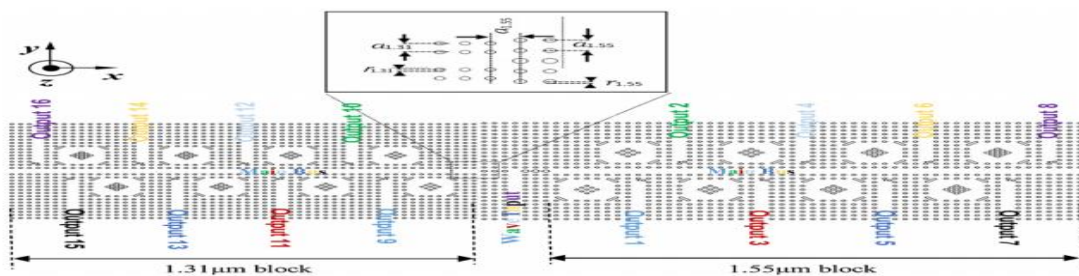


Figure I.27 : Ledémultiplexeur multi canal à double bande. [34]

I.8.6 Les diviseurs

Les diviseurs à cristaux photoniques permettent de séparer et de distribuer la lumière de façon simultanée dans les différentes parties du circuit optique :

- ❖ Diviseur en jonction Y : il comporte une partie de jonction Y et deux ou quatre guides de sortie, ce type a l'avantage d'offrir une réponse spectrale plate pour un intervalle de longueur d'onde très large.
- ❖ Diviseur de type à jonction en T : il comporte un guide d'onde d'entrée juxtaposé à une portion de guide plus large et multi mode, qui se propage avec une vitesse de phase différente, ce type présente l'avantage de présenter des pertes plus faibles de l'ordre de 1 à 2 dB pour les diviseurs de 1 à 23 à 1 à 8.

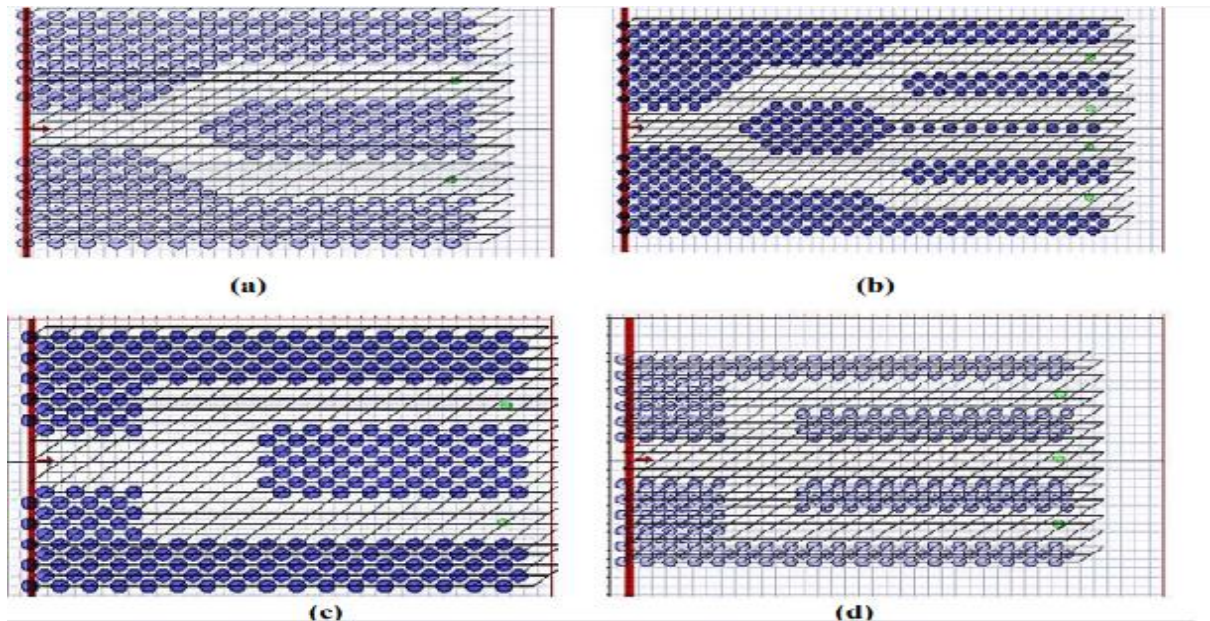


Figure I. 28: Structure d'un diviseur : (a) 1×2 avec une jonction Y, (b) 1×4 avec une jonction Y, (c) 1×2 avec une jonction T, (d) 1×3 avec une jonction T [35].

I.9 Conclusion

À l'issue de ce premier chapitre, nous avons présenté les notions de base associées aux cristaux photoniques. En premier lieu nous avons énuméré les différents types de cristaux photoniques, ensuite nous avons cité leurs propriétés physiques et Géométriques. Nous avons présenté également le principe d'ouverture de bandes interdites photoniques et la zone de Brillouin ainsi les principes de défauts qui existent au niveau d'un cristal. Nous avons terminé ce chapitre par les différentes applications optiques qui peuvent en découler de ces matériaux.

I.10 Référence:

[1]Galusha, J.W.; Richey, L.R.; Gardner, J.S.; Cha, J.N.; Bartl, M.H. Discovery of a diamond-based photonic crystal structure in beetle scales. *Phys. Rev. E* 2008, *77*, 2–5.

[2]Biró, L.P.; Kertész, K.; Vértesy, Z.; Márk, G.I.; Bálint, Z.; Lousse, V.; Vigneron, J.P. Living photonic crystals: Butterfly scales—Nanostructure and optical properties. *Mater. Sci. Eng. C* 2007, *27*, 941–946. [CrossRef]

[3] Submitted: May 17th 2012 Reviewed: October 19th 2012 Published: February 13th 201

[4]D. Felbacq, E. Centeno, Theory of diffraction for 2D photonic crystals with a boundary, *J. Optics Communications*, vol. 199, pp. 39–45, 2001

[5] Brillouin L 1930 J. Phys. Radium 1 377.

[6] [22] A.D. Suprun, L.V. Shmeleva, General dynamic properties of conduction electron within the first Brillouin zone of graphene, Eur. Phys. J. Plus 134 (1) (2019) 43, <https://kopernio.com/viewer?doi=10.1140/epjp/i2019-12520-7&route=6>

[7] S. Massaoudi, « Etude théorique et expérimentale des matériaux à bandes interdites photoniques bidimensionnels (bip 2d) en micro-ondes : application à l'ultra réfraction », Thèse de doctorat, Université de paris xi, 2005.

[8] Jean-michelLourtioz, « Cristaux photoniques et gaps de photons propriétés et applications », Techniques de l'ingénieur. Sciences fondamentales, Vol. AFP2, n° AF3711, 2004..

[9] : Azzedine Boudrio, Optique intégrée théorie et applications, Hermes sciences

[10] J.D. Joannopoulos, R.D. Meade, J.N. Winn, Photonic crystals molding the flow of light, Princeton University Press, Princeton, (2008).

[11] OlyaeSandDehghaniA. A2012High resolution and wide dynamic range pressure sensor based on two-dimensional photonic crystal”, Photonic Sensors, 219296

[12] Chongyu Shi a , Jun Yuan b , XinLuo a , Shuxin Shi a , Shan Lu a , Pengfei Yuan a , WeidongXu a , Zeng Chen a , Hua Yu a,*15 April 2020, 125222.

[13] Abdel Malek F (2011Design of a novel left-handed photonic crystal sensor operating in aqueous environment”, IEEE Photonics Technology Letters, 233188190

[14] OlyaeSandDehghaniA. A2012High resolution and wide dynamic range pressure sensor based on two-dimensional photonic crystal”, Photonic Sensors, 219296

[15] MoghaddamM. KAttariA. Rand MirsalehiM. M2010Improved photonic crystal directional coupler with short length”, Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications, 814753

[16] MaZand OgusuK2011Channel drop filters using photonic crystal fabry-perot resonators”, Optics Communications, 284511921196

[17] MohmoudM. YBassouZ.MTaalbiAandChekrounZ. M2012Optical channel drop filters based on photonic crystal ring resonators”, Optics Communications, 2851368372

[18]MohmoudM.YBassouZ.MTaalbiAandChekrounZ. M2012Optical channel drop filters based on photonic crystal ring resonators”, Optics CoRawalSandSinhaR. K2009Design,

analysis and optimization of silicon-on-insulator photonic crystal dual band wavelength demultiplexer”, Optics Communications, 2821938893894mmunications, 2851368372

[19] BenistyHCambournacCLaereF. VandThourhoutD. V2010Photonic crystal demultiplexer with improved crosstalk by second-order cavity filtering”, Journal of Lightwave Technology, 28812011208

[20] WangQCuiYZhangHYanCand ZhangL2010The position independence of heterostructure coupled waveguides in photonic-crystal switch”, Optik Optics, 1218684688

[21] GannatG. APintoDandObayyaS.S. A2009New configuration for optical waveguide power splitters”, IET Optoelectroncis, 32105111.

[22] B.T. Cunningham, B. Lin, J. Qiu, P. Li, J. Pepper, and B. Hugh. « A plastic colorimetric resonant optical biosensor for multiparallel detection of label-free biochemical interactions », Sens. Act.B., 85(3), pp 219–226, 2002.

[23] N .BOUZIDI « Etude et conception d’un capteur d’indice de réfraction (RI) à base de cristaux photoniques bidimensionnels à usage multiple», mémoire de master Université MOHAMED BOUDIAF - M’SILA 2016.

[24] T. Zouache, A. Hocini, A. Harhouz, and R. Mokhtari, «Design of Pressure Sensor Based on Two-Dimensional Photonic Crystal», Special Issue of the 6th International Congress& Exhibition (APMAS2016), Maslak, Istanbul, Turkey, Ju ne 1– 3, 2016.

[25] SafiaArafaa,* , Mohamed Bouchemata , TourayaBouchemata , AhlemBenmerkhia , AbdesselamHocinibSafiaArafaa,* , Mohamed Bouchemata , TourayaBouchemata , AhlemBenmerkhia , Abdesselam Hocinib,1 February 2017.

[26] S. Fan, P. R. Villeneuve, J. D. Joannopoulos et H. A. Haus, Channel drop filters in photoniccrystals, Optics Express 3, p. 4 (1998).

[27] C. J. M. Smith, R. M. De La Rue, M. Rattier, S. Olivier, H. Benisty, C. Weisbuch, T. F. Krauss, R. Houdréet U. Oesterle, Coupled guide and cavity in a two-dimensional photonic crystal, Applied Physics Letters 78, p. 1487 (2001).

[28] C. Seassal, Y. Desières, X. Letartre, C. Grillet, P. Rojo-Romeo, P. Viktorovitch et T. Benyattou, Optical coupling between a two-dimensional photonic crystal-based microcavity and a single-line defect waveguide on InP membranes, IEEE Journal of Quantum Electronics 38, p. 811 (2002).

- [29] A. Chutinan, M. Masamitsu, M. Imada et S. Noda, Surface-emitting channel drop filters using single defects in two-dimensional photonic crystal slabs, *Applied Physics Letters* 79, p. 2690 (2001).
- [30] S. Noda, A. Chutinan et M. Imada, Trapping and emission of photons by a single defect in a photonic bandgap structure, *Nature* 407, p. 608 (2000).
- [31] T. Charvolin, E. Hadji, E. Picard, M. Zelsmann, M. Assous, B. Dal'Zotto, M. E. Nier, S. Tedesco, X. Letartre, P. Rojo-Romé et C. Seassal, Realization of two-dimensional optical devices using photonic band gap structures on silicon-on-insulator, *Microelectronic Engineering* 61, p. 545 (2002)
- [32] S. Fan, P. R. Villeneuve, J. D. Joannopoulos et H. A. Haus, Channel drop filters in photonic crystals, *Optics Express* 3, p. 4 (1998).
- [33] A. Rostami*, H. AlipourBanaei, F. Nazari, A. Bahrami, An ultra compact photonic.
- [34] A Mounzar, H Badaoui, M Abri, '16-Channels Wavelength Efficient Demultiplexing around 1.31/1.55 μm in 2D Photonic Crystal Slab', 2019.
- [35] S.BRAHIMI, H.HAMMOUDI , « Conception de diviseur de faisceau à base des cristaux photoniques bidimensionnels » ,mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf - M'sila ,2016/2017

Chapitre 2 :
Diviseur à base de résonateur
en cristaux photoniques 2D

II Introduction

Comme nous le savons, les diviseurs de puissance sont des éléments-clés des dispositifs et systèmes photoniques multifonctionnels. Il existe principalement trois approches différentes pour diviser de manière égale ou répartir la puissance d'un signal entrant sur certains ports de sortie, au moyen d'un coupleur directionnel, en utilisant une jonction en Y ou en T et en se basant sur un résonateur en anneau de PC. La structure de base du séparateur est divisée en deux parties, un port d'entrée et un port de sortie. Dans l'idéal, la puissance d'entrée est divisée de manière égale entre les ports de sortie sans aucune réflexion ni perte de rayonnement significative. À notre connaissance, le diviseur de puissance le plus simple est la structure à jonction en Y [1].

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté les résonateurs et les guides à cristaux photons. Puis nous nous intéresserons au couplage entre eux (couplage des guides à cavité), finalement nous avons étudié les diviseurs à cristaux photoniques et leurs types.

II.1 Les résonateurs à cristaux photoniques

Il existe des cavités résonantes qui sont des versions entièrement fermées de résonateurs distribués et qui peuvent avoir des modes en deux ou trois dimensions, on trouve plusieurs types de cavités résonantes dans les cristaux photoniques, selon la forme du réseau (triangulaire ou carrée), ou le nombre de défauts (omission d'une ou plusieurs tiges), ces cavités sont généralement de deux types : le type Hn et le type Ln .

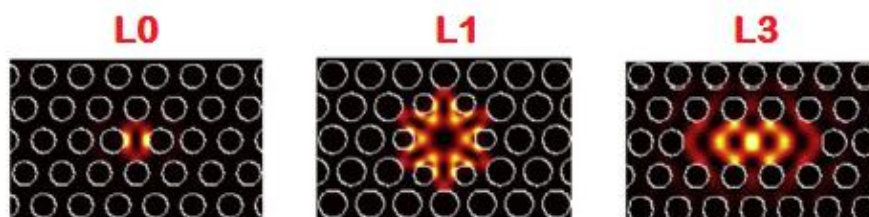


Figure II.1: Exemples de cavités du type Ln . [2]

II.1.1 Résonateur hexagonal

La cavité du type Hn est une cavité hexagonale dont chaque côté présente une omission de n trous.

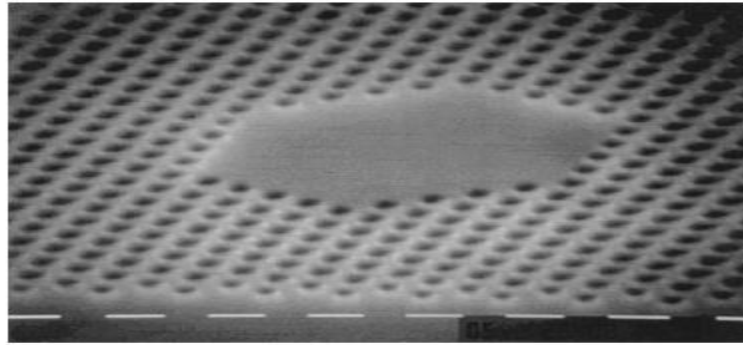


Figure II.2 : Exemple de cavité hexagonale dans un cristal photonique [3]

La cavité du type H1 (pas de trous manquants, seuls deux trous décalés) et celle du type H2 (sept trous manquants) etc.

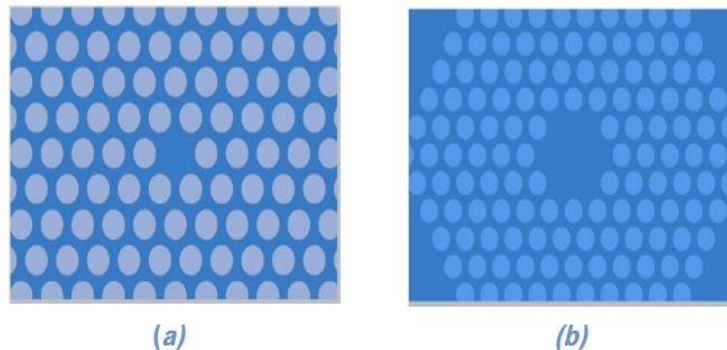


Figure II.3:Exemples de cavités du types H_n : (a) cavité H1, (b) cavité H2.

II.1.2 Résonateur carré

Dans un réseau bidimensionnel carré, les cavités résonantes sont du type S_n , ayant la forme d'un carré, n représentant le nombre de lignes et de rangées manquantes dans le carré. Par exemple, la cavité S1 est formée en omettant une ligne et une rangée.

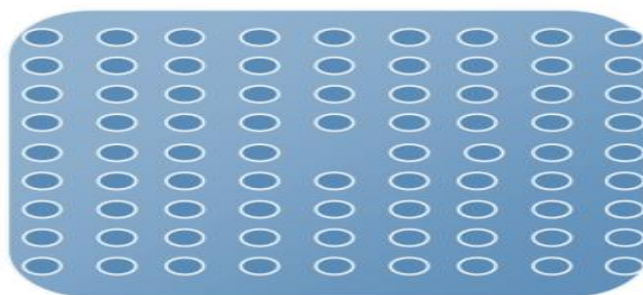


Figure II.4 : cavité résonante carré. [4]

II.1.3 Résonateur triangulaire

La figure II.5 présente un autre type de cavité résonante dans un cristal photonique bidimensionnel. Cette cavité est créée en supprimant les atomes qui se trouvent sur la ligne dans les principales directions du réseau tel que les directions ΓK ou ΓM pour le réseau

triangulaire. La figure II.5 (a) montre la cavité L2 : deux atomes adjacents le long de la direction ΓK sont retirés du réseau. La cavité L3 (trois atomes enlevés) est représentée sur la figure II.5 (b) [5, 6].

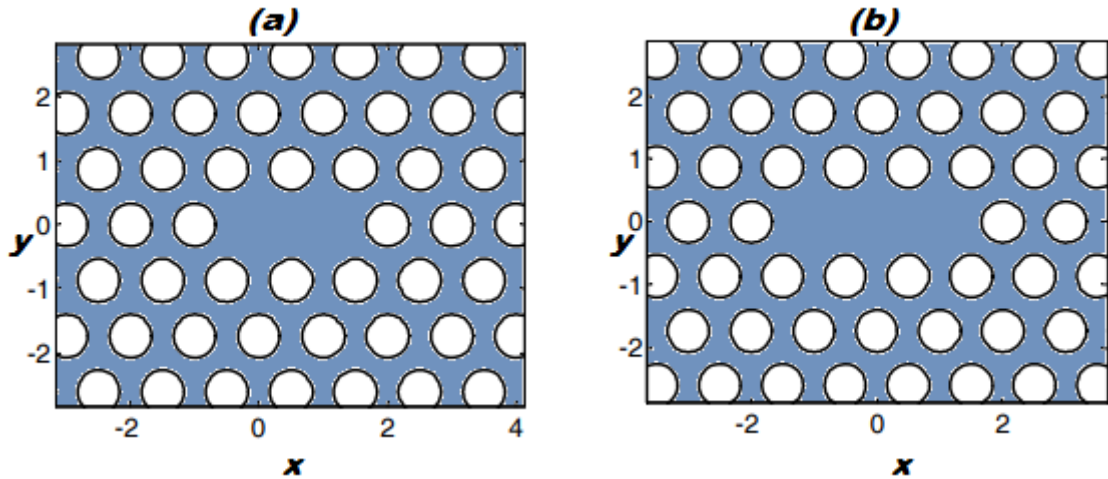


Figure II.5 : Cavités résonantes dans des cristaux photoniques à réseau triangulaire. a) Cavité L1. b) Cavité L3.

II.1.4 Résonateur rectangulaire

La figure II.6 représente un exemple d'une cavité résonante rectangulaire correspondant à CP.

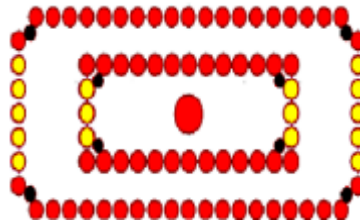


Figure II.6 : structure d'un résonateur à Cristal photonique rectangulaire emboîté. [7]

II.2 Guidage d'ondes dans les cristaux photoniques

La première idée des guides d'ondes est apparue en 1994 sous l'impulsion de Joannopoulos, Meade et al, mais les premières réalisations ont été effectuées cinq à six ans plus tard [8]. L'introduction de défauts de ligne dans un cristal photonique aussi parfait forme un guide d'onde à Cristal photonique. Comparé au guide d'ondes diélectrique classique, le guide d'ondes à Cristal photonique utilise une bande interdite photonique pour guider la lumière, de sorte qu'il peut théoriquement réaliser une transmission à haute efficacité avec une flexion d'angle arbitraire. Un guide d'onde à Cristal photonique (PCW) peut être obtenu en introduisant un défaut de ligne dans un PC. Le guidage a lieu le long d'un défaut de ligne car la lumière ne peut pas s'échapper latéralement à travers le matériau en raison de la bande interdite photonique.

En effet, il existe une grande variété de guides de cristaux photoniques. Concernant leur structure géométrique, nous pouvons classer ces guides en deux grandes catégories figure II.7 :

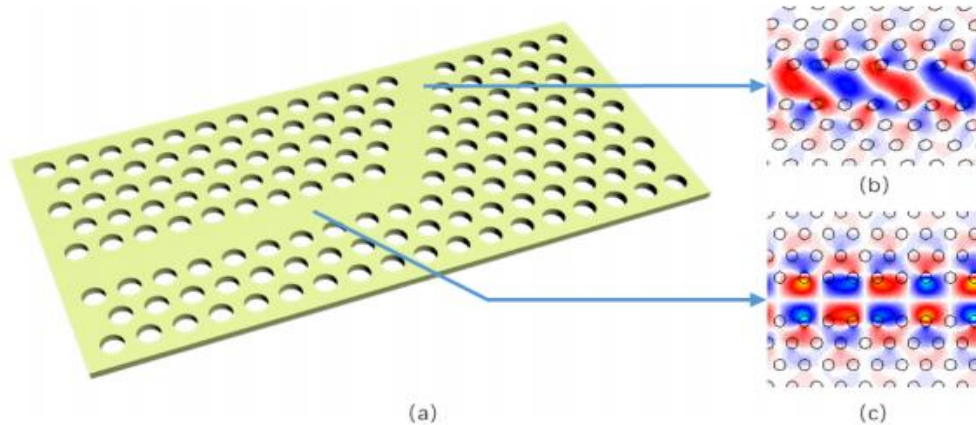


Figure II.7 :a) Structure de guide d'ondes à Cristal photonique; (b) les différents modes de transmission du guide d'onde droit; (c) les différents modes de transmission du guide d'onde courbe. [9]

II.2.1 Guide à Cristal photonique

Les guides à cristaux photoniques sont obtenus en créant un défaut linéique dans le cristal. Le guide d'onde agit comme un élément important du circuit intégré photonique (PIC). Habituellement, les guides d'ondes diélectriques ont des dimensions relativement importantes. La raison en est que lorsque les guides d'ondes diélectriques sont utilisés comme interconnexions entre les composants optiques dans les PIC, ils nécessitent un grand rayon de courbure pour éviter de subir une perte de flexion importante. Les guides d'ondes à base de cristal photonique (PC), différents des guides d'ondes diélectriques, offrent un confinement puissant et un contrôle flexible des ondes lumineuses. L'une des applications les plus remarquables des guides d'ondes PC est de transmettre des ondes lumineuses à travers un virage serré avec une faible perte de courbure. Par conséquent, les guides d'ondes PC ont suscité un grand intérêt dans la conception et la fabrication de guides d'ondes avec des coudes. [10]. Des guides d'ondes classiques à base de matériaux diélectriques sont réalisés depuis longtemps. L'onde se propage dans le diélectrique d'indice fort et se réfléchit totalement sur les bords qui sont constitués d'un diélectrique d'indice plus faible figure II.8(a). L'intérêt des guides d'ondes BIP par rapport à ceux traditionnels c'est qu'ils présentent de faibles pertes au niveau des courbures figure II.8(b). Le fait de recourber l'un de ces guides sur lui-même permet d'obtenir un anneau et seuls quelques modes peuvent rester dans cet anneau.



Figure II.8 : (a) guidage par bande interdite photonique, (b) Guide d'onde à courbures extrêmes.

II.2.2 Différents types des guides d'ondes

Il est possible de réaliser des guides d'ondes simples ou complexes à partir d'un cristal photonique 2D en supprimant ou en modifiant une seule rangée d'inclusions cylindriques selon la direction de propagation. Concernant leur structure géométrique, nous pouvons classer ces guides en deux classes principales :

II.2.2.a Guide d'onde linéique

Les guides à cristaux photoniques sont obtenus en créant un défaut linéique dans le cristal. La lumière ne pouvant pénétrer au sein du Cristal photonique, elle est contrainte de se propager le long du défaut, des modes ayant une fréquence appartenant à la bande interdite photonique peuvent exister.

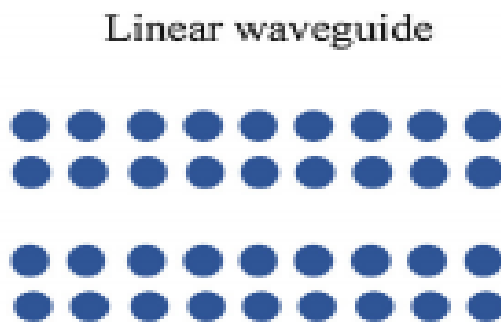


Figure II.9: Guide d'onde linéaire. [11]

II.2.2.b Guide d'onde courbée

Les guides courbes constituent également un domaine d'application privilégié pour les cristaux photoniques car ils permettent théoriquement de réaliser des tours avec des rayons de courbure de l'ordre de la longueur d'onde. Dans le guide courbe, il y a des problèmes de réflexion et des pertes subsistent, ces courbes peuvent être réalisées simplement en ne gravant pas de trous dans les directions de symétrie du cristal (courbe de 60° et 120°) la figure II.10 montre les schémas de guides d'ondes de cristaux photoniques définis dans un réseau triangulaire et contenant deux courbes de 60° consécutives. La distance entre les coudes a été choisie arbitrairement, mais suffisamment longue pour obtenir un comportement en régime permanent du mode bandes interdites photoniques dans la section du guide d'onde séparant les coudes, de sorte que ces coudes peuvent être traités comme des composants séparés. L'image de gauche illustre un guide d'onde du cristal photonique avec deux coudes simples à 60° . Ces courbes génériques forment de graves discontinuités dans le guide d'onde du cristal photonique et introduisent de grandes réflexions et excitent des modes d'ordre supérieur, qui ne sont pas nécessairement guidés dans le guide d'onde du cristal photonique.

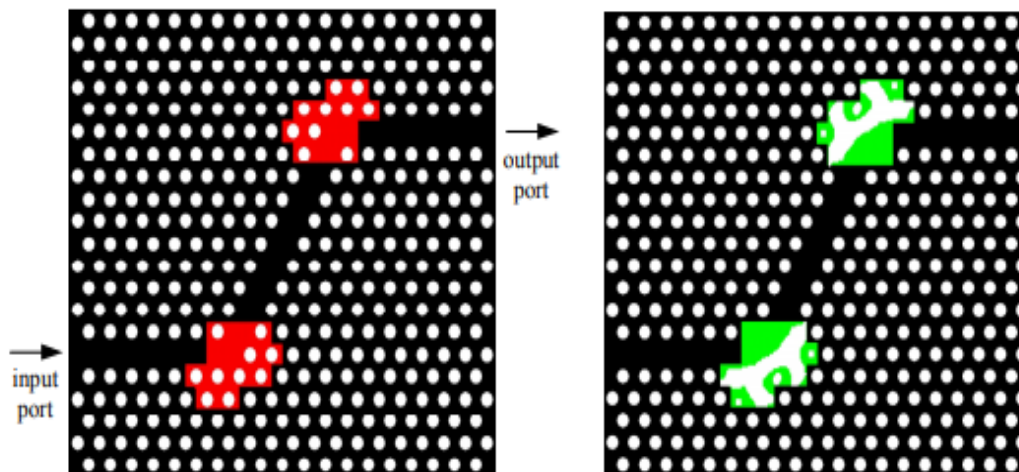


Figure II.10: Schéma des guides d'ondes à Cristal photonique contenant deux courbures consécutives de 60° . [12]

II.3 Couplage résonateur/ guide dans un cristal photonique 2D

La technique de diffusion résonante a été utilisée pour caractériser les cavités des cristaux photoniques. La diffusion résonante a l'avantage de donner le facteur Q non chargé, ou intrinsèque, de la cavité, contrairement aux techniques de caractérisation dans le plan qui utilisent des guides d'ondes de couplage qui modifient le comportement de la cavité.

Pour les guides d'ondes optiques du type CROW (Coupled Resonator Optical Waveguide), il s'agit d'un guide à cavités couplées, obtenu par un faible couplage entre des cavités optiques de haute qualité situées par ailleurs.

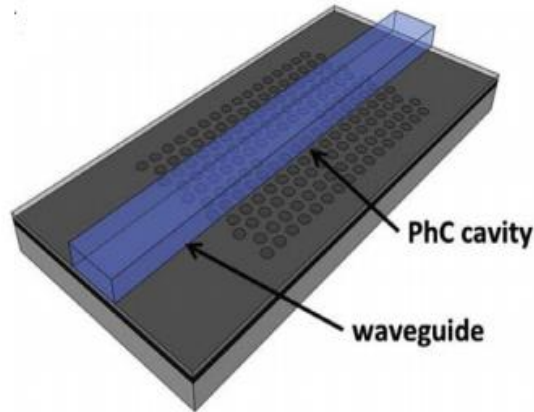


Figure II.11: une représentation schématique d'un guide d'onde de bus est couplée verticalement à une cavité PhC. [13]

Similaire à celle de Kuramochi. et al [14], la cavité à dispersion adaptée (DA) est réalisée en modulant localement la largeur d'un guide d'onde à Cristal photonique W1. Un puits à potentiel graduel est créé en adaptant la courbe de dispersion W1 (d'où le nom) de telle sorte que l'état confiné qui en résulte ait une forme gaussienne. Une telle forme est généralement obtenue par la construction d'une cavité à partir d'une partie centrale de guidage entourée de sections de miroirs "mous", dans lesquels le champ décroît de manière exponentielle. En ajustant soigneusement les régions des miroirs, la forme globale du mode sera très proche de la forme gaussienne. La courbe de dispersion du guide d'onde et les fréquences de coupure correspondantes en fonction du déplacement du trou sont calculées à l'aide d'un solveur de fréquences [15]. Un ajustement analytique est fait à la courbe de dispersion et aux fréquences de coupure pour différents décalages de trous et ceci est utilisé pour construire la cavité [16]. Un schéma de la cavité DA, avec un L3 pour comparaison, est donné dans la figure II.12.

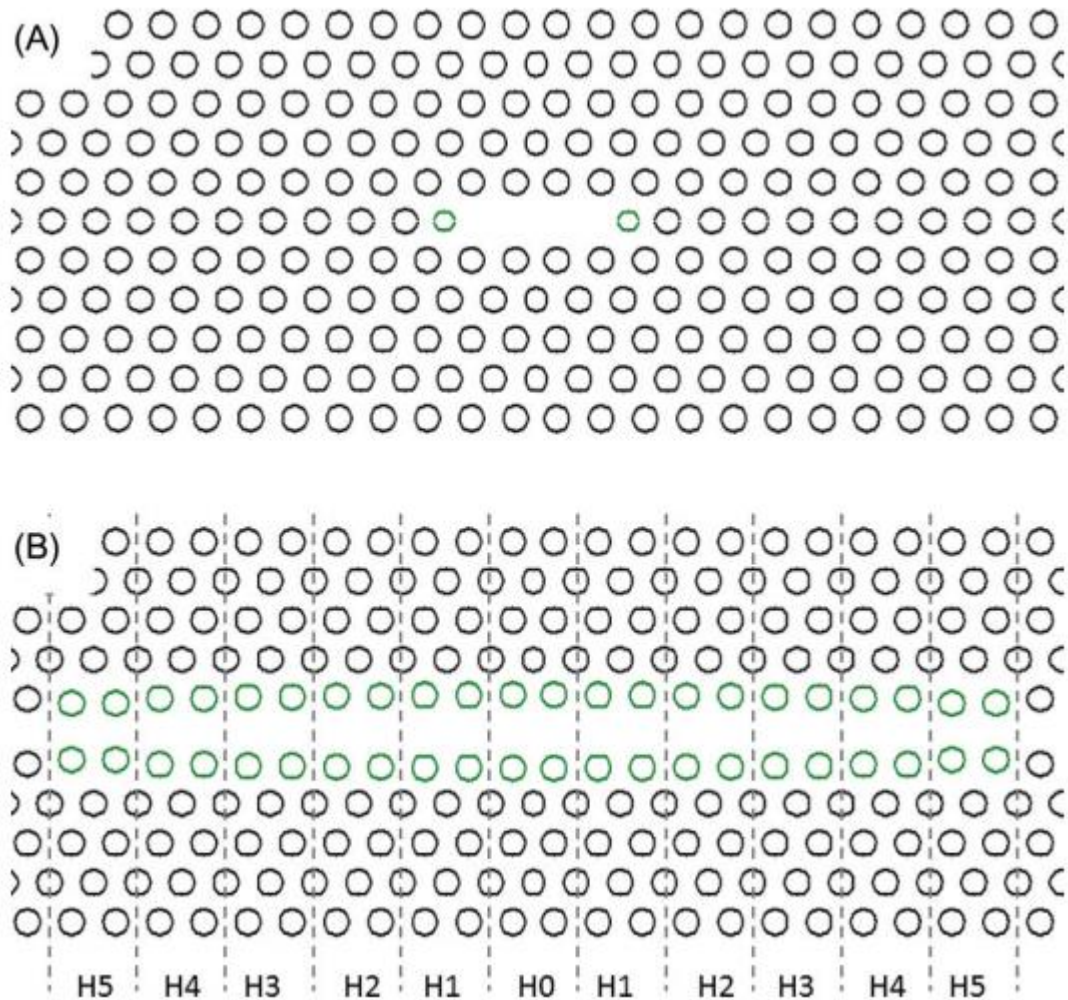


Figure II.12 : (A) La cavité L3 est réalisée en enlevant trois trous au centre, et le facteur Q est optimisé en déplaçant et en rétrécissant les trous (indiqués en vert) de chaque côté de la cavité. (B) La cavité DA est réalisée en ajustant la position des trous de chaque côté du guide d'onde $W1$.

En 2005, Min Qiu a montré dans une simulation que le couplage vertical était possible entre un guide d'ondes en silicium et une cavité en silicium à Cristal photonique [17], mais qu'il n'est pas facile d'obtenir un transfert efficace de la lumière entre des guides d'ondes et des cavités ayant des indices de réfraction différents. L'efficacité du couplage est déterminée par deux facteurs, le chevauchement spatial entre les modes évanescents de la cavité et du guide d'onde, et la correspondance du vecteur k entre les deux modes. Le chevauchement spatial est déterminé par l'épaisseur de la couche barrière, mais dans les approches conventionnelles, par exemple le coupleur directionnel, une correspondance du vecteur k ne peut être obtenue qu'en utilisant des matériaux similaires, la distribution du vecteur k est beaucoup plus riche, comme le montre la figure II.13

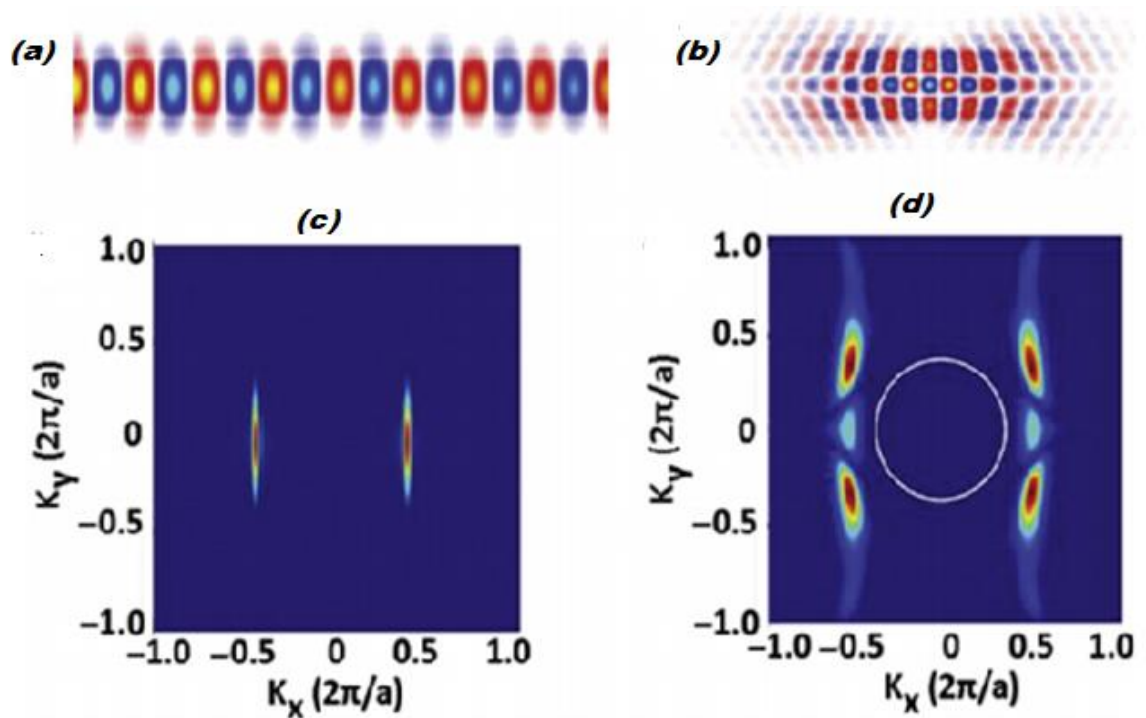


Figure II.13 : La distribution du champ électrique dans le guide d'onde (a) et la cavité (b). La distribution correspondante dans l'espace K du champ dominant ; (c) guide d'onde ; et (d) cavité.

II.4 Le diviseur de puissance à cristaux photoniques

II.4.1 Définition

Comme nous le savons, les diviseurs de puissance sont des éléments-clés dans les dispositifs et systèmes photoniques multifonctionnels. Il existe principalement trois approches différentes pour diviser ou diviser également la puissance d'un signal entrant en certains ports de sortie, au moyen d'un coupleur directionnel [18, 19], en utilisant une jonction en Y ou en T [20] et en basant sur le résonateur annulaire PC [21]. La structure de base du séparateur est divisée en deux parties, un port d'entrée et un port de sortie. Idéalement, la puissance d'entrée est également répartie entre les ports de sortie sans réflexion ni perte de rayonnement importante. À notre connaissance, le diviseur de puissance le plus simple est la structure de jonction en Y [22].

II.4.2 Travaux réalisés sur les diviseurs de puissance à base de cristaux photoniques

Au terme de nombreuses recherches sur les diviseurs à base de cristaux photoniques, certains travaux ont été réalisés devant. Ainsi, ces travaux nous ont inspiré pour étudier notre problème en matériel de méthodes, les résultats de simulation obtenus, et enfin pour tirer quelques idées utiles pour la conception de diviseurs de puissance basés sur des cristaux photoniques bidimensionnels à maille élémentaire du type triangulaire. Dans un premier temps,

nous avons présenté les résultats de simulation pour la jonction Y en utilisant les diviseurs 1×2 , 1×3 , 1×4 , 1×5 , 1×6 , 1×8 et 1×10 :

-La jonction Y 1×2

Le 1×2 est le plus simple des diviseurs de puissance ; actuellement, l'auteur [23] se concentre sur l'optimisation de la topologie du diviseur en Y 1×2 dans le but d'améliorer la transmission et obtenir une grande largeur de bande à la sortie de la jonction. Cette structure est illustrée dans la figure II.14 (a).

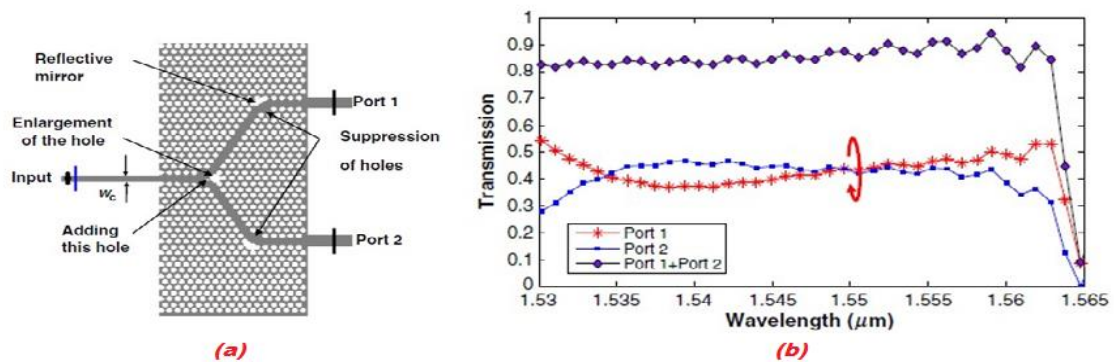


Figure II.14 : (a) La structure optimisée du séparateur en Y 1×2 excitées en mode TE, (b) Réponse spectrale en matière de transmission dans les deux ports de sortie. La puissance est répartie de manière égale entre les voies des deux ports. La transmission totale enregistrée est égale à 86%. [23]

Les réponses de transmission spectrales dans les deux sorties ports, obtenus numériquement de ce diviseur Y 1×2 en TE sont tracées sur la figure II.14(b) dans la gamme de longueur d'onde de 1.53 à 1.565 μm . Après optimisation remarquez qu'il y a une augmentation parallèle du taux de transmission du spectre réponse pour les deux ports de sortie (port 1 et port 2) de manière substantielle entre 30% et 55%, respectivement, pour les longueurs d'onde 1.53 et 1.56 μm . Le montant de la transmission totale enregistré à la longueur d'onde 1.55 μm obtenus pour les deux ports sont de $\sim 86\%$.

- La jonction Y 1×3

Dans cette section, l'amélioration de la transmission et la réduction de la réflexion par l'optimisation de la jonction 1×3 , pour obtenir une bande passante importante aux ports de sortie du distributeur d'énergie ; l'optimisation se fait par l'introduction de modifications, pour lesquelles l'auteur utilise deux techniques pour modifier la géométrie de référence. La première consiste à essayer d'amener les lobes expulsés de la courbe de la jonction à l'intérieur du coude, par combinaison d'un miroir réfléchissant et d'une cavité, par ajout d'une tranchée d'air, orientée

le long des seconds voisins, jusqu'au point de jonction du coude. La seconde technique est basée sur l'élimination des trous devant les miroirs réfléchissants ; trou de défaut avec des rayons ajoutés au milieu de la jonction, et comprenant deux triangles de sorte que le cercle déjà ajouté, se trouve au milieu de la distance entre eux, comme le montre le zoom de la figure II.15 (a), ce dernier fonctionne donc comme un réducteur de puissance pour la sortie 2. Les principaux paramètres du défaut ajouté sont L_1 , L_2 et L où L désigne la longueur entre les centres des trous symétriques. [24]

La figure II.15(b) montre les performances de sortie de la puissance de transmission et de réflexion pour des paramètres optimaux choisis avec différentes longueurs d'onde allant de $1.50 \mu\text{m}$ à $1.58 \mu\text{m}$. de $1.55 \mu\text{m}$ proches du cas idéal où la transmission est de 33.8% à la sortie 1, 33.4% à la sortie 2, et 32.7% à la sortie 3, avec un total de 99.9% pour les différentes productions sur la même longueur d'onde, ce qui semble être une bonne performance.

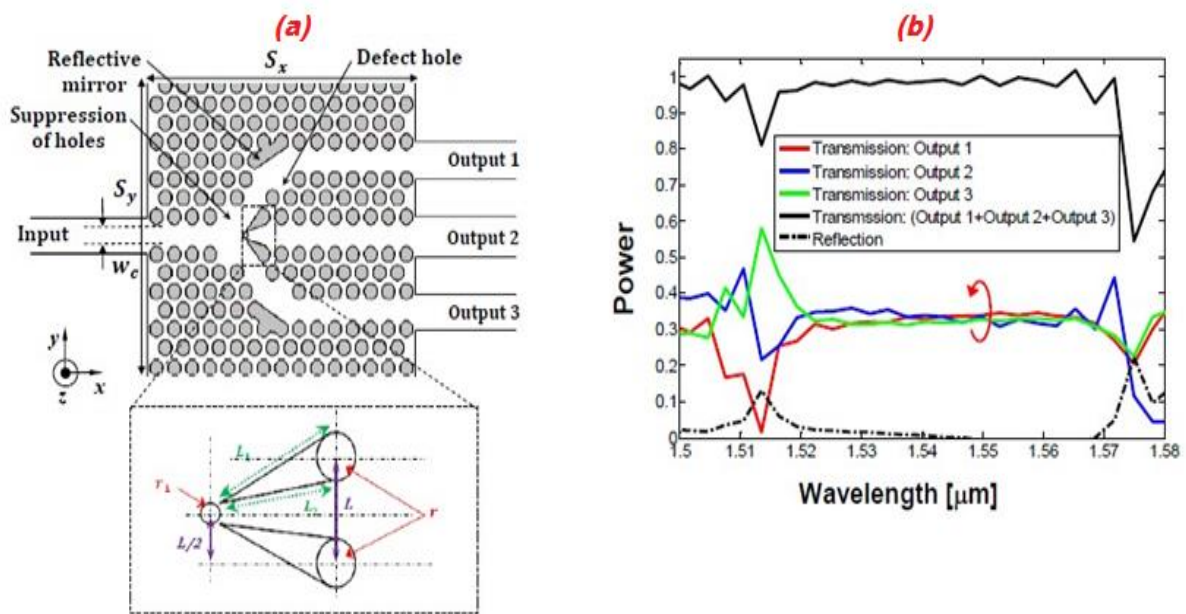


Figure II.15 : (a) Conception du diviseur de faisceau 1×3 optimisé, (b) Réponse spectrale en transmission et en réflexion aux ports de sortie du diviseur 1×3 optimisé.

-La jonction Y 1×4

Le but de l'auteur [23] est donc d'optimiser la topologie de la jonction en Y 1 × 4 pour améliorer la transmission et obtenir une large bande passante sur les ports de sortie. La structure est présentée dans la figure suivante :

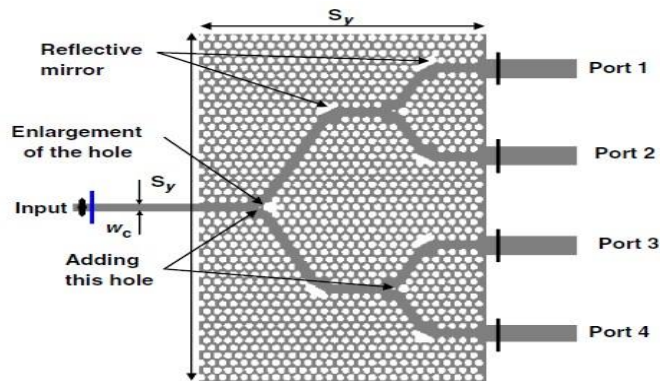


Figure II.16: Structure du diviseur 1 × 4 optimisé.

Les différents résultats obtenus à la sortie des ports sont présentés dans la figure II.17, la quantité maximale de transmission enregistrée est d'environ 85% à la longueur d'onde de 1.546 [23]. D'autrepart, il y a une distribution efficace de la puissance dans les quatre ports de sortie vers la longueur d'onde 1.55μm qui sont proches cas idéal où la transmission sera de 25% pour chaque port. Le total de la transmission enregistrée à 1.5μm est égal à 78%.

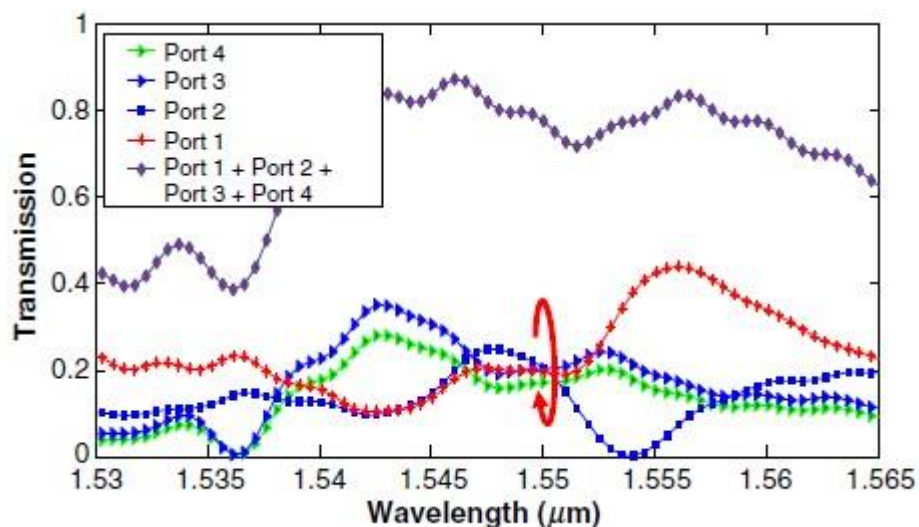


Figure II.17:Réponse spectrale en matériel de transmission vers les ports de sortie du diviseur 1 × 4.

-La jonction Y 1×5

La figure II.18 montre la représentation schématique du diviseur de faisceau proposé, mis en œuvre sur une structure CP où des barres d'air sont placées dans une représentation triangulaire ayant les caractéristiques géométriques et physiques suivantes : $n_{\text{eff}} = 3.24$ assure une transmission élevée et un PBG dans la bande du proche infrarouge, $r = 0.36a$ et un facteur de remplissage de l'air égal à 47%. Le diviseur de faisceau 1×5 proposé a été conçu par un guide d'onde unique à canal PhC d'entrée et cinq sorties.

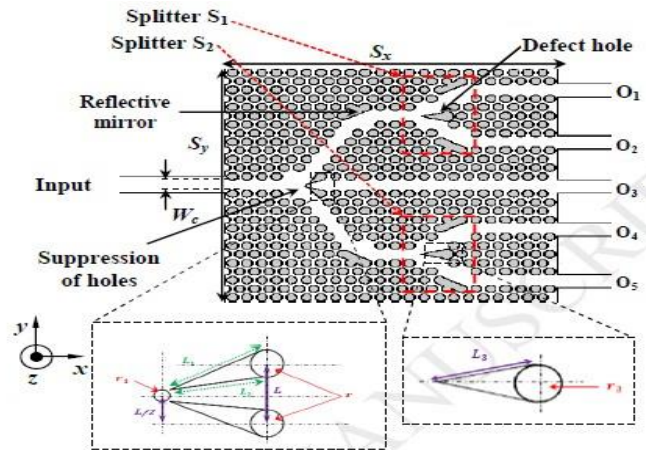


Figure II.18: Vue schématique du diviseur de faisceau 1 × 5 PhC optimisé, avec paramètres: $S_x = 27 \mu\text{m}$, $S_y = 24 \mu\text{m}$, $\square_x = 0.05 \mu\text{m}$, $\square_y = 0.05 \mu\text{m}$, $r = 0.167a$, r_1 est le rayon de la tige d'air au centre de la jonction en Y, $L = 3.46 \mu\text{m}$, $L_1 = 1.48 \mu\text{m}$, $L_2 = 0.98 \mu\text{m}$, $r_3 = 0.5a$ et $L_3 = 1.85 \mu\text{m}$. [25]

Le spectre des graphiques de transmission normalisés T calculés aux sorties dans la bande de longueurs d'onde de la région $[1.53-1.57 \mu\text{m}]$ a été représenté sur la figure II.19 selon ce graphique, le dispositif proposé divisera le faisceau optique d'entrée en cinq canaux de sortie de manière presque égale, avec une transmission de plus de 19.78 % pour chaque canal de sortie de la longueur d'onde de travail $1.55 \mu\text{m}$, ce qui représente l'endroit idéal où la transmission maximale peut atteindre 99.23 %.

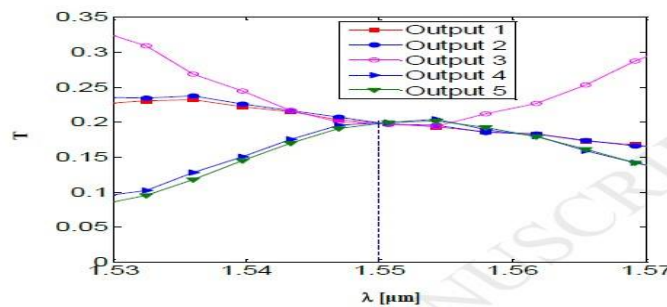


Figure II.19 : 1×5 graphiques de transmission du diviseur de faisceau qui est composé sur la géométrie optimisée de division de la jonction Y. [25]

-La jonction Y 1×6

Pour concevoir la structure du séparateur de faisceau 1 × 6, l'auteur [25] garde la même topologie que le séparateur 1 × 3 vu précédemment et divise chaque sortie en deux ports de sortie. Pour ce faire, il utilise les séparateurs 1 × 2 S1, S2 et S3. Il en résulte six ports de sortie pour le séparateur 1 × 6. Dans le but de réduire les pertes par réflexion, la structure du diviseur 1 × 6 a été modifiée. Pour le procédé d'optimisation, l'auteur utilise les techniques décrites ci-dessus pour optimiser la transmission de la jonction 1 × 3 et obtenir une distribution uniforme. La figure II.20 présente une vue de dessus de la structure modifiée du diviseur de faisceau 1 × 6.

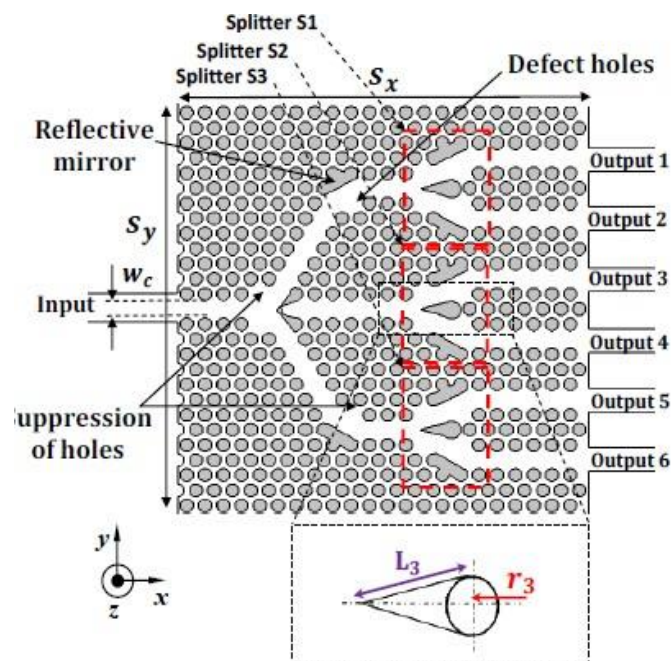


Figure II.20: Conception du diviseur de faisceau 1 × 6 proposé excité en mode TE. Le PC a une matrice de grille triangulaire de rayons de trous d'air ($r = 0.36a$) gravés dans un milieu diélectrique ($n_{ef} = 3.24$). Les paramètres de la structure PC sont définis comme suit: $S_x = 26 \mu\text{m}$, $S_y = 24 \mu\text{m}$, $\square_x = \square_y = 0.05 \mu\text{m}$ et la disposition du défaut avec les paramètres $r_3 = 0.5a$ et $L_3 = 1.879 \mu\text{m}$.

La figure II.21 présente les résultats de la réponse spectrale en transmission et en réflexion obtenus par la simulation 2D-FDTD du diviseur de faisceau 1×6 inventé dans les longueurs d'onde de la bande C optique. Ces résultats montrent que la transmission de sortie normalisée est divisée de manière égale sur six canaux de sortie ; il est clairement démontré que les performances du diviseur de faisceau sont grandement améliorées. La transmission totale enregistrée à $1.55 \mu\text{m}$ est égale à 96%, où les valeurs sont approximativement de 16.3%, 15.9%, 15.9%, 15.8%, 15.8%, et 16.3% pour la sortie 1, la sortie 2, la sortie 3, la sortie 4, la sortie 5, et la sortie 6, respectivement. D'autre part, le diviseur de faisceau peut fonctionner dans les plages

de 1.544 μm à 1.564 μm avec une largeur de bande opérationnelle d'environ 20 nm, et une puissance de division effective.

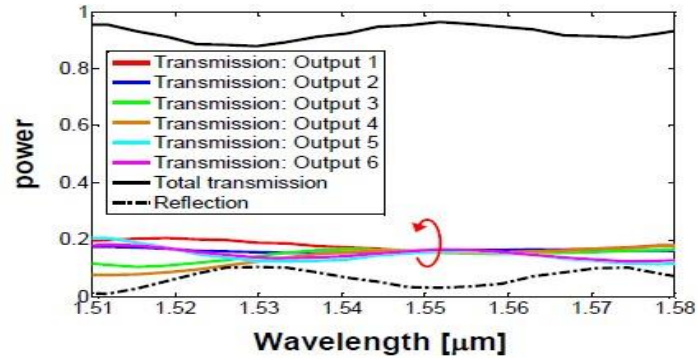


Figure II.21 : Réponse spectrale en transmission et en réflexion aux ports de sortie du diviseur de faisceau 1×6 optimisé. La puissance est divisée presque également entre les six branches. La transmission totale enregistrée pour la longueur d'onde de 1.55 μm est égale à 96%. [25]

-La jonction Y 1×8

La structure est composée d'un port d'entrée et de huit ports de sortie, comme pour les autres simulations, l'auteur [23] utilise la technique utilisée pour les deux jonctions en Y 1 × 2 et 1 × 4. Une vue de dessus de la structure de la jonction optimisée 1 × 8 simulée est présentée dans la figure II.22 (a). La figure II.22 (b) montre la réponse spectrale de transmission du répartiteur en Y 1 × 8 excité en mode TE. Selon les résultats de simulation obtenus par la méthode FDTD 2-D, la performance de différents ports est variable sur la gamme de longueur d'onde et une transmission croisée est observée à la longueur d'onde de 1.55 μm , dont les valeurs sont respectivement de l'ordre de 12%, 12%, 12%, 0.9%, 0.9%, 10%, 12% et 12% pour le port 1, le port 2, le port 3, le port 4, le port 5, le port 6, le port 7 et le port 8. La puissance est répartie presque également entre les canaux des quatre ports. La transmission totale enregistrée à 1.55 μm est égale à 86%.

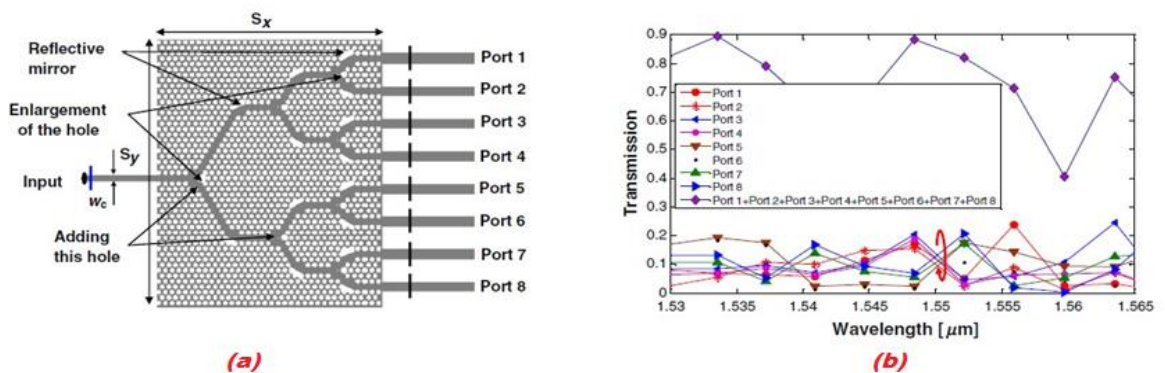


Figure II.22 : (a) Structure du diviseur 1 × 8 optimisé, (b) Réponse spectrale en matière de transmission vers les ports de sortie du diviseur en Y 1 × 8. [23]

-La jonction Y 1×10

Dans cette section, l'auteur [25] accorde une attention particulière à l'amélioration de la conception du séparateur de faisceau 1×10 , les propriétés physiques et géométriques identiques du dispositif 1×5 étudié précédemment sont préservées, chaque sortie est ensuite divisée en deux canaux comme inspiré par [26] - [27] sur la base des diviseurs bidirectionnels S3, S4, S5, S6 et S7. Ainsi, les dix canaux de sortie du diviseur de faisceau 1×10 sont générés. Pour la procédure d'optimisation de la topologie de la jonction de faisceaux 1×10 , les méthodes similaires décrites ci-dessus sont adoptées pour optimiser la transmission de la jonction 1×5 proposé afin d'obtenir une division uniforme. La topologie optimisée de la jonction 1×10 est illustrée à la figure II.23.

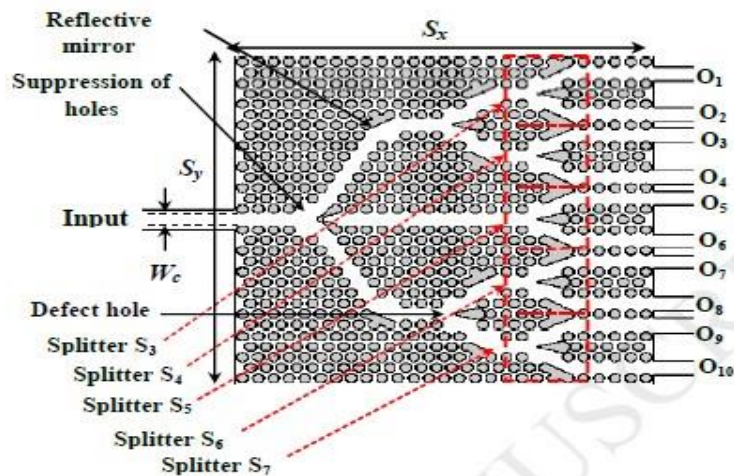


Figure II.23 : La conception optimale du diviseur de faisceau 1×10 est sortie en mode électrique transversal avec des guides d'ondes de sortie parallèles basés sur l'intégration de la jonction en Y.

La figure II.24 représente un calcul du spectre de transmission de 1×10 à la sortie de la bande de longueurs d'onde $[1.53-1.57 \mu\text{m}]$.

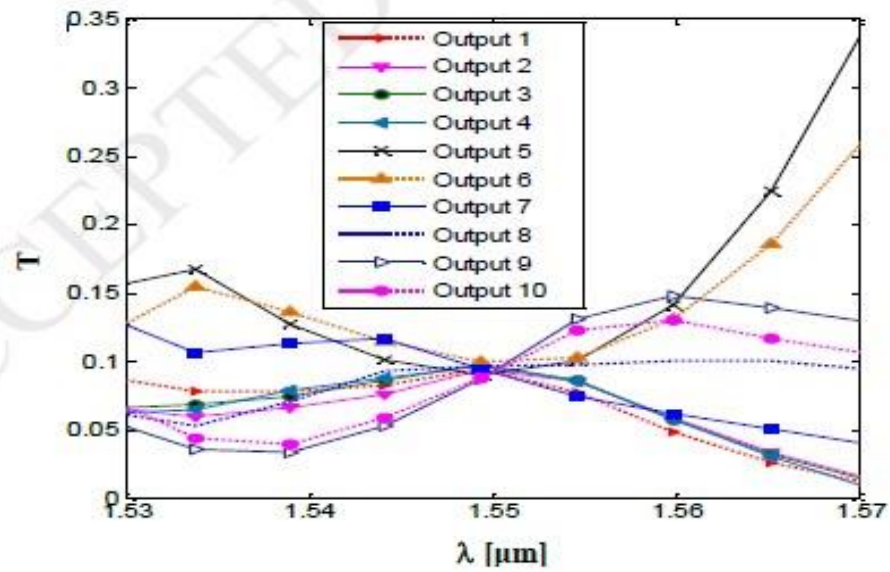


Figure II.24: Graphe de transmission du diviseur de faisceau 1×10 qui est composé sur la jonction Y optimiser. [25]

II.4.3 Différent types de diviseur à cristaux photoniques

Nous présentons ci-dessous les différents types de diviseurs à cristaux photoniques, notamment :

II.4.3.a - Les diviseurs à cristaux photoniques en Y (1×2)

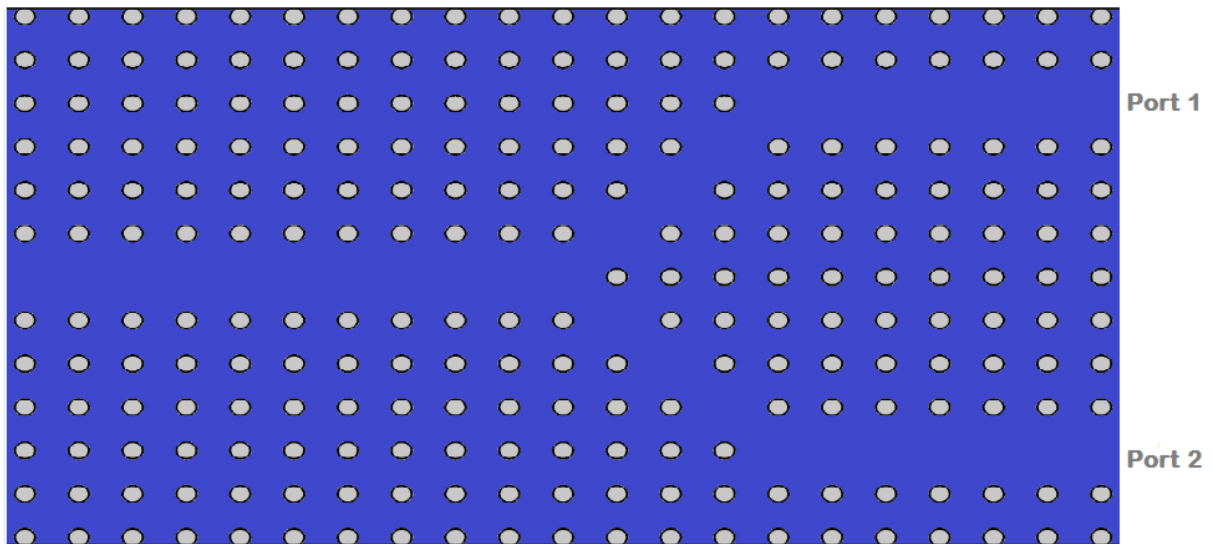


Figure II.25: le diviseur a cristaux photoniques en Y (1×2).

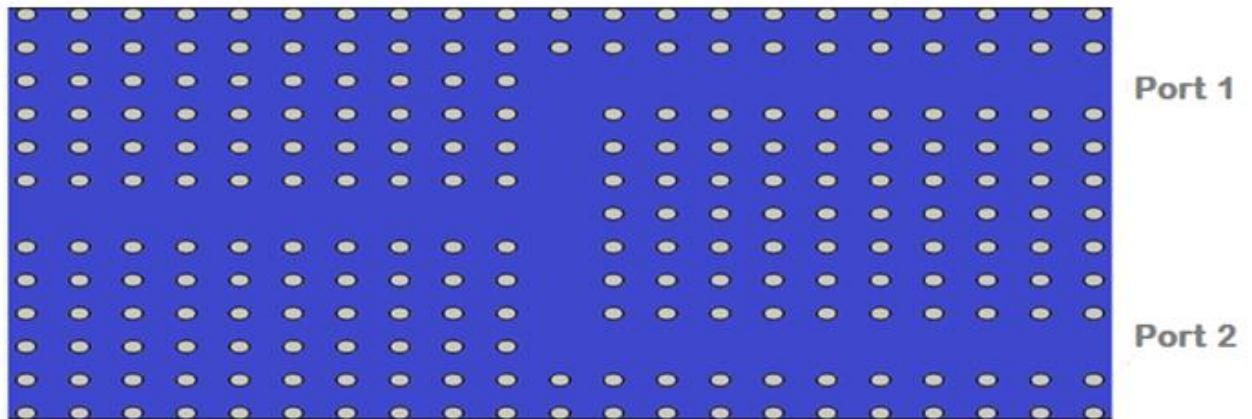
II.4.3.b - Les diviseurs à cristaux photoniques en T (1×2)

Figure II.26 : le diviseur a cristaux photoniques en T (1×2).

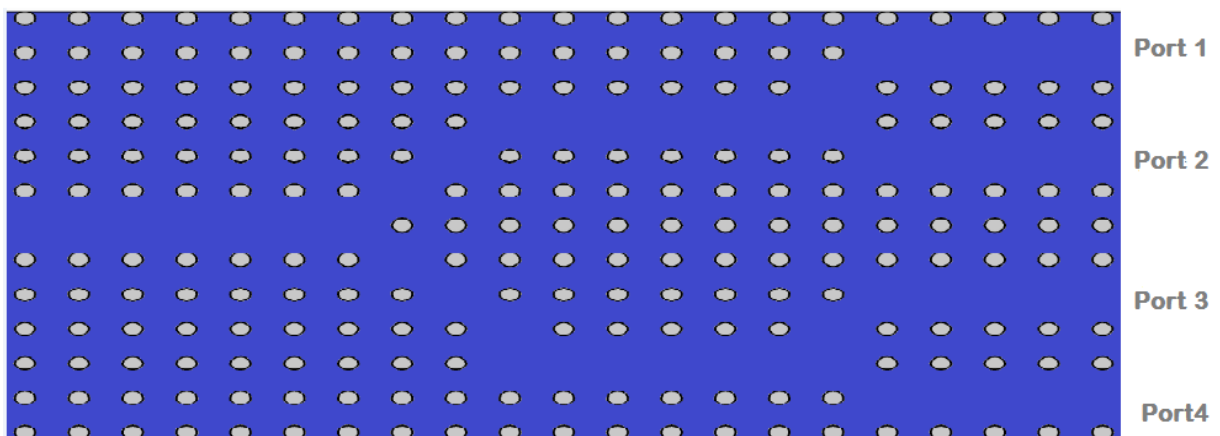
II.4.3.c - Les diviseurs à cristaux photoniques en Y (1×4)

Figure II.27 : le diviseur a cristaux photoniques en Y (1×4).

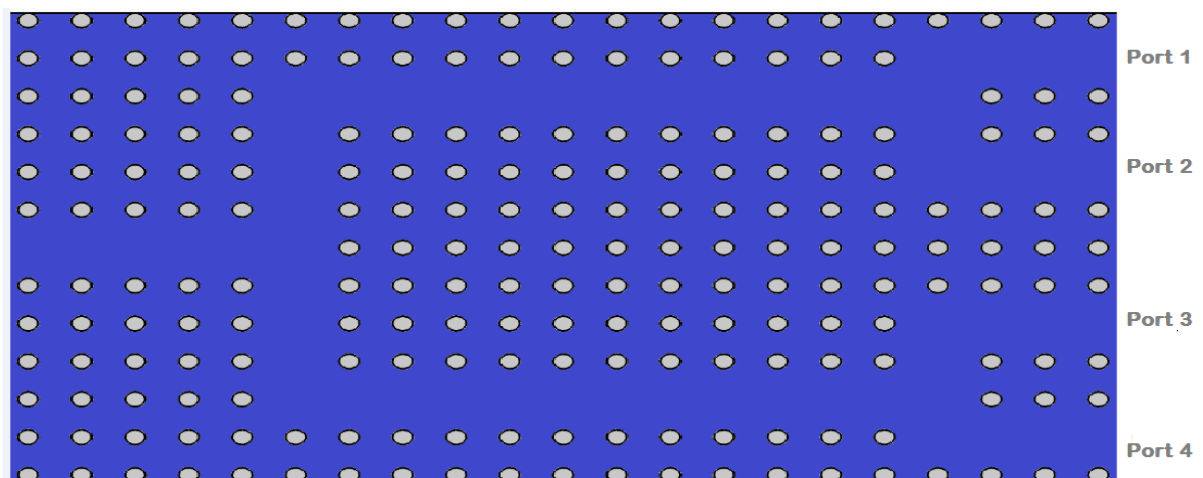
II.4.3.d - Les diviseurs à cristaux photoniques en T (1×4)

Figure II.28:le diviseur a cristaux photoniques en T (1×4).

II.4.3.e - Les diviseurs à cristaux photoniques en Y (1×8)

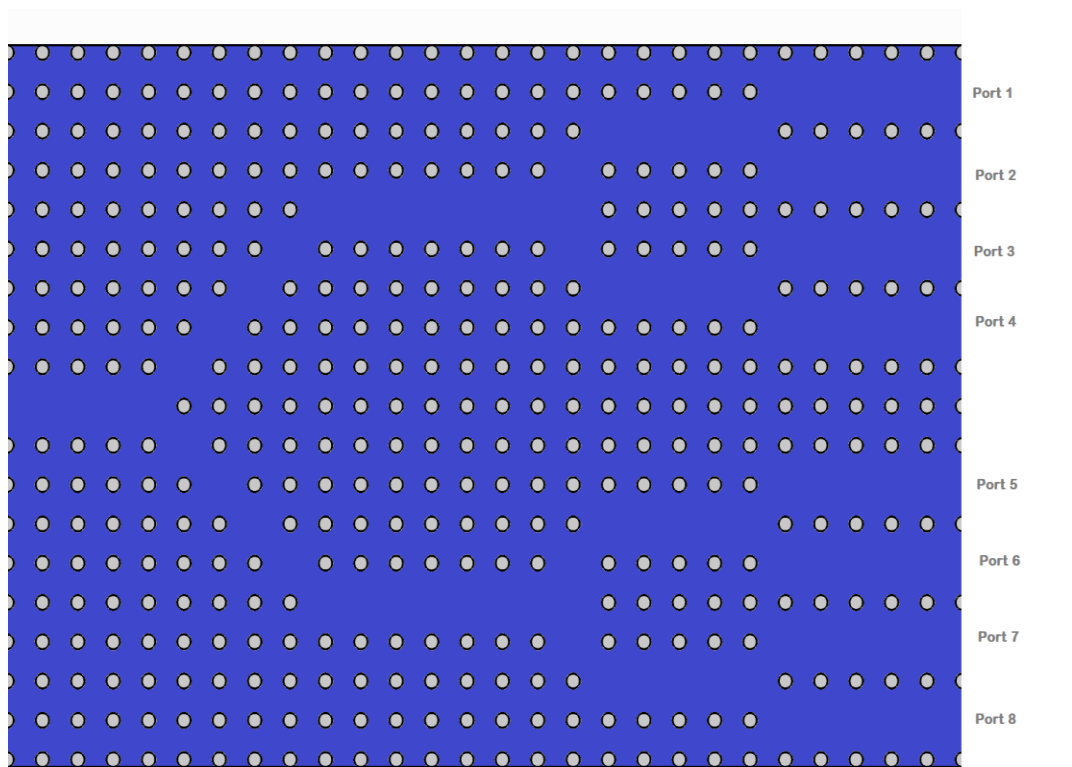


Figure II.29:le diviseur a cristaux photoniques en Y (1×8).

II.4.3.f - Les diviseurs à cristaux photoniques en T (1×8)

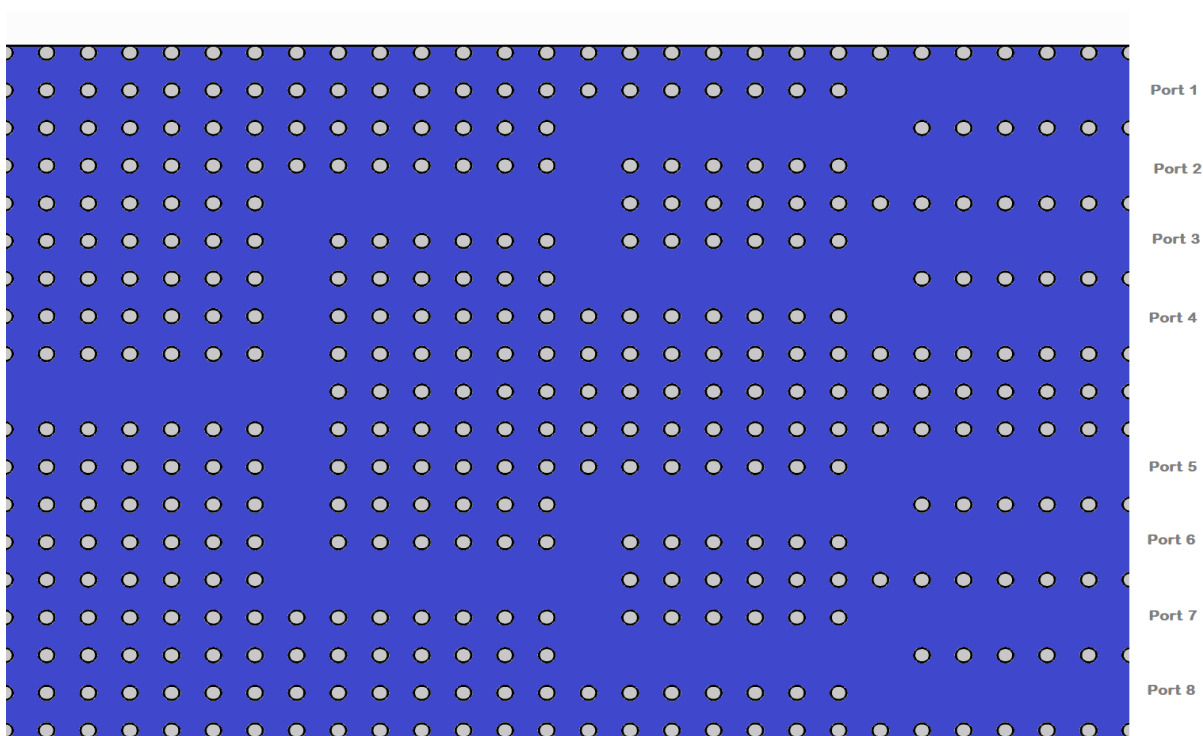


Figure II.30:le diviseur a cristaux photoniques en T (1×8).

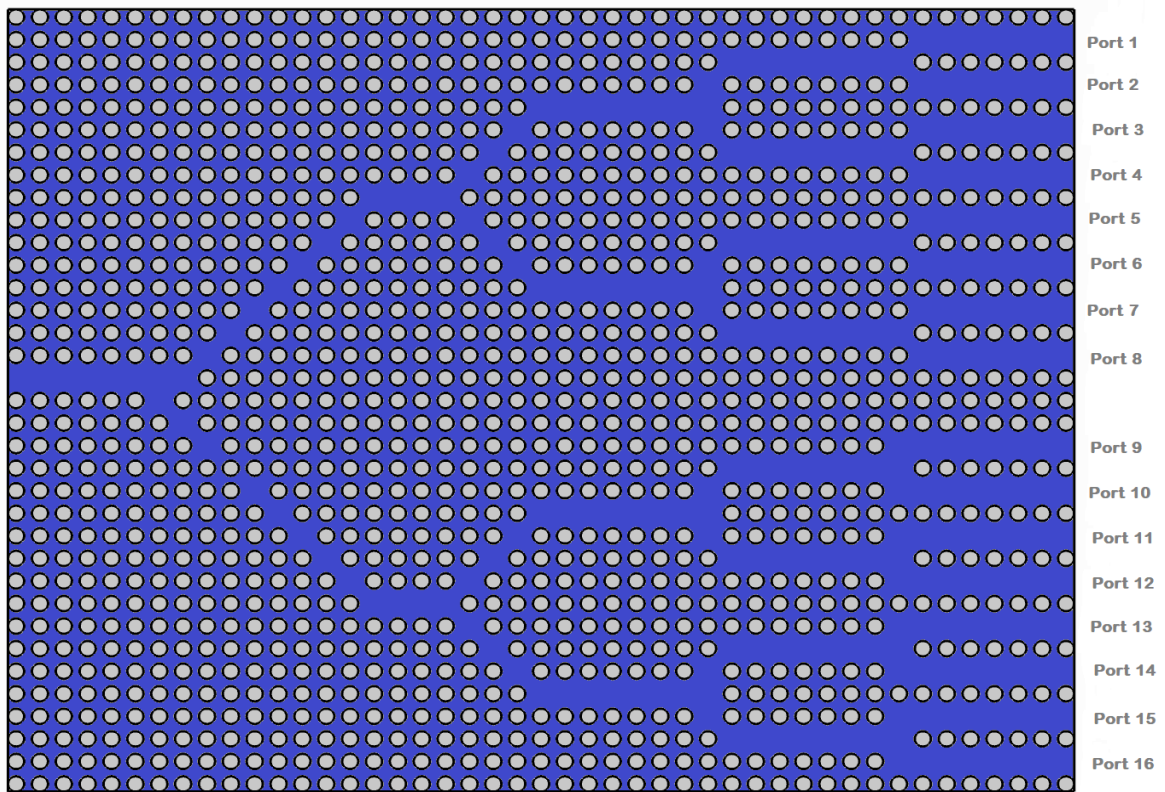
II.4.3.g -Les diviseurs à cristaux photoniques en Y (1×16)

Figure II.31:le diviseur a cristaux photoniques en Y (1×16).

II.5 Conclusion

Les cristaux photoniques sont très intéressants pour la fabrication des composants optiques planaires. Ils constituent une plate-forme extrêmement intéressante pour l'optique intégrée. En effet, le processus de miniaturisation des composants optiques pour l'intégration nécessite le contrôle des modes de propagation des ondes électromagnétiques dans ces cristaux (mode défaut). Dans ce chapitre nous avons étudié les résonateurs à cristaux photonique el les guides d'onde à cristaux photoniques et le couplage guide – cavité. Nous terminons notre étude théorique par une étude de diviseur à cristaux photoniques et leurs types de jonction T et Y.

II.6 Référence

- [1].Mesri, N., &Alipour-Banaei, H. (2017). An Optical Power Divider Based on Two-dimensional Photonic Crystal Structure.Journal of Optical Communications, 38(2).
- [2].Khankhoje, U. K., Kim, S.-H., Richards, B. C., Hendrickson, J., Sweet, J., Olitzky, J. D., ... Scherer, A. (2010). Modelling and fabrication of GaAsphotonic-crystal cavities for cavity quantum electrodynamics.Nanotechnology, 21(6), 065202.
- [3] .P.Pottier, C. Seassal, X. Letartre, J.L. Leclercq, P. Victorovitch, D. Cassagne et C. Jouanin « Triangular and Hexagonal High Q-Factor 2-D Photonic Bandgap Cavities on III-V Suspended Membranes », IEEE J. Lightwave Technol. Vol 17, N° 11, pp 2058 – 2062, 1999.
- [4] .FILALI Meryem .Etude et Conception d'un démultiplexeur 8 canaux à cristaux photoniques bidimensionnels, Mémoire présentée en vue d'obtention Du diplôme de Master AcadémiqueUniversité MOHAMED BOUDIAF - M'Sila, 2018
- [5] .Y. Akahane, T. Asano, B.-S. Son, and S. Noda, "High-Q photonic nanocavity in a two-dimensional photonic crystal," Nature, vol. 425, pp. 944–947, 2003.
- [6] .A. R. A. Chalcraft, S. Lam, D. OBrien, T. F. Krauss, M. Sahin, D. Szymanski, D. Sanvitto, R. Oulton, M. S. Skolnick, A. M. Fox, D. M. Whittaker, H.-Y. Liu, and M. Hopkinson, "Mode structure of the L3 photonic crystal cavity," Appl. Phys. Lett., vol. 90, p. 241117, 2007
- [7] .AbolfazlAbbaspour , HamedAlipourBanaei , AlirezaAndalib Student of M.S.C., Department of Electrical Engineering, Ahar Branch, Islamic Azad University, Ahar, Iran , "A New Design for Photonic Crystal Ring Resonator Based AddDrop Filter Using Nested Rectangular Rings.2014.
- [8] .I. Bouderdji, « Conception d'un démultiplexeur à cristaux photoniques bidimensionnels », Mémoire de master, Université de M'sila, 2016.
- [9] .Chongyu Shi a , Jun Yuan b , XinLuo a , Shuxin Shi a , Shan Lu a , Pengfei Yuan a , WeidongXu a , Zeng Chen a , Hua Yu a,*15 April 2020, 125222.
- [10].Zhang, Y., & Li, B. (2006). Photonic crystal-based bending waveguides for optical interconnections.Optics Express, 14(12), 5723.
- [11].Design of a highly sensitive photonic crystal refractive index sensor incorporating ring-shaped GaAs cavity F. Rahman-Zadeha, M. Danaie b,*, H. Kaatuziana 2019
- [12].Frandsen, L. H., Harpeth, A., Borel, P. I., Kristensen, M., Jensen, J. S., & Sigmund, O. (2004). Broadband photonic crystal waveguide 60° bend obtained utilizing topology optimization. Optics Express, 12(24), 5916.

- [13]. Buckwalter JF, Zheng X, Li G, Raj K, Krishnamoorthy AV. A monolithic 25-Gb/s transceiver with photonic ring modulators and Ge detectors in a 130-nm CMOS SOI process. *IEEE J Solid-State Circuits* 2012;47:130922.
- [14]. Kuramochi E, Notomi M, Mitsugi S, Shinya A, Tanabe T, Watanabe T. Ultrahigh-Q photonic crystal nanocavities realized by the local width modulation of a line defect. *ApplPhysLett* 2006;88:041112.
- [15]. MITPhotonicBands, see http://abinitio.mit.edu/wiki/index.php/MIT_Photonic_Bands.
- [16]. Sekoguchi H, Takahashi Y, Asano T, Noda S. Photonic crystal nanocavity with a Qfactor of B9 million. *Opt Express* 2014;22:91624.
- [17]. Galli M, Portalupi S, Belotti M, Andreani L, O'Faolain L, Krauss T. Light scattering and Fano resonances in high-Q photonic crystal nanocavities. *ApplPhysLett* 2009;94:071101.
- [18]. Park I, Lee H-S, Kim H-J, Moon K-M, Lee S-G, O B-H, et al. Photonic crystal power-splitter based on directional coupling. *Opt Express* 2004;12:3599.
- [19]. Yu T-B, Wang M-H, Jiang X-Q, Liao Q-H, Yang J-Y. Ultracompact and wideband power splitter based on triple photonic crystal waveguides directional coupler. *J Opt A Pure Appl Opt* 2007;9:37–42.
- [20]. Guo H, Liao Q, Yu T, Chen S, Huang Y. Design of high efficiency and large separating angle beam splitter based on photonic crystal cavity resonator. *Mod PhysLett B* 2011;25:1963–9.
- [21]. Ghaffari A, Monifi F, Djavid M, shamian MS. Photonic crystal bends and power splitters based on ring resonators. *Opt Commun* 2008;281:5929–34.
- [22]. Boscolo S, Midrio M, Krauss TF. Y junctions in photonic crystal channel waveguides: high transmission and impedance matching. *Opt Lett* 2002;27:1001. 23.
- [23]. HadjiraAbriBadaoui, MehadjiAbri, « Optimized 1×8 compact splitter based on photonic crystal using the two-dimensional finite-difference time-domain technique », *Optical Engineering*, Vol. 54(6), 067104, June 2015.
- [24]. FedaoucheAmal, AbriBadaouiHadjira, and AbriMehadji, ' Ultra-Highly Efficient 1×3 and 1×6 Splitters for Terahertz Communication Applications', *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 28, No. 13, pp. 1434-1437, July 1, 2016.

[25].Fedaouche A, AbriBadaoui H, Abri M, An ultra-compact 1×5 and 1×10 beam-splitters in photonic crystal slab, *Optik - International Journal for Light and Electron Optics* (2010).

[26].D. C. Tee, N. Tamchek, Y. G. Shee, and F. R. MahamdAdikan, « Numerical investigation on cascaded 1×3 photonic crystal power splitter based on asymmetric and symmetric 1×2 photonic crystal splitters designed with flexible structural defects », *Optical Society of America (OSA)*, Vol. 22, No. 20, 6 October 2014.

[27].Jian-Hua Chen, Yang-Tung Huang, Yu-Lin Yang, and Ming-Feng Lu, ‘Design, Fabrication, and Characterization of Si-Based ARROW-B Photonic Crystal Sharp-Bend Waveguides and Power Splitters’, *Journal of Light wave Technology*, Vol. 30, No. 14, July 2012. ACC

Chapitre 3 :
Résultats et Interprétations

III Introduction

Les cristaux photoniques (CPs) sont des ensembles périodiques de matériaux diélectriques et métalliques. Depuis quelques années, les cristaux photoniques (CPs) ont été étudiés de manière approfondie pour la conception et la fabrication de nombreux composants optiques, exploitant leurs capacités à contrôler la propagation de la lumière.

Les applications des cristaux photoniques sont en majorité basées sur leur bande interdite et pour obtenir un taux de fréquence autorisé dans cette bande interdite, il faut introduire dans cette structure périodique des défauts. Ce défaut est obtenu par une modification locale de la géométrie du cristal (a, r...).

Nous consacrerons ce chapitre à la conception des filtres résonateurs ultra sélectifs hauts débits en anneau (Ring resonator) en réseau carré. En se basant sur la simulation en utilisant la méthode des éléments finis par le biais d'un logiciel adéquat appelé ComsolMultiphysics.

Dans l'avant-propos, nous rappelons succinctement le logiciel utilisé dans nos simulations qui est la Comsol.

III.1 Présentation de logiciel ComsolMultiphysics

Le logiciel ComsolMultiphysics est un programme d'analyse structurelle, permettant de résoudre des problèmes de physique et d'ingénierie par élément finis : Mécanique des structures, électromagnétisme haute et basse fréquence, écoulement, transfert de chaleur, réactions chimiques, optiques, acoustiques et autres, plus particulièrement les phénomènes couplés ou multi-physiques. Ce logiciel fournit une interface complète avec MATLAB et ses boîtes à outils pour une grande variété de capacités de programmation, de pré-traitement et de post-traitement. Les logiciels couvrent plusieurs plates-formes (Windows, Mac, Linux). En plus des interfaces utilisatrices classiques basées sur la physique.

COMSOL Multiphysics c'est un logiciel de simulation numérique basée sur la méthode des éléments finis. Ce logiciel permet de simuler de nombreuses applications en ingénierie, et tout particulièrement les phénomènes couplés ou simulation multi-physiques [1]

En juillet 1986, les étudiants Svante Littmarck et Farhad Saeidi de Germund Dahlquist ont fondé le logiciel COMSOL et la société correspondante sur la base d'un code développé pour un cours de troisième cycle à l'Institut royal de technologie (KTH) de Stockholm, en Suède. La première version a été lancée en 1998 [2].

COMSOL Multiphysics permet également d'entrer dans des systèmes couplés d'équations aux dérivées partielles (PDE).

Le logiciel COMSOL version 5.4a est un des simulateurs les plus utilisés par les chercheurs afin de simuler les phénomènes liés aux matériaux et les différentes techniques utilisées pour la technologie de la photolithographie. La figure III. 1 présente le software que nous avons utilisé pour notre simulation.

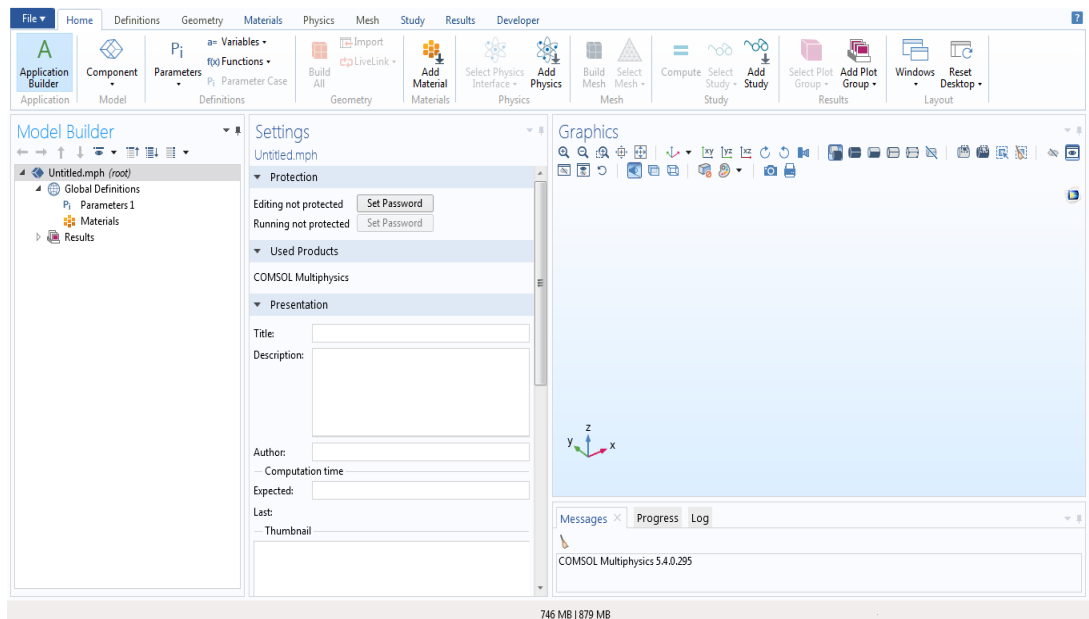


Figure III. 1 : Présentation du software COMSOL.

III.2 Présentation des résultats de simulation :

L'objectif de ce chapitre consiste à déterminer les caractéristiques de transmission d'une structure d'un diviseur avec certains cahiers des charges. Pour la réalisation des diviseurs en cristaux photoniques, nous sommes intéressés par le filtre Channel-Drop à fort taux de transmission ou de fonctions de diviseurs. Pour notre projet, l'étude est portée sur une structure photonique à maille carrée en structure triangulaire constituée de piliers diélectriques en GaAs de section circulaire plongé dans l'air. Dans notre simulation on a choisi les paramètres suivants:

a: l'espace entre le centre de deux motifs adjacents ($a=0.64\mu\text{m}$).

k : le rayon normalisé de la tige (0.19) avec $k=r/a$.

r: le rayon de tiges. ($0.12\mu\text{m}$).

III.3 Etude des structures bidimensionnelles sans défaut :

Nous sommes arrivés à analyser les structures bidimensionnelles planaires CP-2D sans défaut, dans un réseau carré de tiges diélectriques à base de GaAs plongées dans l'air (structure déconnectée). Les performances de ces structures en matière de transmission et réflexion obtenues par simulation seront discutées, et le champ magnétique sera présenté.

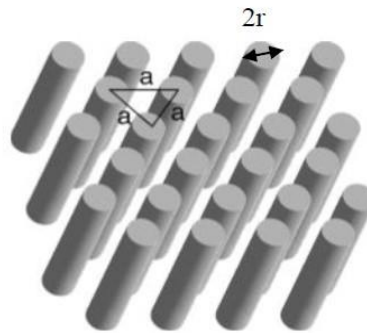


Figure III. 2 : structure périodique 2D déconnectée.

III.3.1 Structure carré sans défaut :

Nous étudions dans cette partie une structure de CP sans défaut identique à la précédente, mais dans un réseau carré de 23 rangées de long et 23 rangées de large.

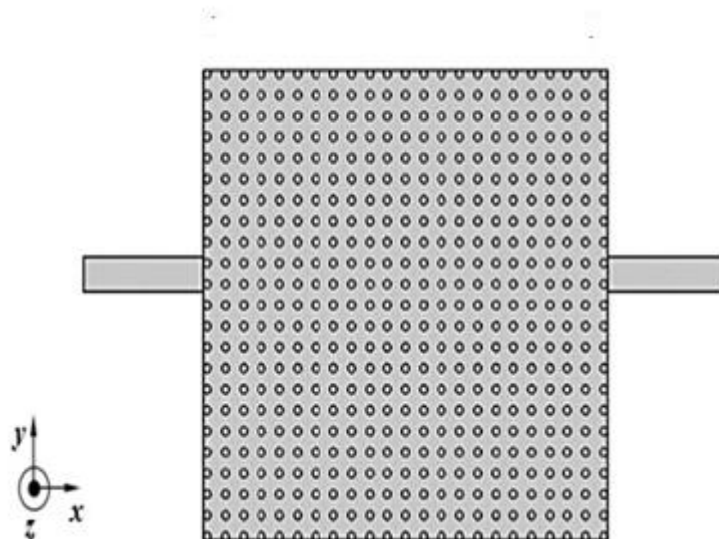


Figure III. 3 : Représentation de la structure carrée sans défaut avec: $a=0.6 \mu m$, $r/a=0.2$ [3].

La figure suivante représente les résultats de la simulation obtenus sous logiciel ComsolMultiphysics des coefficients de transmission et de réflexion.

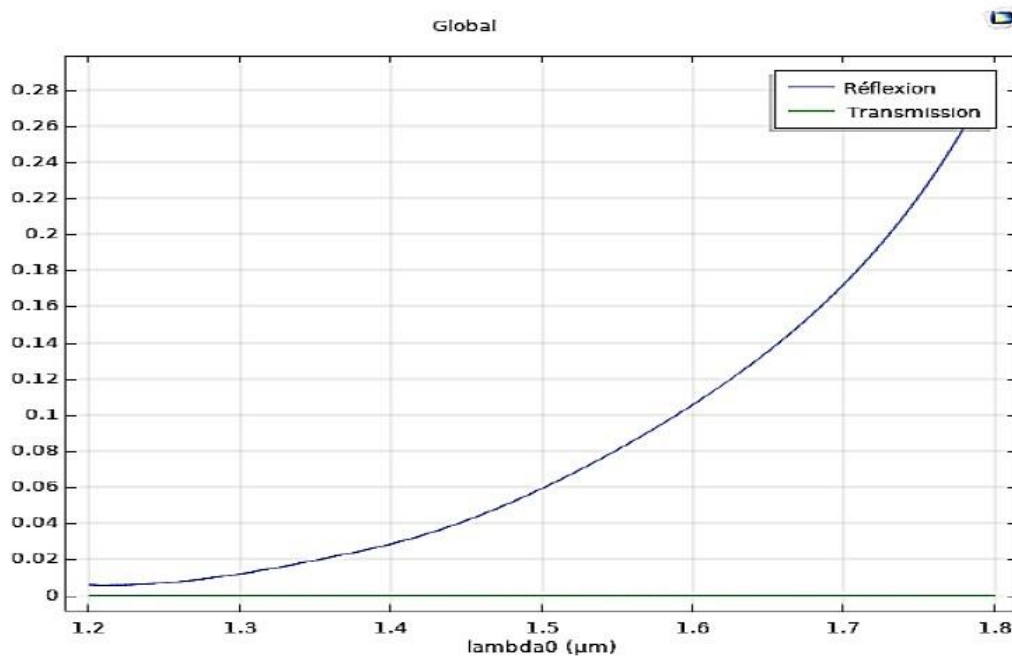


Figure III. 4 : Réponse spectrale de la transmission et la réflexion.

Ainsi que la structure CP précédente, nous enregistrons une transmission nulle pour la structure carrée dans l'intervalle de longueur d'onde $[1.2-1.8] \mu\text{m}$.

Sur la figure III.5, nous présentons la répartition du champ électrique E_z pour différentes longueurs d'onde.

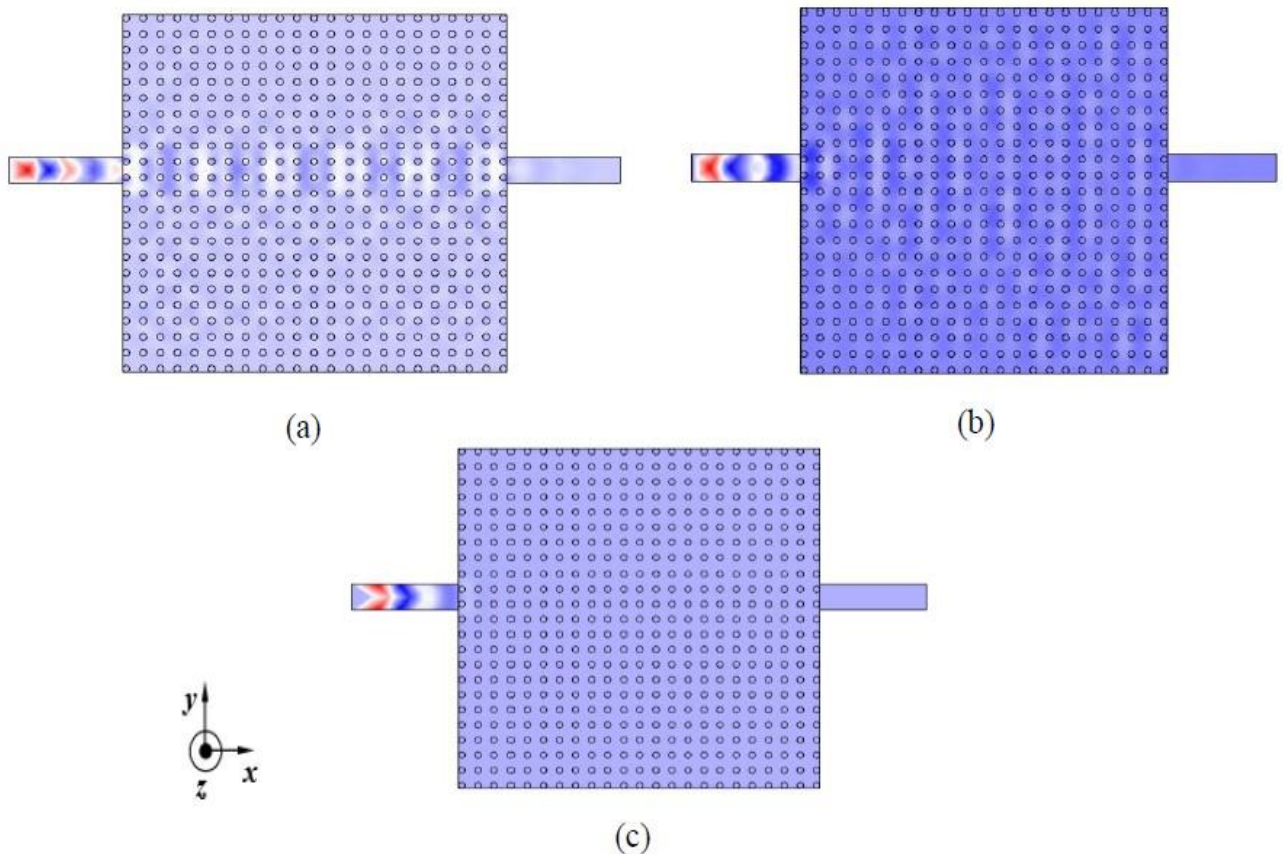


Figure III. 5 : Répartition du champ électrique d'une structure CP carrée sans défaut pour différents longueurs d'ondes en mode TE: (a) pour $\lambda=1.2 \mu\text{m}$ (b) pour $\lambda= 1.3116 \mu\text{m}$.(c) pour $\lambda= 1.5528 \mu\text{m}$. [3]

Sur la figure III.5, on peut observer une absence de propagation de l'onde électromagnétique dans la structure à mailles carrées pour les différentes longueurs d'onde.

III.4 Etudes des structures bidimensionnelles avec défaut :

Les guides d'onde sont réalisés en créant des défauts au sein du CP (défaut linéaire) dans une structure périodique parfaite qui consiste à enlever une rangée ou plus dans le cristal photonique d'un réseau carré de tiges diélectriques à base de GaAs plongées dans l'air.

III.4.1 Structure carré avec défaut :

➤ Conception du guide mono-rangée $W_1 K_A$:

Voici la structure CP-2D du guide à une rangée $W_1 K_A$ dans une structure carrée (Figure III.6).

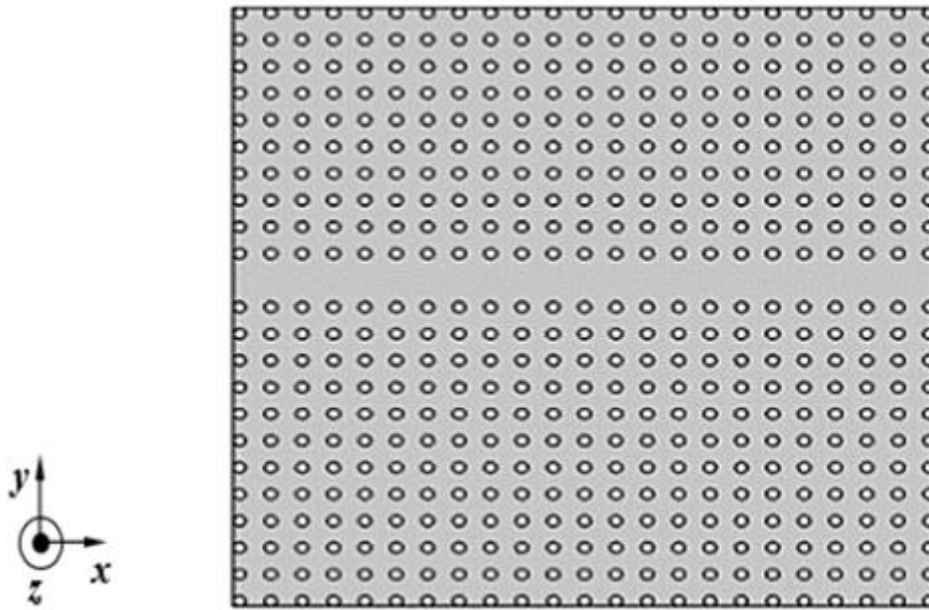


Figure III.6: Guide $W_1^K A$ dans une structure carrée.

La figure III.7. Ci-dessous donne les résultats de simulation des coefficients de transmission et de réflexion obtenus à l'aide du logiciel ComsolMultiphysics.

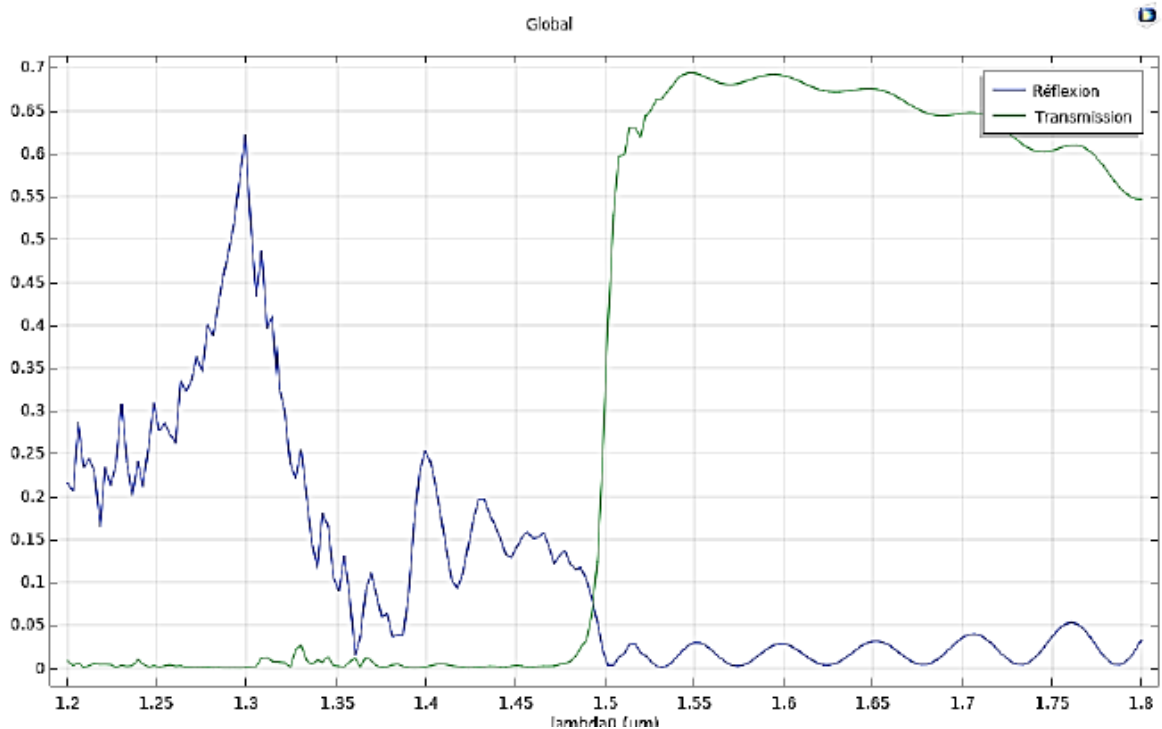


Figure III.7: La réponse spectrale en transmission et en réflexion du guide mono-rangée.

Cette figure représente le spectre simulé en matière de transmission et de réflexion dans l'intervalle de longueur [1.2-1.8] μm , on remarque que la transmission est pratiquement

nulle au voisinage de la longueur d'onde $1.31 \mu\text{m}$, en revanche la réflexion a obtenu un niveau plafond de l'ordre de 63%. De plus, on note un coefficient de transmission de l'ordre de 70% au voisinage de $1.55 \mu\text{m}$, sa réflexion est quasi nulle, ceci est dû à la présence de BIPs à cette longueur d'onde.

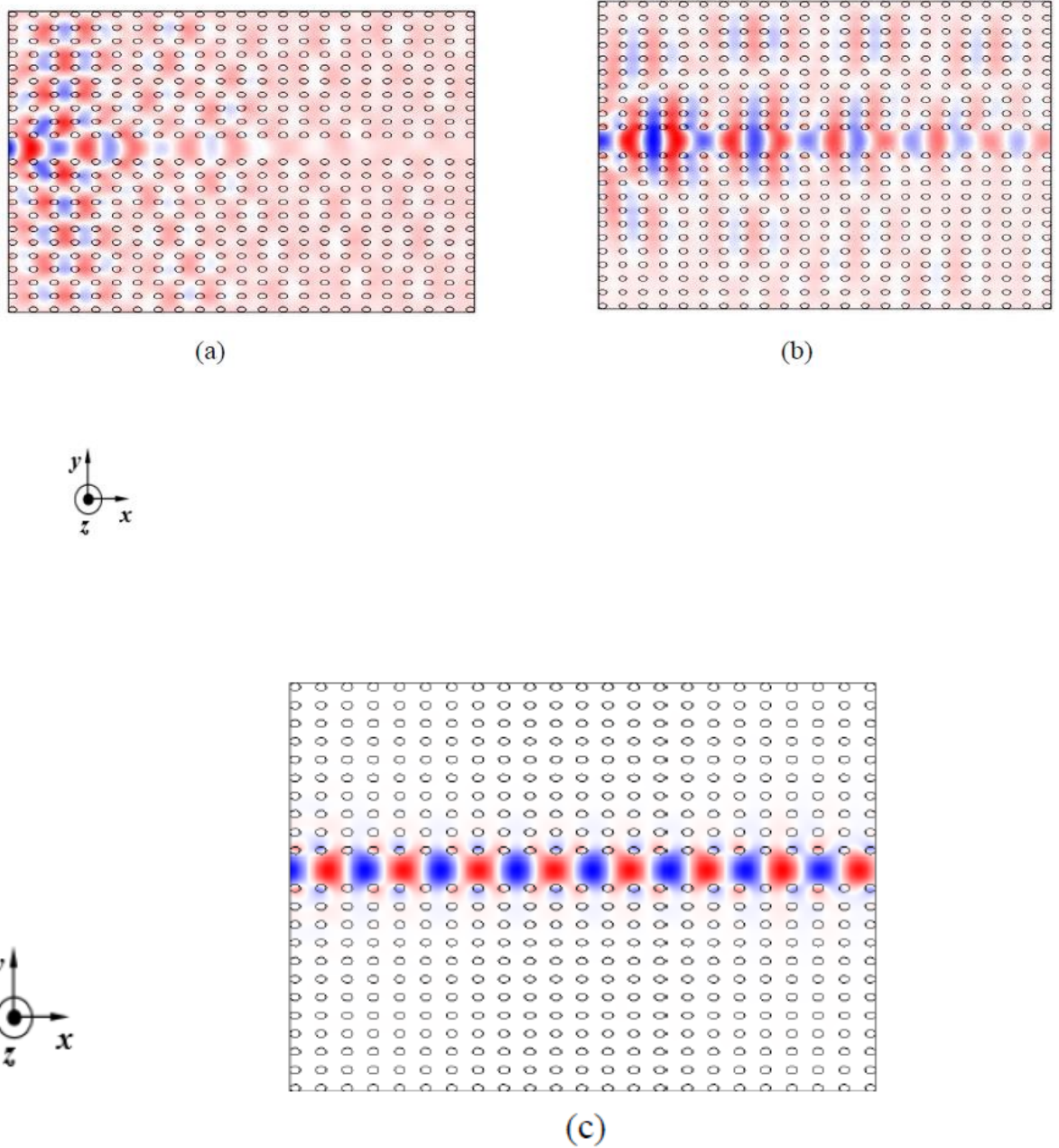


Figure III.8: Répartition du champ électrique d'un guide mono rangée à base de CPs à maille carrée pour différentes longueurs d'onde en mode TE: (a) pour $\lambda=1.31 \mu\text{m}$ et (b) pour $\lambda= 1.37 \mu\text{m}$. (c) pour $\lambda= 1.55 \mu\text{m}$.

La distribution spatio-temporelle du champ électrique à l'intérieur du guide monorangée est illustrée à la figure III.8. La forme de la distribution du champ EZ montre le confinement

du champ électromagnétique et l'existence d'un phénomène de guidage de la lumière le long du guide d'onde.

III.5 Filtre Channel drop à base de CPs :

Le filtre proposé est conçu en utilisant un cristal photonique à deux dimensions constituées de piliers diélectriques en GaAs de section circulaire plongé dans l'air dans un réseau carré de période $a=0.64 \mu\text{m}$, et de rayon normalisé des tiges $r/a= 0.19$ leur indice de réfraction n_{GaAs} . Ces types de filtre sont appelé filtre channel drop (CDF). Dans la figure III. 9, la structure est constitué 17 rangées de long et 17 rangées de large correspond à un filtre appelé channel drop (CDF). Ce filtre se compose d'un guide d'onde bus, d'un guide drop et d'un résonateur en anneau hexagonal. Par ailleurs, il contient trois port 'A', 'B' et 'C'. Les ports 'A' et 'B' sont les terminaux de sortie du guide bus, alors que le port C désigne le canal terminal du guide drop. Les spectres de la transmission normalisée du filtre Channel drop sont obtenus à l'aide du simulateur ComsolMultiphysics.

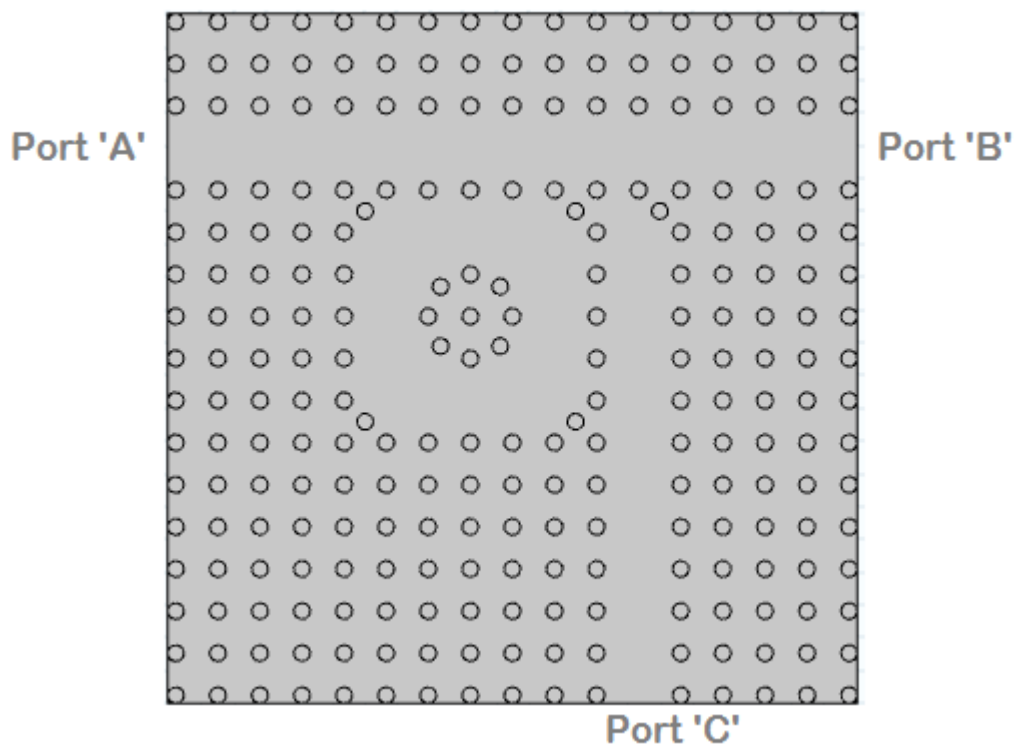


Figure III. 9: Structure schématique.

Les spectres de transmission normalisés correspondant aux ports 'B' associés au guide d'onde Bus et au guide d'onde drop 'C' sont également analysés dans la figure III. 10. Nous pouvons clairement voir sur le spectre de transmission l'existence d'un pic de résonance à $\lambda =$

1.5498 μm avec un taux de transmission de 93%, ce qui correspond à l'efficacité d'extraction du filtre.

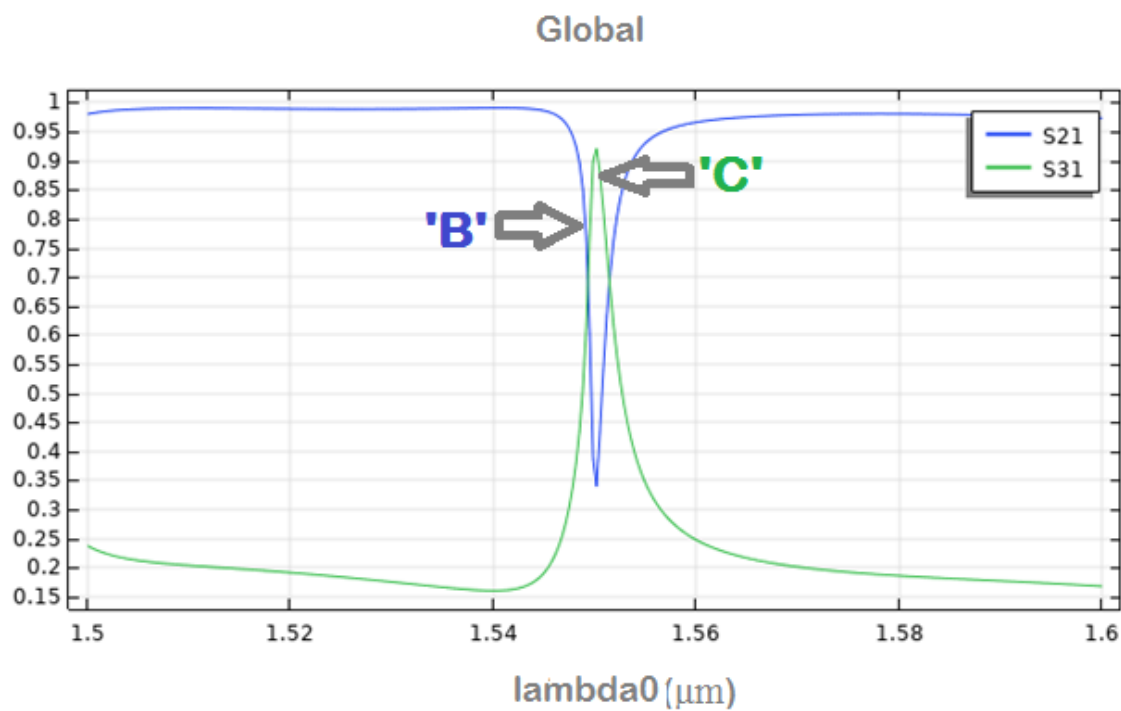


Figure III. 10: Spectre de transmission du CDF aux ports 'B' et 'C'.

Figure III. 11 représente la répartition du champ électrique E_z dans le filtre proposé. On remarque, à partir de cette figure, un transfert d'énergie de l'onde injectée à l'entrée de la structure vers le port de sortie 'C', d'où l'apparition du phénomène appelé "dropping"

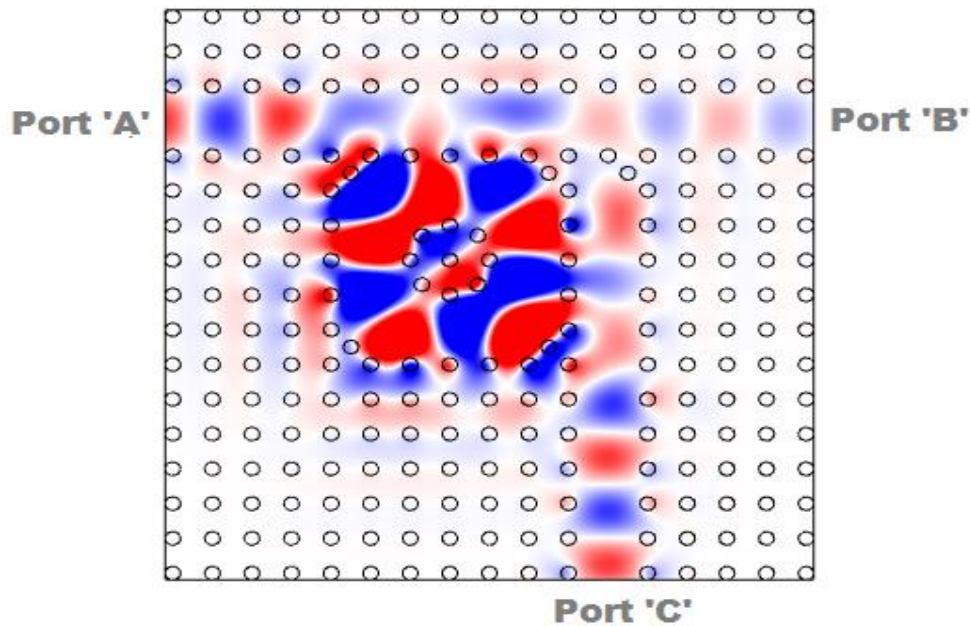


Figure III. 11: Répartition du champ électrique dans le CDF en polarisation TE.

D'après la figure III. 11, à la longueur d'onde de résonance ($\lambda = 1.5498\mu\text{m}$), le signal est complètement extrait du guide d'onde bus et transféré ensuite au guide d'onde drop via le résonateur.

III.6 Les diviseurs à base de résonateur :

III.6.1 Structure d'un diviseur 1×2 à base de résonateur :

En premier lieu, nous avons réalisé un diviseur 1×2 formé d'une seule entrée et deux ports de sorties à partir de l'intersection de deux filtres Channel drop. Les cristaux photoniques à deux dimensions constituées de piliers diélectriques en GaAs de section circulaire plongé dans air dans un réseau carré les paramètres de réseau sont choisis pour permettre un fonctionnement aux alentours de la longueur d'onde $1.55\mu\text{m}$ très utilisé en télécommunication optique.

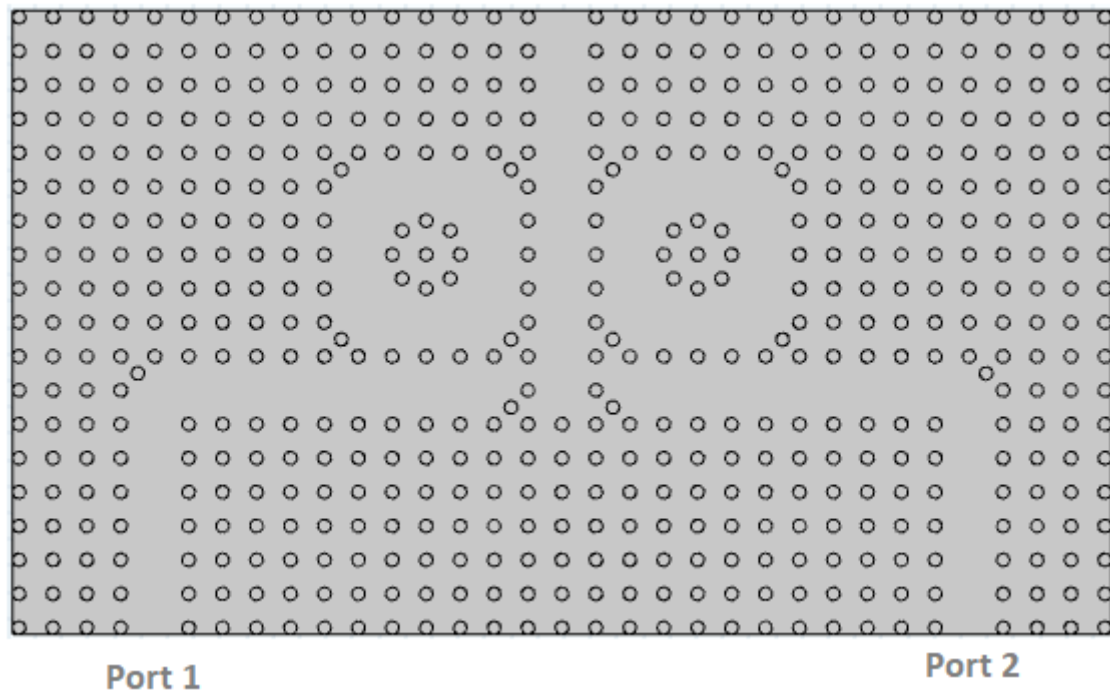


Figure III.12: Structure schématique du diviseur 1×2 à base de résonateur.

Figure III.13 présente la réponse spectrale en matière de transmission de la structure présentée dans la figure. III.12. Sur la même figure, nous observons l’existence d’un pic résonant $\lambda = 1.5498\mu\text{m}$, obtenu aux deux sorties du diviseur avec un taux de transmission de 45 % à chaque sortie. On ne peut pas atteindre 50% à chaque sortie parce qu'on n'a pas obtenu dans le filtre channel drop un taux de transmission 100%.

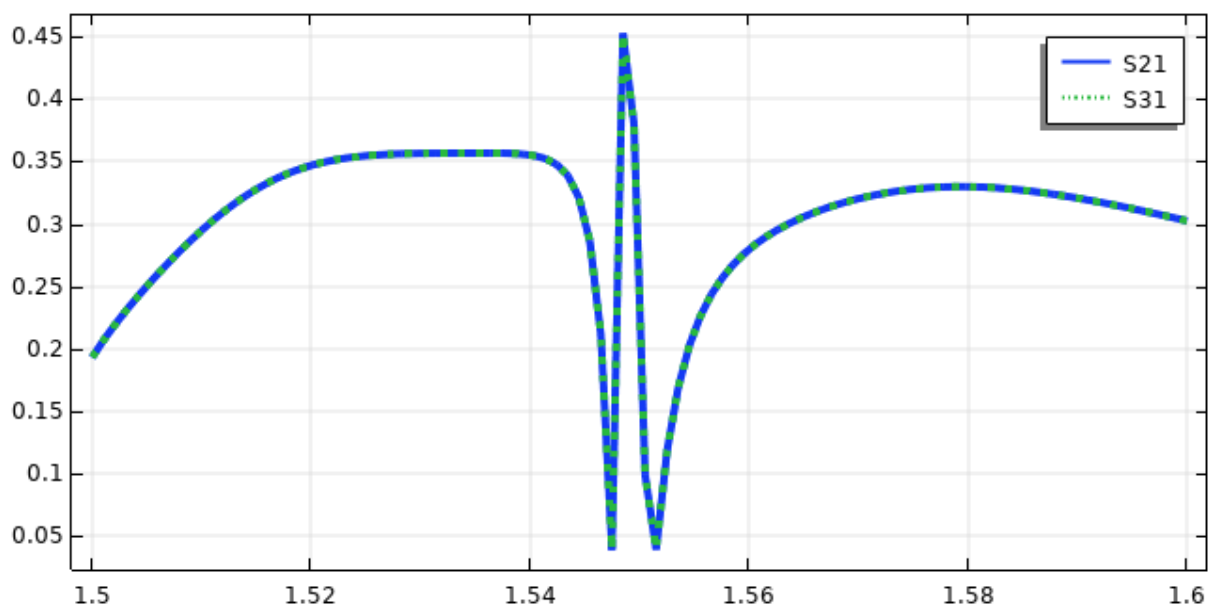


Figure III.13 : Spectre de transmission du diviseur 1×2.

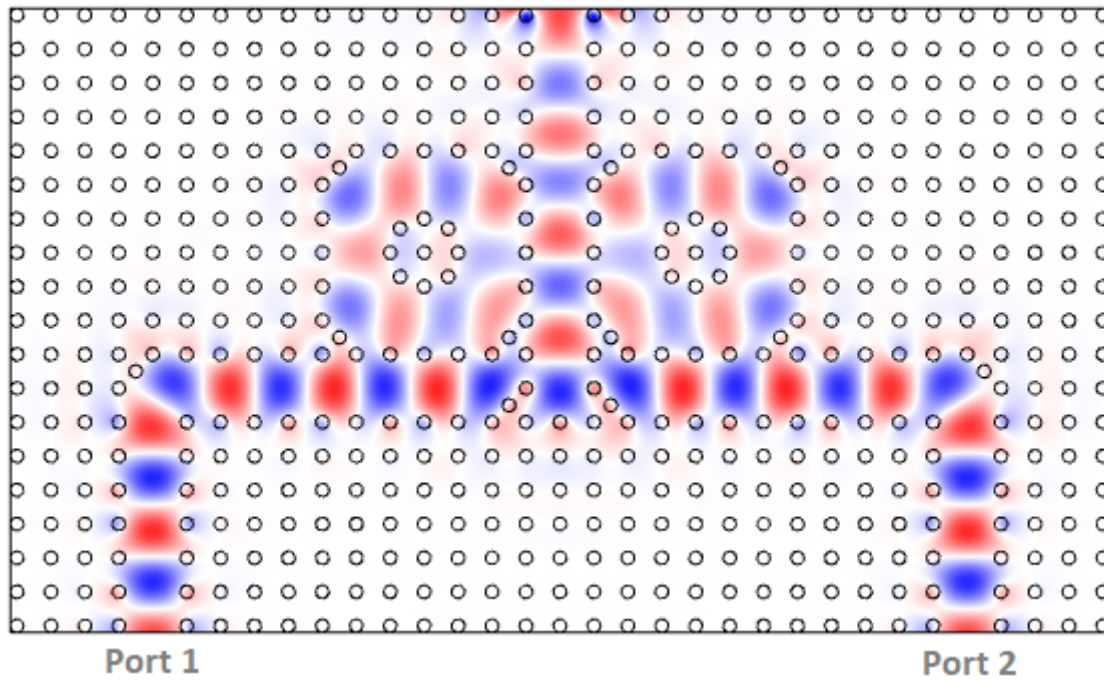


Figure III.14: Répartition de champ électrique E_z dans le diviseur 1×2 à la longueur d'onde $1.5498 \mu\text{m}$ (à résonance).

Comme le montre la figure III.14, à la longueur d'onde $\lambda = 1.5498 \mu\text{m}$ (à résonance), le signal est complètement extrait des deux filtres Channel drop vers les deux sorties.

III.6.2 Structure d'un diviseur 1×4 à base de résonateur:

Premièrement, nous avons créé un diviseur 1×4 formé d'une seule entrée et quatre sorties à partir de trois diviseurs 1×2 . Le cristal photonique à deux dimensions constitué de piliers diélectriques en GaAs de section circulaire plongé dans l'air dans un réseau carré. Les paramètres de réseau sont choisis pour permettre un fonctionnement aux alentours de la longueur d'onde $1,55 \mu\text{m}$ très utilisé en télécommunication optique.

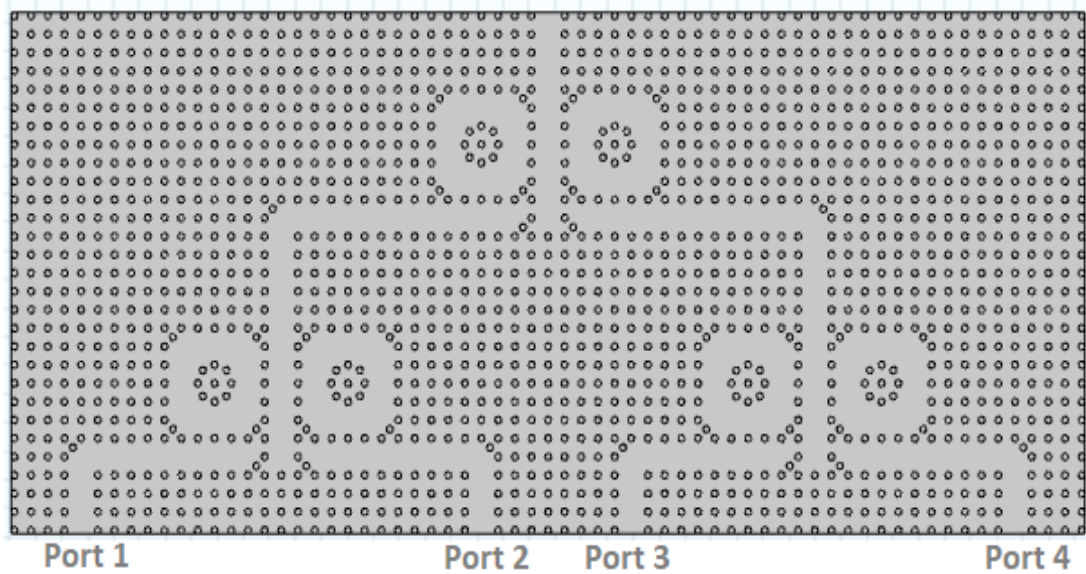


Figure III.15 : Structure schématique du diviseur 1×4 à base de résonateur.

Figure III.16 présente la réponse spectrale en termes de transmission de la structure présentée dans la figure. III.15. Sur la même figure, nous remarquons l'existence d'un pic résonant à $\lambda = 1.5498\mu\text{m}$, obtenu au niveau des quatre sorties du diviseur avec un taux de transmission de 18%, 18%, 21%, 24% à chaque sortie respectivement. En principe, il faut obtenir 25% à chaque sortie mais ce n'est pas possible parce que le diviseur 1×2 qu'on utilise pour la création du diviseur 1×4 atteint un taux de transmission de 45%.

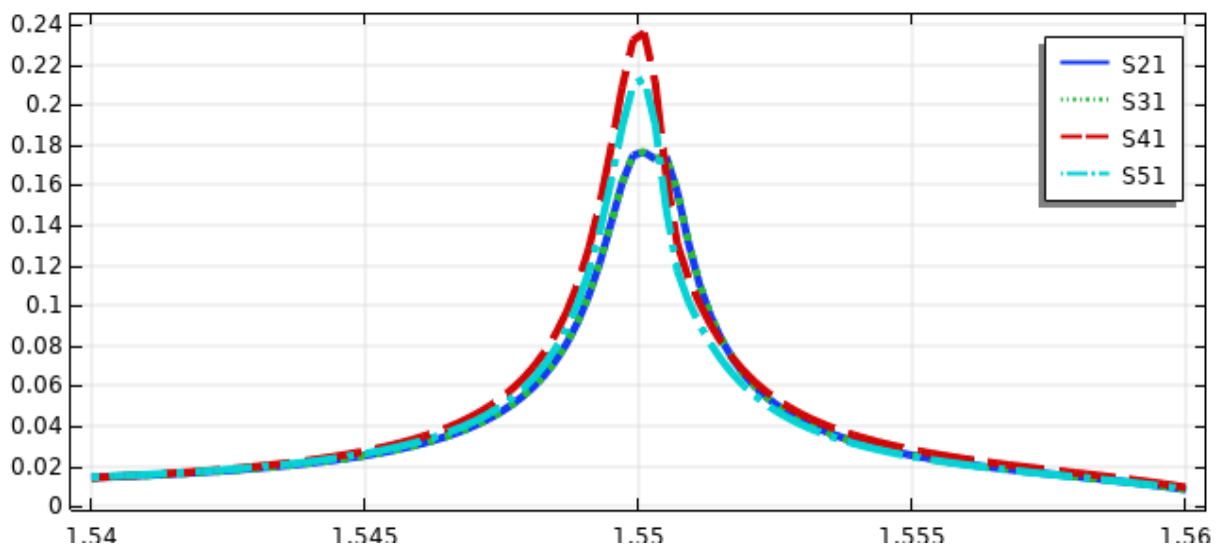


Figure III.16 : Spectre de transmission du diviseur 1×4.

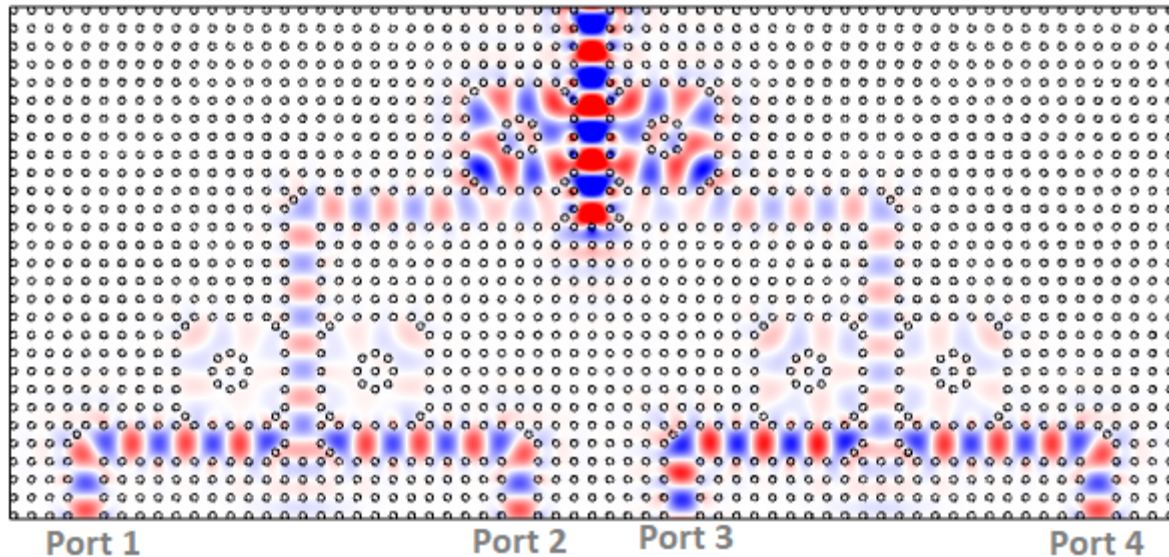


Figure III.17: Répartition de champ électrique E_z dans le diviseur 1×4 à la longueur d'onde $1.5498 \mu\text{m}$ (à résonance).

Dans la figure III.17, à la longueur d'onde $\lambda = 1.5498 \mu\text{m}$ (à résonance), le signal est complètement extrait à travers du trois diviseur vers les quatre sorties.

III.7 Conclusion:

L'idée de ce chapitre était d'étudier le fonctionnement des diviseurs 1×2 et 1×4 à base des cristaux photoniques. Le travail a été divisé en plusieurs parties, en premier lieu nous avons étudié les structures bidimensionnelles avec défaut et sans défaut dans un réseau carré. Nous avons ensuite examiné la structure et le fonctionnement d'un filtre Channel drop et nous avons eu une longueur d'onde $\lambda = 1.5498 \mu\text{m}$ ce qui est satisfaisant en plus une répartition équitable sur la porte de sortie avec un taux de transmission de 93%. Ultérieurement, nous avons analysé la structure et le fonctionnement d'un diviseur 1×2 qui on a créé avec deux filtres Channel drop. Après la simulation, nous avons obtenu à la sortie du diviseur un maximum de transmission des portes 1 et 2 à une longueur d'onde $\lambda = 1.5498 \mu\text{m}$ avec 45% d'efficacité. D'après la simulation précédente, nous avons examiné la structure et le fonctionnement d'un diviseur 1×4 qu'on a créé avec trois diviseurs 1×2 . Par la suite, nous avons atteint à la sortie de diviseur un maximum de transmission des portes 1, 2, 3 et 4 à une longueur d'onde $\lambda = 1.5498 \mu\text{m}$ avec 18%, 18%, 21%, 24% d'efficacité respectivement. Chaque simulation est complémentaire à la simulation précédente, c'est-à-dire le diviseur 1×4 est fait d'un ensemble de diviseur 1×2 ou chaque sortie est divisée en deux pour obtenir 4 ports à la sortie.

III.8 Référence

[1] B.BOUHASSOUN, A.KADOUCI, « étude et simulation numérique des composants photoniques uni-dimensionnels », mémoire de Master , Université de Tlemcen, 2018.

[2] Dr. h.c. SvanteLittmarck, Mr. Farhad “SOCIETE ”, sur le site Comsol, [Online]. Available: <https://www.comsol.fr/company>. [Accessed : Juin 2017].

[3] BETTOUCHE Hanane Conception des filtres ultra-sélectifs hauts débits pour les systèmes DWDM, Université de Tlemcen, 2019.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Les cristaux photoniques (CPs) sont des structures artificielles réalisées dans le but d'ouvrir une bande interdite dans différentes directions, dans laquelle apparaît une bande de fréquence pour laquelle la lumière ne peut plus se propager. Ces caractéristiques rendent les cristaux photoniques intéressants pour de nombreuses applications en optique intégrée. Les possibilités d'application des cristaux photoniques sont très vastes : réalisation de cavités résonantes de très petite taille, de guides d'ondes, de spires, de filtres sélectifs, de séparateurs de faisceaux, ... etc.

L'objectif de ce mémoire est la réalisation d'un diviseur à base de résonateur en cristaux photoniques.

Dans le premier chapitre, nous avons mentionné un bref historique sur les cristaux photoniques puis nous avons étudié les différents types des cristaux photoniques et, nous nous sommes intéressés à leur bande interdite suivant un, deux ou les trois axes pour les cristaux photoniques 1D, 2D ou 3D respectivement. Nous avons détaillé le cristal photonique 2D planaire utilisé comme choix préféré pour la conception de nos structures. A la fin de ce chapitre, nous avons présenté quelle application des CPs.

Dans le deuxième chapitre, nous avons étudié les différentes structures et fonctions à base de CPs, et nous avons focalisé sur les diviseurs à base de PC. Par la suite, nous avons présenté quelques travaux réalisés sur les diviseurs à base CP et les différents types de ce dernier.

Dans le dernier chapitre, nous avons conçu et simulé des différentes topologies des diviseurs à base des cristaux photoniques bidimensionnels en utilisant le logiciel ComsolMultiphysics.