

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

Université Abderrahmane Mira de Bejaia



Faculté de la Technologie



Département d'Automatique, Télécommunication et d'Electronique

Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : **Télécommunications**

Spécialités : **Systems des Télécommunications**

Thème

Etude et conception d'un filtre à extraction à base de résonateurs en annaux à cristaux photoniques

Réalisé par :

- SANAA Anissa
- FENGAL Fairouz

Encadré par :

Mme. BENDJELLOUL Rahima

Examiné par :

- Mme. Hamzaoui
- Mr. Khiredine

Année universitaire : 2022/2023

Remerciements

En préambule de ce mémoire, nous tenons à exprimer notre gratitude envers Allah qui nous a aidés, nous a accordé patience et courage tout au long de ces années d'études.

Nous tenons à remercier sincèrement, **Mme BENDJELLOUL Rahima** notre encadreur, qui était toujours à l'écoute et disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Nos sincères et chaleureux remerciements, aux membres du jury **Mme Hamzaoui** et **Mr Khiredine**, qui ont aimablement accepté de nous honorer en lisant ce mémoire pour évaluer et apprécier notre travail.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours soutenues et encouragées au cours de la réalisation de ce mémoire.

Merci à tous.

Dédicace

Je dédie ce travail à :

A mes chers parents qui m'ont toujours soutenue et encouragé durant toute ma vie et mes études, Que dieu les protèges et les garde pour moi.

Je dédie ce travail :

A mes chers frères et ma chère sœur ainsi qu'à tous mes amis.

A mes professeurs qui m'ont enseigné et qui par leurs compétences m'ont soutenu dans la poursuite de mes études.

S. Anissa

Dédicace

Je dédie ce travail :

A mes très chers parents qui m'ont aidé et encouragé durant toute ma vie et mes études.

A mes chers frères.

A mes chères sœurs

Et à mes amis.

F. Fairouz

Table des matières

| | |
|--|-----------|
| Introduction générale..... | 1 |
| Chapitre 1..... | 3 |
| Généralités sur les cristaux photoniques..... | 3 |
| I.1. Introduction..... | 4 |
| I .2. Définition des cristaux photoniques..... | 4 |
| I.3. Type des cristaux photoniques..... | 5 |
| I.3.1. Cristal photonique unidimensionnel :..... | 5 |
| I.3.2. Cristal photonique bidimensionnel..... | 5 |
| I.3.2.1. Différentes familles des cristaux photoniques bidimensionnels. | 6 |
| I.3.2.2. Diagrammes de bandes..... | 7 |
| I.3.2.3. Carte des bandes interdites..... | 9 |
| I.3.3. Cristal photonique tridimensionnel :..... | 10 |
| I.3.3.1. La Yablonovitch..... | 10 |
| I.3.3.2 Structure tas de bois..... | 11 |
| I.4. Défauts dans les cristaux photoniques..... | 11 |
| I.4.1. Défauts ponctuels..... | 12 |
| I.4.2. Les défauts linéaires..... | 12 |
| I.5. Application des cristaux photoniques..... | 13 |
| I.5.1. Guide d'onde à base de CPs..... | 13 |
| I.5.2. Diviseur de puissance à base de CPs..... | 14 |
| I.6. Techniques de modélisation..... | 14 |
| I.6.1. La méthode des ondes planes (PWE)..... | 14 |
| I.6.2. La méthode FDTD (Finite Différence Time Domain)..... | 15 |
| I.6.3. La méthode des réseaux de diffraction..... | 15 |
| I.7. Conclusion..... | 15 |
| Référence..... | 16 |
| Chapitre II..... | 18 |
| Filtrage dans les cristaux photoniques..... | 18 |
| II.1. Introduction..... | 19 |

| | |
|---|-----------|
| II.2. Filtrage dans les cristaux photoniques | 19 |
| II.3. Filtre Channel drop à base de résonateur en anneaux à cristal photonique | 20 |
| II.3.1. Résonateur en anneau à cristaux photonique | 21 |
| II.3.2 Caractéristique des résonateurs en anneaux : | 22 |
| II.3.2.1. Facteur de qualité (Q) : | 22 |
| II.3.2.2. Finesse | 23 |
| II.4. Couplage des résonateurs avec les guides d'onde..... | 23 |
| II.5. Quelques topologies | 24 |
| II.5.1. Filtre à résonateur en anneau de forme Carrée..... | 24 |
| II.5.2. Filtre à résonateur en anneau de forme hexagonale..... | 25 |
| II.6. Application des filtres à extraction..... | 26 |
| II.7. Conclusion | 28 |
| Références..... | 29 |
| Chapitre III | 32 |
| Résultats et interprétations..... | 32 |
| III.1. Introduction | 33 |
| III.2. Présentation du logiciel Rsoft..... | 33 |
| III.2.1 Simulateur Fullwave..... | 33 |
| III.2.2 Simulateur bandSolve..... | 34 |
| III.3 Structure d'étude | 35 |
| III.4. Filtre à base de résonateur en anneau : Système à quatre ports [1]. . | 36 |
| III.4.1. Structure de base | 36 |
| III.4.2. Structure modifiée | 37 |
| III.4.3. Structure finale | 42 |
| III.5. Filtre à base de PCRR : système à trois ports | 43 |
| III.5.1. Structure de base | 43 |
| III.5.2. Structure modifiée | 44 |
| III.5.3. Structure finale | 48 |
| III.6. Conclusion..... | 50 |

Référence.....52

Conclusion générale 52

Liste des figures

Chapitre I Généralités sur les cristaux photoniques

| | |
|---|----|
| Figure I.1 : Représentation des cristaux photoniques..... | 4 |
| Figure I.2 : Cristal photonique à une dimension..... | 5 |
| Figure I.3 : Structures bidimensionnelles : (a) réseaux de tiges dans l'air et (b) réseau de trous d'air dans un diélectrique..... | 6 |
| Figure I.4 : Structure 2D : (a) réseau carré, (b) réseau triangulaire, et (c) réseau hexagonal [5] | 7 |
| Figure I.5 : Première zone de Brillouin pour (a) un réseau triangulaire et (b) un réseau carré..... | 8 |
| Figure I.6 : Diagrammes de bandes d'une structure bidimensionnelle pour les polarisations TE (en rouge) et TM (en bleu) pour (a) un réseau carré et (b) un réseau triangulaire [9] ... | 9 |
| Figure I.7 : Cartes des bandes interdites d'un réseau de trous d'air dans une matrice diélectrique ($\epsilon=12.25$) : (a) réseau triangulaire, (b) réseau carré [13] | 10 |
| Figure I.8 : cristal photonique tridimensionnel..... | 10 |
| Figure I.9 : Structure Yablonovitch [5] | 11 |
| Figure I.10 : Structure tas de bois..... | 11 |
| Figure I.11 : Exemples de défauts ponctuels dans un cristal photonique composé de tiges diélectriques : (a) Retrait d'un cylindre et (b) modification de la constante diélectrique d'un cylindre [2] | 12 |
| Figure I.12 : Différents types de défauts linéaires : Modification de la taille des motifs (a), (b) Modification de la constante diélectrique des motifs et (c) suppression d'une rangée de motifs [11]..... | 13 |
| Figure I.13 : Guide d'ondes réalisé dans un cristal photonique : (a) structure linéique et (b) structure du virage..... | 14 |
| Figure I.14 : Diviseur de type jonction..... | 14 |

Chapitre II : Filtrage dans les cristaux photoniques

| | |
|--|----|
| Figure II.1 : Représentation d'un filtre add /drop [5] | 21 |
| Figure II.2 : Image en microscopie électronique d'une fonction Fabry- Perot intégrée à un guide [6] | 21 |

Figure II.3 : Résonateurs en anneaux à cristaux photoniques (Photonic Crystal ring resonators, PCRRs) : (a) un anneau quasi-carré dans un réseau carré, (b) un anneau hexagonal dans un réseau triangulaire, et (c) un anneau circulaire dans un quasi-cristal photonique [9].....23

Figure II.4 : largeur spectral d'un résonateur en anneau.....24

Figure II.5 : Représentation schématique d'un filtre channel drop.....25

Figure II.6 :(a) Structure schématique du filtre proposé par [18] et (b) son spectre de transmission.....26

Figure II.7 : (a) Structure schématique du filtre proposé par [19] et (b) son spectre de transmission.....27

Figure II.8 :(a) Structure schématique du démultiplexeur proposé par [20] et (b) son spectre de transmission.....29

Figure II.9 : (a) Structure schématique du démultiplexeur proposé par [21] et (b) son spectre de transmission.....29

Chapitre III *Résultat et interprétation*

Figure III.1 : fenêtre du programme Rsoft CAD.....34

Figure III.2 : Fenêtre du simulateur Fullwave.....35

Figure III.3 : Fenêtre du module BandSOLVE.....36

Figure III.4 : (a) Structure schématique d'un CP-2D et son (b) digramme de bande.....37

Figure III.5 : (a) Structure schématique du filtre proposé et son (b) spectre de transmission.....38

Figure III.6 : Structure avec l'ajout des tiges R_a 39

Figure III.7 : Spectre de transmission du filtre proposé avec l'ajout des tiges R_a 39

Figure III.8 : Structure schématique du filtre pour $R_s = 0.075\mu\text{m}$41

Figure III.9 : Spectre de transmission du filtre proposé avec $R_s = 0.075\mu\text{m}$41

| | |
|--|----|
| Figure III.10 : (a) structure schématique du filtre pour $D_c=2$ et (b) son spectre de transmission..... | 42 |
| Figure III.11 : (a) structure schématique du filtre pour $D_c=3$ et son (b) spectre de transmission..... | 43 |
| Figure III.12 : (a) la structure finale optimisée et (b) son spectre de transmission..... | 44 |
| Figure III.13 : Cartographies du champ pour les longueurs d'onde : (a) $\lambda = 1.5338 \mu\text{m}$ et (b) $1.5503 \mu\text{m}$ | 44 |
| Figure III.14 : (a) Structure schématique du filtre en forme de T et son (b) spectre de transmission. | 45 |
| Figure III.15 : (a) structure schématique du filtre et son (b) spectre de transmission..... | 47 |
| Figure III.16 : structure proposé avec modification le rayon des tiges de dispersion..... | 47 |
| Figure II. 17 : (a) structure schématique du filtre pour $D_c=2$ et son (b) spectre de transmission..... | 49 |
| Figure III.18 : Structure finale du filtre et son (b) spectre de transmission..... | 50 |
| Figure III.19 : Cartographies du champ pour les longueurs d'onde : (a) $\lambda = 1.5336 \mu\text{m}$ et (b) $1.5502 \mu\text{m}$ | 50 |

Liste des abréviations

1D : Unidimensionnel.

2D : Bidimensionnel.

3D : Tridimensionnels.

BIP : Bande Interdite Photonique.

CDF : Channel Drop Filter, filtre à extraction.

CPs : Cristaux photoniques.

FDTD : Finite-Difference Time-Domain method, méthode de calcul des différences finies dans le domaine temporel.

FWHM : Full Width at Half Maximum, largeur à mi-hauteur

ISL : Intervalle Spectral Libre ou Free Spectral Range, FSR.

PCRR : Photonic Crystal Ring Resonator, résonateur en anneau à cristal photonique.

PWE : Plane Wave Expansion method, méthode de décomposition en ondes planes.

TE : Transverse Electrique, polarisation TE.

TM : Transverse Magnétique, polarisation TM.

WDM : Wavelength Division Multiplexing, systèmes à multiplexage en longueur d'onde.

ZB : zone de Brillouin

Liste des tableaux

Tableau III.1 : Influence de la variation du rayon des tiges de dispersion sur les caractéristiques du filtre.....40

Tableau III.2 : Influence de la distance de couplage sur la transmission et le facteur de qualité du filtre.....42

Tableau III.3 : Influence de la longueur du réflecteur sur la transmission et le facteur de qualité du filtre.....46

Tableau III.4 : Influence du rayon des tiges de dispersion sur la transmission et le facteur de qualité du filtre.....47

Tableau III.5 : Influence de la distance de couplage sur la transmission et le facteur de qualité du filtre.49

Introduction Générale

Introduction générale

Les cristaux photoniques ont suscité un très vif intérêt dans le domaine de l'optique en la lumière est interdite. Cette capacité à contrôler les propriétés de transmission de la lumière en fait d'eux des candidats prometteurs pour le développement de dispositifs optiques avancés.

En plus de leurs propriétés de contrôle de la lumière, les cristaux photoniques offrent également la possibilité de créer des modes de confinement de la lumière, ce qui permet d'obtenir des dispositifs optiques à haute efficacité et à faibles pertes. Ces structures peuvent être conçues pour fonctionner dans différentes gammes de longueurs d'onde, ce qui les rend adaptées à une variété d'applications, allant des communications optiques à haute vitesse à la détection.

Les filtres à base de résonateurs en anneaux à cristaux photoniques constituent une application importante des cristaux photoniques dans le domaine de l'optique et des télécommunications. Leur capacité à sélectionner et à filtrer les longueurs d'onde spécifiques ouvre la voie à de nombreuses applications dans les communications optiques. C'est dans ce contexte que va s'inscrire notre travail, où nous nous concentrons sur la conception des filtres à base de cristaux photoniques, sur leur optimisation et leurs performances.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré aux généralités sur les cristaux photoniques. Nous exposerons le concept des cristaux photonique et leurs différentes classes, et le phénomène d'ouverture de bande interdite. Ensuite nous détaillerons le cas des cristaux bidimensionnels. Les différents types de défauts des structures 2D seront décrits. Nous citerons aussi quelques exemples d'application utilisant ces structures. Nous finirons ce chapitre par décrire quelques méthodes de modélisation des cristaux photoniques.

Le deuxième chapitre s'intéressera aux filtres à extraction à base de résonateurs en anneaux à cristaux photoniques. Ce chapitre nous fournira les connaissances nécessaires pour aborder de manière approfondie l'étude des filtres à extraction à base de résonateurs en anneaux à cristaux photoniques dans le chapitre suivant.

Le dernier chapitre sera dédié à l'analyse des résultats de simulation de la structure des filtres à résonateurs, et permettra de tirer des conclusions quant à leur faisabilité et leurs performances. Il servira également de base pour des études futures visant à améliorer encore davantage ce type de filtres à cristaux photoniques.

À la fin de ce travail, nous présenterons une conclusion générale qui résumera les principaux résultats, les contributions et les limitations de notre étude sur les filtres à base de résonateurs en anneaux à cristaux photoniques.

Chapitre 1

Généralités sur les cristaux photoniques

I.1. Introduction

Les cristaux photoniques représentent une avancée majeure dans le domaine de l'optique en permettant un contrôle précis de la propagation de la lumière à l'échelle nanométrique. Leur potentiel pour créer des dispositifs optiques innovants et performants ouvre de nouvelles possibilités dans de nombreux domaines de l'optique et de la photonique.

Ce premier chapitre offre un aperçu des généralités des cristaux photoniques. Il explore les différentes catégories de cristaux photoniques, leurs applications potentielles, les défauts qui peuvent être créés au sein de ces cristaux, ainsi que les techniques de modélisation utilisés pour leur réalisation.

I.2. Définition des cristaux photoniques

Un cristal photonique, également connu sous le nom de matériau à bande interdite photonique (BIP), est un matériau artificiel ou naturel dont la constante diélectrique varie périodiquement à l'échelle de la longueur d'onde dans une ou plusieurs directions de l'espace, comme le montre la figure I.1. Par analogie avec les bandes d'énergie électronique interdites qui caractérisent les réseaux atomiques, les structures photoniques possèdent des bandes de fréquences interdites dans lesquelles les ondes électromagnétiques ne peuvent se propager[1]. Cette propriété intéressante ouvre la possibilité aux cristaux photoniques de contrôler la propagation des ondes électromagnétiques, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives sur la manipulation de la lumière.

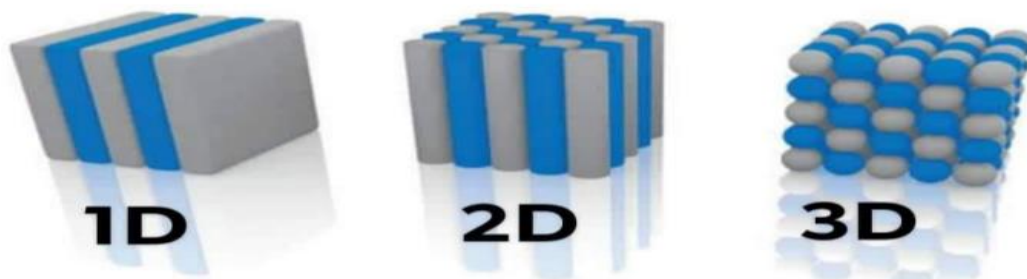


Figure I.1 : Représentation des cristaux photoniques.

I.3. Type des cristaux photoniques

Les cristaux photoniques peuvent être classés en trois catégories principales en fonction de leur structure :

- Structure unidimensionnelle : cristaux photoniques 1D.
- Structure bidimensionnelles : cristaux photoniques 2D.
- Structure tridimensionnelles : cristaux photoniques 3D.

I.3.1. Cristal photonique unidimensionnel :

Ces structures sont couramment connues sous le nom de réseaux de Bragg [2]. Ils se composent d'un empilement de couches d'indice de réfraction différent n_1 et n_2 (figure I.2). À chaque interface entre deux couches, la lumière est partiellement réfléchi et transmise. Selon la valeur des déphasages, on obtient des interférences destructives ou constructives. Les interférences constructives des ondes réfléchies entraînent une réflexion totale. Ainsi, pour certaines longueurs d'onde, la structure multicouche se comporte comme un miroir [3].

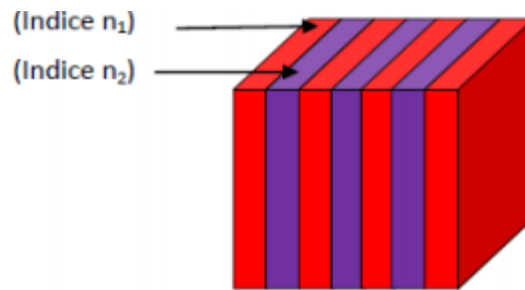


Figure I.2 : Cristal photonique à une dimension.

I.3.2. Cristal photonique bidimensionnel

Un cristal photonique bidimensionnel est une structure qui présente une modulation périodique de la permittivité diélectrique selon deux directions de l'espace, et homogène dans la troisième. Les propriétés optiques des structures bidimensionnelles sont fortement dépendantes de la polarisation des ondes électromagnétiques. Il existe plusieurs façons de réaliser ces structures, Par exemple, placer des tiges diélectriques dans l'air ou dans un autre diélectrique (figure I.3). Afin d'ouvrir des bandes interdites larges, un contraste d'indice (différence entre les indices du milieu et des tiges) doit être suffisamment grand [4]. Un CPs 2D peut également être constitué d'un ensemble de trous percés dans un diélectrique. La réponse optique de ces structures dépend de la polarisation et peut ne pas avoir une bande interdite complète. On parle de bande interdite complète lorsque la structure interdit la propagation dans toutes les directions du plan périodique, quelle que soit la polarisation.



(a) (b)
Figure I.3 : Structures bidimensionnelles : (a) réseaux de tiges dans l'air et (b) réseau de trous d'air dans un diélectrique.

I.3.2.1. Différentes familles des cristaux photoniques bidimensionnels

En ce qui concerne la forme du réseau périodique bidimensionnel (2D), on distingue généralement trois principales familles de réseaux :

Réseau carré : Dans un réseau carré, les éléments constitutifs du cristal photonique sont disposés de manière périodique selon une grille carrée, comme le montre la figure I.4.a. Chaque élément est en contact avec quatre voisins, formant ainsi une structure régulière et symétrique.

Réseau triangulaire : Dans un réseau triangulaire, les éléments constitutifs du cristal photonique sont disposés selon une grille triangulaire périodique, comme il est présenté sur la figure I.4.b. Chaque élément est en contact avec trois voisins, formant une structure à symétrie trigonale.

Réseau hexagonal : Dans un réseau hexagonal, les éléments constitutifs du cristal photonique sont arrangés selon une grille hexagonale périodique, comme il est illustré sur la figure I.4.c. Chaque élément est en contact avec six voisins, créant une structure régulière avec une symétrie hexagonale.

Ces trois familles de réseaux périodiques bidimensionnels offrent des caractéristiques optiques distinctes et sont adaptées à différents types d'applications. Le choix du réseau périodique dépend des besoins spécifiques de l'application [5, 6].

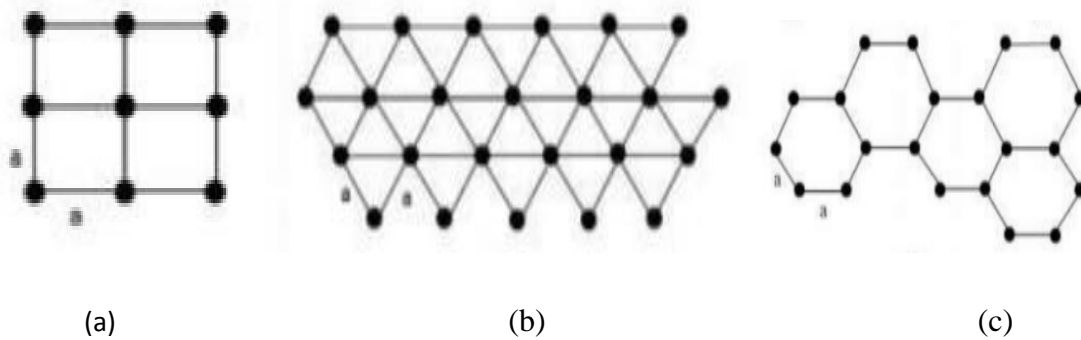


Figure I.4 : Structure 2D : (a) réseau carrée, (b) réseau triangulaire, et (c) réseau hexagonal [5].

I.3.2.2. Diagrammes de bandes

Le diagramme de bande est l'une des caractéristiques, la plus importante d'un cristal photonique. Il permet de représenter les fréquences possibles pour l'onde électromagnétique au sein du CP en fonction de son vecteur d'onde \vec{K} (sa direction de propagation au sein du cristal) [7,8].

I.3.2.2.a. Zone de Brillouin

Les zones de Brillouin sont des régions qui partitionnent l'espace réciproque associé au cristal. La première zone de Brillouin est le plus petit volume entièrement compris entre les plans médiateurs des segments (lignes qui relient un nœud donné à tous ses voisins) du réseau réciproque tracés à partir de l'origine [9]. On appelle zone de Brillouin irréductible la plus petite surface qui permet de déduire la relation de dispersion dans tout l'espace réciproque. Elle correspond à la plus petite surface qui peut être utilisée pour reconstruire la première zone de Brillouin (ZB) en utilisant les symétries du réseau réciproque [10]. La figure I.5 représente l'espace direct et réciproque ainsi que la première zone de Brillouin et la zone de Brillouin irréductible pour un réseau carré et triangulaire.



Figure I.5 : Première zone de Brillouin pour (a) un réseau triangulaire et (b) un réseau carré.

Afin d'expliquer le concept du diagramme de bandes interdites photoniques, prenons le cas d'un CP 2D constitué par un réseau de cylindres dans un réseau carré. A deux dimensions, les cristaux photoniques sont composés d'un réseau périodique de piliers de diélectrique dans l'air ou de trous d'air percés dans un diélectrique. Les deux réseaux les plus courants pour l'organisation des piliers (ou des trous) sont le réseau carré et le réseau triangulaire. Dans le cas du réseau carré, la zone de Brillouin est réduite à un triangle dont les sommets sont les points de haute symétrie de l'espace réciproque Γ , M et X [9]. Et pour le cas du réseau triangulaire, la zone de Brillouin est réduite à un triangle dont les sommets sont les points de haute symétrie de l'espace réciproque Γ , K, M. Le vecteur d'onde \vec{k} parcourt ainsi les directions de plus haute symétrie ΓM , ΓX et XM pour le réseau carré, et ΓM , ΓK et KM pour un réseau triangulaire.

Nous présentons sur la figure I.6 l'exemple d'un diagramme de bande calculés pour un réseau carré et triangulaire pour les deux polarisations TE et TM. Nous pouvons distinguer sur la figure I.6. a, une plage de fréquences dans laquelle aucun mode TM ne peut se propager dans la structure, c'est la bande interdite photonique en polarisation TM. Par contre pour les modes TE il n'existe pas de bande interdite photonique. Par conséquent, il n'y a pas de bande interdite complète pour ce réseau carré. Pour le réseau triangulaire (figure I.6. b), une large BIP est observée pour la polarisation TE, par contre, pour la polarisation TM le gap obtenu est réduit. En effet, un gap TE est facilement accessible avec une structure dont la matrice de haut indice

est connectée et à l'inverse, une structure dont le matériau de base indice est connecté (des piliers dans l'air par exemple) est plus favorable à l'ouverture d'un gap TM [9].

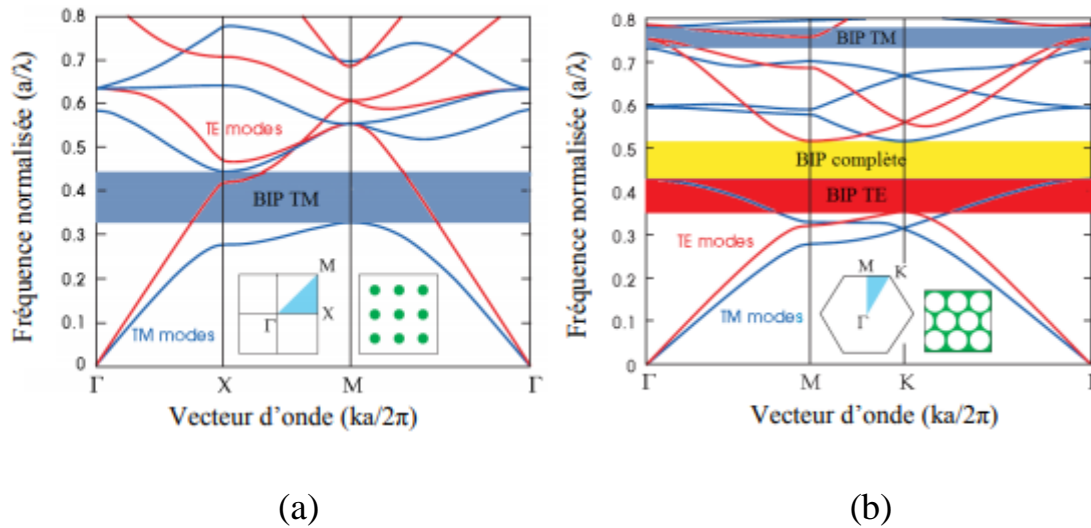


Figure I.6 : Diagrammes de bandes d'une structure bidimensionnelle pour les polarisations TE (en rouge) et TM (en bleu) pour (a) un réseau carré et (b) un réseau triangulaire [9].

I.3.2.3. Carte des bandes interdites

Les cartes de bandes interdites représentent les bords de bandes interdites pour un réseau donné en fonction du facteur de remplissage f (ou le rapport r/a). Elles donnent également un aperçu des possibilités de confinement de la lumière au sein du cristal photonique. Pour le réseau carré, les bandes interdites en polarisation TE et TM s'ouvrent respectivement pour $f = 35\%$ et $f = 50\%$ [11], et pour un réseau triangulaire, elles s'ouvrent respectivement pour $f = 11\%$ et $f = 63\%$. La région de bande interdite complète correspond à l'intersection des bandes interdites TE et TM. Le réseau triangulaire est généralement préféré au réseau carré. Les bandes interdites TE sont plus larges et s'ouvrent pour des facteurs de remplissage plus faibles. Ce qui le rend meilleur comparé au réseaux carré [12]. La figure I.7 illustre un exemple de calcul des cartes des bandes interdites pour les deux types de réseaux carré et triangulaire.

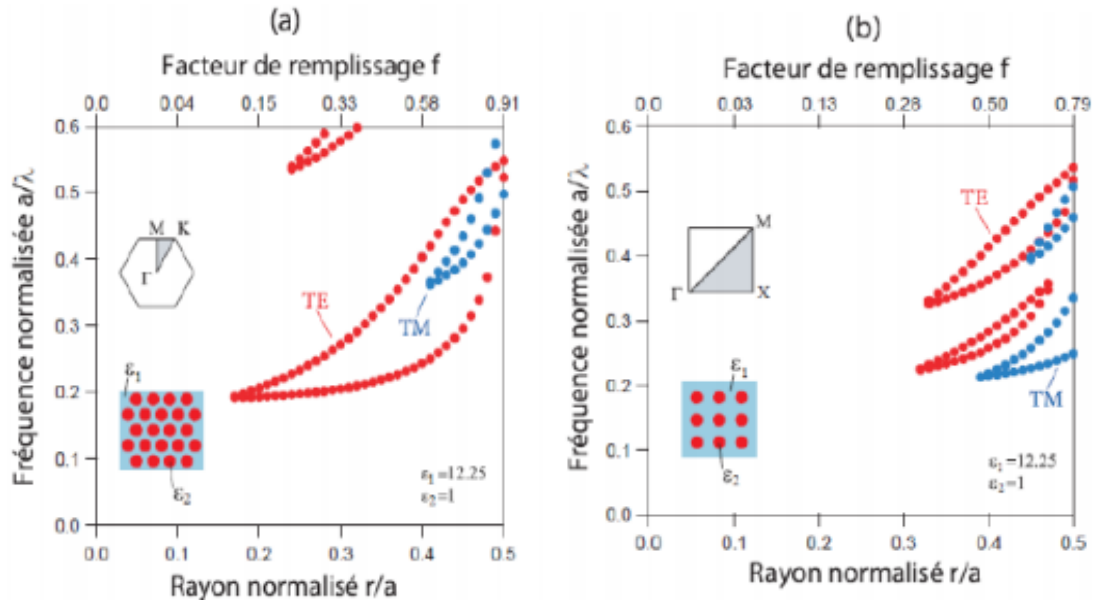


Figure I.7 : Cartes des bandes interdites d’un réseau de trous dans une matrice diélectrique ($\epsilon_1=12.25$ et $\epsilon_2=1$) : (a) réseau triangulaire, (b) réseau carré [13].

I.3.3. Cristal photonique tridimensionnel :

Les cristaux photoniques tridimensionnels sont des structures ayant la permittivité diélectrique structurée périodiquement dans les trois directions. Elles ont été réalisées par Yablonoitch après les réseaux de Bragg. Son objectif était d’obtenir une bande interdite complète sur toutes les directions de l’espace pour inhiber l’émission spontanée de la lumière (Figure I.8) [10].

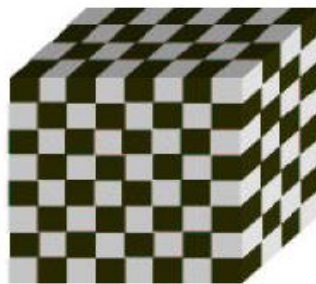


Figure I.8 : cristal photonique tridimensionnel.

Il existe plusieurs types de structures de cristaux photoniques tridimensionnels, chacune ayant ses propres caractéristiques optiques et applications spécifiques. Voici quelques exemples :

I.3.3.1. La Yablonoitch

C’est le premier Cristal photonique 3D découvert dans le monde. Il porte le nom de son inventeur “Yablonoitch”. Elle a été fabriquée en 1993 en perçant des trous dans un bloc

plexiglass selon trois angles différents 35.26° par rapport à la verticale (figure I.9). La structure est très proche de la structure du diamant [9].

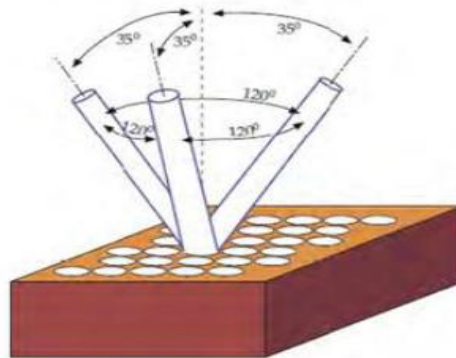


Figure I.9 : Structure Yablonovitch [5].

I.3.3.2 Structure tas de bois

Ces structures 3D sont obtenues en déposant par couches successives des rubans de silicium polycristallin dans des tranchées de silice. Après avoir bâti la structure, la silice est retirée pour obtenir un cristal photonique 3D dont le contraste d'indice est suffisant pour ouvrir une bande d'énergies interdites omnidirectionnelle [3] (figure I.10).

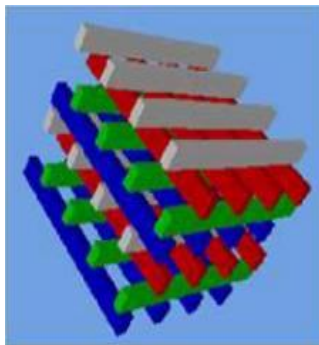


Figure I.10 : Structure tas de bois.

I.4. Défauts dans les cristaux photoniques

Les cristaux photoniques permettent la réalisation de véritables fonctions optiques et de contrôler le flux de lumière que lorsque des défauts sont introduits [14]. Les défauts dans les semi-conducteurs ont pour effet d'induire des niveaux d'énergie autorisés dans la bande interdite. La création de défauts dans un cristal photonique consiste à briser la périodicité du réseau et introduire des niveaux d'énergies permis dans la bande interdite. Il existe principalement deux types de défauts : le défaut ponctuel et le défaut linéaire [15].

I.4.1. Défauts ponctuels

Il est possible de modifier localement la constante diélectrique des cristaux photoniques bidimensionnels constitués de cylindres diélectriques. Ces derniers peuvent être retirés pour créer des espaces dans le cristal. Cela correspond aux microcavités dans les cristaux photoniques. Pour les cristaux photoniques bidimensionnels, constitués de trous dans un matériau diélectrique, ces trous peuvent être géométriquement modifiés. Un exemple de retrait d'un cylindre et de modification de la constante diélectrique d'un cylindre est illustré sur la figure I.11. Si on injecte un mode électromagnétique dont la fréquence est comprise dans la bande interdite photonique du cristal photonique, il sera complètement confiné car il est entouré de matière réfléchissante à cette longueur d'onde [2].



Figure I.11 : Exemples de défauts ponctuels dans un cristal photonique composé de tiges diélectriques : (a) Retrait d'un cylindre et (b) modification de la constante diélectrique d'un cylindre [2].

I.4.2. Les défauts linéaires

Ce type de défauts peut être créé en supprimant ou en modifiant une ou plusieurs rangées de motifs dans une ou plusieurs directions de la périodicité du cristal d'origine (figure I.12). Les défauts linéaires sont appelés aussi défauts étendus et peuvent servir de guides d'ondes [9, 11]. Il est possible de guider la lumière selon une direction choisie. La lumière va se propager le long de ce guide avec une fréquence appartenant à la bande interdite photonique du cristal [15].

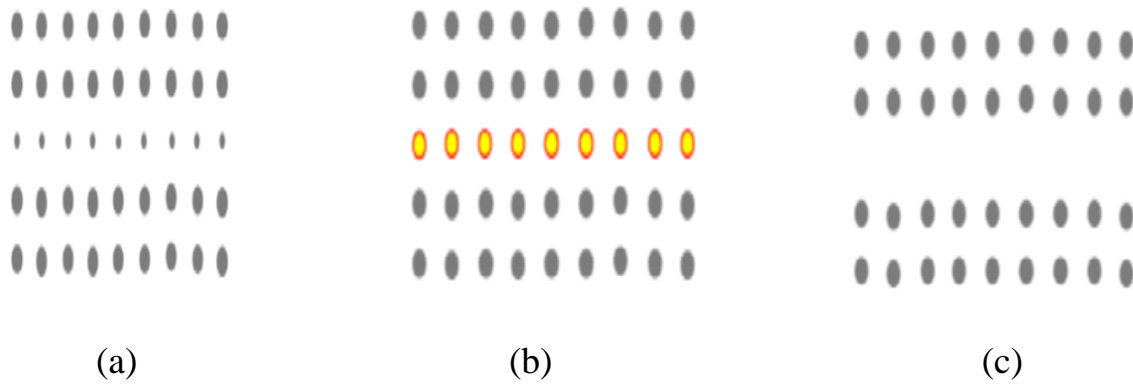


Figure I .12 : Différents types de défauts linéaires : Modification de la taille des motifs (a), (b) Modification de la constante diélectrique des motifs et (c) suppression d'une rangée de motifs [11].

I.5. Application des cristaux photoniques

Les applications des cristaux photoniques sont diverses et touchent de nombreux domaines. La plupart de ces applications sont dans l'optique, l'informatique, les micro-ondes et les télécommunications. Nous pouvons citer quelques exemples d'applications majeures des cristaux photoniques, tels que les cavités, les diviseurs de puissance, les guides d'ondes, les filtres, les capteurs et les multiplexeurs/démultiplexeurs. Nous allons donc détailler deux exemples dans le paragraphe suivant :

I.5.1. Guide d'onde à base de CPs

Les guides d'ondes sont créés à partir des défauts linéaires dans un cristal photonique. La lumière qui se propage dans le couloir du guide d'onde et possède une fréquence appartenant à la bande interdite photonique du cristal est confinée et peut être acheminée le long de ce couloir de guide d'onde. Cette propagation guidée est limitée par la loi de la réfraction aux interfaces du guide. La transmission à travers ces dispositifs peut être optimisée en modifiant la taille ou la forme des trous au niveau des interfaces du guide. Les guides linéaires présentent beaucoup de pertes. Il existe un autre type de guide qu'on appelle guide avec virage. Un guide avec virage de 60° ou 120° à base de cristaux photoniques bidimensionnels a été conçu pour assurer une transmission élevée sur une large bande passante (figure I.13) [11].

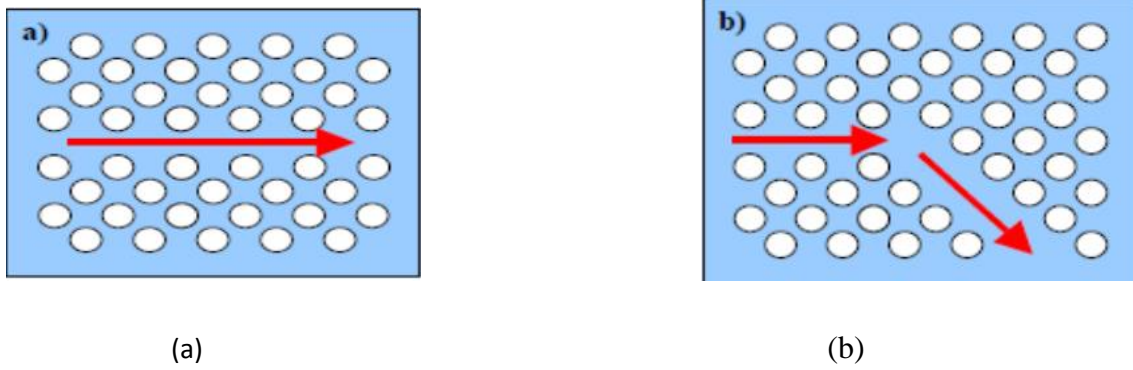


Figure I.13 : Guide d'ondes réalisé dans un cristal photonique : (a) guide linéique et (b) guide virage.

I.5.2. Diviseur de puissance à base de CPs

Le diviseur à CPs permet de séparer et de distribuer simultanément la lumière dans les différentes parties d'un circuit optique. Parmi ces types nous citons le diviseur de type jonction Y (figure I.14). Ce type de composant présente l'avantage d'offrir une réponse spectrale plate pour une gamme de longueur d'ondes très étendue [11].

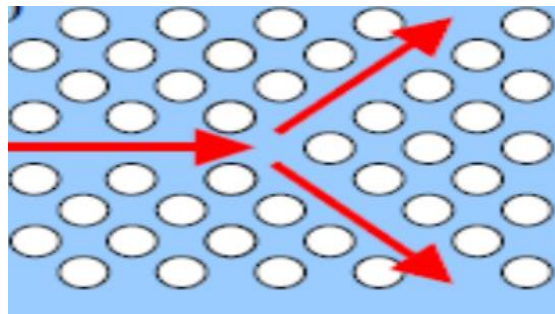


Figure I.14 : Diviseur de type jonction Y.

I.6. Techniques de modélisation

Diverses méthodes pour décrire la propagation des ondes électromagnétiques dans les cristaux photoniques dérivent des méthodes standards utilisées en électromagnétisme ou en physique du solide. Les principales techniques utilisées sont la décomposition en ondes planes, la méthode des différences finies dans le domaine temporel, la matrice de transfert, la théorie de la diffraction des réseaux [18].

I.6.1. La méthode des ondes planes (PWE)

La technique d'expansion des ondes planes (PWE), qui repose sur la résolution des équations de Maxwell dans le domaine fréquentiel, est l'une des techniques les plus utilisées pour calculer la structure des bandes photoniques [18]. Cette méthode est basée sur la décomposition des champs électromagnétiques en une superposition d'ondes planes dans

l'espace de Fourier [16]. Elle permet de déterminer la fréquence, la polarisation, la symétrie et la distribution du champ pour les modes d'une structure photonique périodique. En résolvant ce problème aux valeurs propres, les champs électromagnétiques et les fréquences correspondant à chaque onde plane sont obtenus.

I.6.2. La méthode FDTD (Finite Différence Time Domain)

La méthode FDTD (Finite Différences Time Domain), ou méthode des différences finies dans le domaine temporel, est une approche numérique qui permet de résoudre les équations de Maxwell en termes de variables spatiales et temporelles. Elle a été proposée pour la première fois par Yee en 1966. C'est une méthode très répandue pour la résolution des problèmes de l'électromagnétisme, pouvant être appliquée aux milieux conducteurs comme elle peut être appliquée aux milieux diélectriques. Cette méthode est particulièrement intéressante pour connaître la réponse spectrale d'un système non nécessairement périodique et pour calculer les distributions de champ dans des structures de dimensions finies [10].

I.6.3. La méthode des réseaux de diffraction

La diffraction est une notion qui est très bien connue et largement exploitée en optique. Elle est basée sur une description du CP comme un ensemble successif de réseaux de diffraction. Ces derniers permettent la décomposition de la lumière en un spectre de couleurs dispersées dans différentes directions [17]. La théorie des réseaux est appliquée pour relier les coefficients de cette décomposition d'une région à l'autre. La résolution du système de relations matricielles entre les coefficients donne finalement la diffraction du matériau globale [11].

I.7. Conclusion

Ce chapitre a abordé les principes fondamentaux des cristaux photoniques, en mettant l'accent sur leur structure périodique et leurs propriétés optiques uniques. Nous avons discuté les différents types de cristaux photoniques, tels que les cristaux photoniques unidimensionnels, bidimensionnels et tridimensionnels, ainsi que des différentes architectures de réseau, telles que les réseaux carrés, triangulaires et hexagonaux. De plus, nous avons exploré les applications potentielles des cristaux photoniques dans divers domaines. Nous avons également examiné les techniques de modélisation utilisées pour étudier et concevoir les cristaux photoniques.

Référence

- [1] Dekhira Azzedine, « étude théorique et simulation des cristaux photoniques et leurs applications en chimie et biochimie », mémoire de magistère, 154, 14, (2010).
- [2] F. bougriou, « étude théorique des matériaux a bandes interdites photoniques bidimensionnels : applications dans le domaine du guidage optique et la détection », thèse du doctorat en sciences, université Constantine 1, Algérie, 2003.
- [3] B. SID, F. Laala, « conception des filtres â base des cristaux photoniques », mémoire en master, université kasdi merbah Ouargla,2018.
- [4] Joannopoulos, R. D. Meade, J. N. Win, « Photonic Crystal: Molding the Flow of Light », Princeton Univ, Press, (1995).
- [5] A. Belhssos, S. METREF « Etude et simulation des cristaux photoniques », master professionnel en électronique, université kasdi Mesbah Ouargla, 2017.
- [6] A. Rafrat, « Etude et modélisation d'un Bio-capteur à base de cristaux photonique », Mémoire de Master en Sciences de L'ingéniorat, université Badji Mokhtar Annaba ,2019.
- [7] C.Kittel, Physique de L'état Solide, paris: 7ème édition (Dunod), 2005.
- [8] M. Filali, « Etude et conception d'un démultiplexeur 8 canaux photoniques bidimensionnels », Mémoire en Master, université Mohamed boudiaf-M'sila,2018.
- [9] R. BENDJELLOUL, « Etude et caractérisation de circuits photoniques à base de cristaux photoniques de micro piliers : Application aux filtres à base de résonateurs », Thèse de Doctorat, Université de Constantine, juillet 2017.
- [10] F.Benaissa, » Etude et Simulation de la Propagation des Ondes Electromagnétiques dans les guides à Cristaux Photoniques-Application aux FibresOptique », Mémoire en Master, l'université abou-bakr belkaïd – Tlemcen, 2013.
- [11] M. Deddouche, M.Benaissa, « Résonateurs en cristaux photonique : filtrage et démultiplexage », master en Télécommunications, Université AboubakarBelkaïd– Tlemcen, 2020.
- [12] Lombardet, Benoît, « étude et réalisation des cristaux photoniques pour l'optique intégrée,» thèse de doctorat, École polytechnique fédérale de LAUSANNE, 2005.

- [13] Joannopoulos, S. G. Johnson and J. D., « Three-dimensionally periodic dielectric layered structure with omnidirectional photonic band gap, » *App.Phys.Lett*, vol. 77, pp. 3490-3492, 2000.
- [14] A. Benmerkhi, « influence des paramètres géométriques sur la cavité à cristaux photoniques bidimensionnels », Mémoire de Magister, université Mentouri Constantine, 2008.
- [15] H. Amamou, Z. Mokhtar Slimane, « Filtre bi-bandes sélectifs en cristaux photoniques 2D pour les systèmes très hauts débits », Mémoire en Master, Université Aboubakar Belkaïd – Tlemcen, 2018.
- [16] F. Larioui, « Etude et application des cristaux photoniques : Démultiplexeur », Thèse de Doctorat, FRERES MENTOURI UNIVERSITY – Constantine 1, 2022.
- [17] S. Hadj-kaddour, R. Tabet-derraz, « Contribution à la conception des nouvelles topologies de démultiplexeurs en cristaux photoniques à plusieurs canaux pour télécommunications optiques », Mémoire de Master en Télécommunication, Université Aboubakar Belkaïd – Tlemcen, 2020.
- [18] H. Malache, A. Mahi, « Nouvelle structures des Démultiplexeurs en cristaux photonique 2D pour les systèmes très haut débits, » Mémoire en Master, Tlemcen, l'université abou-bakar belkaïd – Tlemcen, 2019.

Chapitre II

Filtrage dans les cristaux photoniques

II.1. Introduction

Les filtres optiques jouent un rôle crucial dans les systèmes de télécommunication en permettant l'extraction de longueurs d'onde précises dans un flux de données sans affecter les autres canaux. Ils sont conçus pour transmettre sélectivement la lumière dans des plages de longueurs d'onde spécifiques tout en bloquant le reste du spectre lumineux [1].

Dans ce contexte, ce chapitre aborde les filtres basés sur les cristaux photoniques en deux dimensions. De manière à introduire le sujet, nous commencerons par présenter les concepts de base liés aux résonateurs en anneaux à cristaux photoniques, notamment le facteur de qualité. Ensuite, nous explorons différents types de filtres en soulignant les différentes formes de résonateurs utilisées. Enfin, la dernière partie de ce chapitre sera consacrée à la présentation des démultiplexeurs à base de cristaux photoniques.

II.2. Filtrage dans les cristaux photoniques

Les filtres à base de CPs offrent plusieurs avantages par rapport aux filtres traditionnels. Ils peuvent être miniaturisés, ce qui permet leur intégration dans des circuits optiques complexes à l'échelle micro ou nanométrique. De plus, ils offrent une sélectivité spectrale élevée, ce qui en fait d'eux des candidats attrayants pour les applications de télécommunications et de traitement optique du signal [2].

La conception de tels dispositifs est basée sur le couplage entre les défauts linéaires (guides d'onde) et les défauts ponctuels (cavités). Lorsque la lumière se propage le long du guide d'onde, elle peut être couplée à la cavité, si et seulement si sa fréquence correspond à la fréquence de résonance de la cavité, tandis que les autres fréquences seront bloquées.

Deux classes de filtres à cristaux photoniques ont été décrites dans la littérature : les filtres Add/Drop et les filtres Fabry-Pérot. Ces deux classes de filtres se distinguent par la manière dont la cavité est couplée au guide d'onde porteur du signal [3,4].

Les filtres Add/Drop à cristaux photoniques utilisent un couplage évanescent entre la cavité et le guide d'onde porteur du signal. Cela signifie que la cavité est positionnée à proximité du guide d'onde, contrairement à d'autres configurations de filtres optiques, dans lesquelles la cavité est directement insérée à l'intérieur du guide d'onde principal. Le couplage évanescent permet la transmission sélective de certaines longueurs d'onde spécifiques dans la cavité, tandis que les autres longueurs d'onde passent à travers le guide d'onde principal sans être affectées, comme le montre la figure II.1.

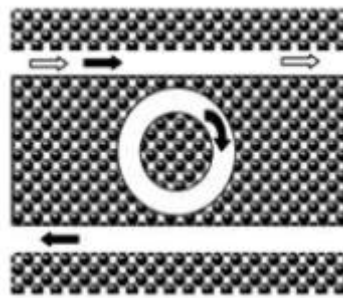


Figure II.1 : Représentation d'un filtre add /drop [5].

Les filtres Fabry-Pérot à cristaux photoniques, quant à eux, sont des dispositifs optiques qui exploitent les propriétés d'interférence constructive et destructive de la lumière pour filtrer sélectivement les longueurs d'onde spécifiques. Ils sont basés sur le principe du résonateur Fabry-Pérot, où une cavité est insérée directement dans le guide d'onde principal, comme le montre la figure II.2. Lorsque la lumière incidente se propage à travers le guide d'onde principal, une partie de celle-ci est réfléchi aux surfaces réfléchissantes de la cavité. Cette réflexion crée des interférences optiques entre les ondes réfléchies, ce qui entraîne des conditions d'interférence constructive et destructive. Les longueurs d'onde qui satisfont aux conditions d'interférence constructive sont renforcées et transmises à travers le filtre, tandis que les longueurs d'onde qui satisfont aux conditions d'interférence destructive sont bloquées [6].

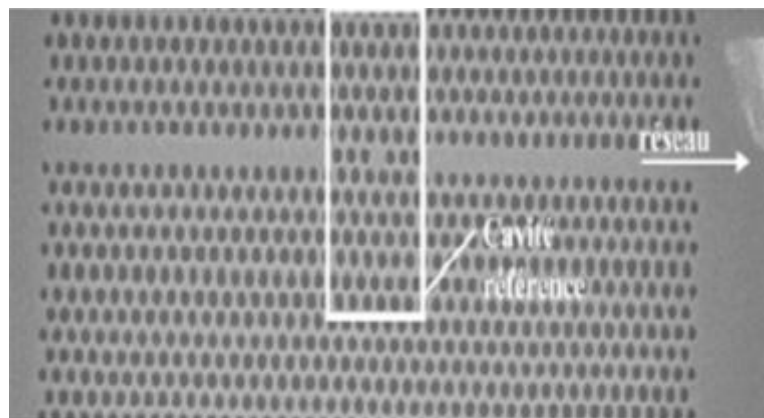


Figure II.2 : Image en microscopie électronique d'une fonction Fabry- Perot intégrée à un guide [6].

II.3. Filtre Channel drop à base de résonateur en anneaux à cristal photonique

Parmi les divers types de filtres mentionnés précédemment, nous nous concentrons sur les filtres Channel drop (filtres à extraction) basés sur des résonateurs en anneau à cristaux

photoniques. Avant d'approfondir ce sujet, il est important de décrire ces résonateurs en anneau et leurs caractéristiques.

II.3.1. Résonateur en anneau à cristaux photonique

Les résonateurs en anneaux sont des structures optiques utilisées pour stocker la lumière dans un volume restreint. Ces dispositifs offrent de nombreux avantages, tels qu'une sélectivité spectrale élevée, un large intervalle de spectre libre (free spectre range, FSR). De plus, ils répondent aux exigences micrométriques actuelles.

Jusqu'à présent, les résonateurs en anneaux ont été démontrés avec succès à partir de matériaux très différents comme le silicium sur silice, l'arséniure de gallium (GaAs), le phosphore d'indium (INP), différents types de polymères [7,8]. Le silicium ou les semi-conducteurs sont plus souvent utilisés, en raison de leurs indices de réfraction élevés qui permet d'obtenir un très bon confinement optique [9].

Le concept de résonateur en anneau à cristal photonique a été introduit pour la première fois par Kim et al. [10]. Ils ont proposé et démontré un laser basé sur un résonateur en anneau hexagonal dans un cristal photonique bidimensionnel (CP-2D). Leurs travaux ont mis en évidence les possibilités offertes par les résonateurs en anneau à cristal photonique pour la réalisation de dispositifs optiques avancés. Plus tard, Kumar et al. [11] ont étudié les caractéristiques spectrales d'un résonateur en anneau de forme rectangulaire couplé à des guides d'ondes dans un CP-2D avec une structure de réseau carrée. Ils ont examiné les effets des dimensions de l'anneau et des paramètres structuraux sur les propriétés optiques du résonateur. Leurs travaux ont permis de mieux comprendre les facteurs qui influencent les performances des PCRRs et ont ouvert la voie à de nouvelles possibilités de conception et d'optimisation de ces dispositifs.

Ces travaux de recherche ont permis de comprendre les propriétés et les performances des résonateurs en anneau à cristaux photoniques. En effet, ces derniers offrent des possibilités de conception flexibles et permettent d'obtenir des caractéristiques de filtrage sélectives en fonction des dimensions de l'anneau et des paramètres structuraux. Ces dispositifs sont utilisés dans de nombreuses applications optiques, telles que des diviseurs de puissance [12], des capteurs [13], et des démultiplexeurs [14].

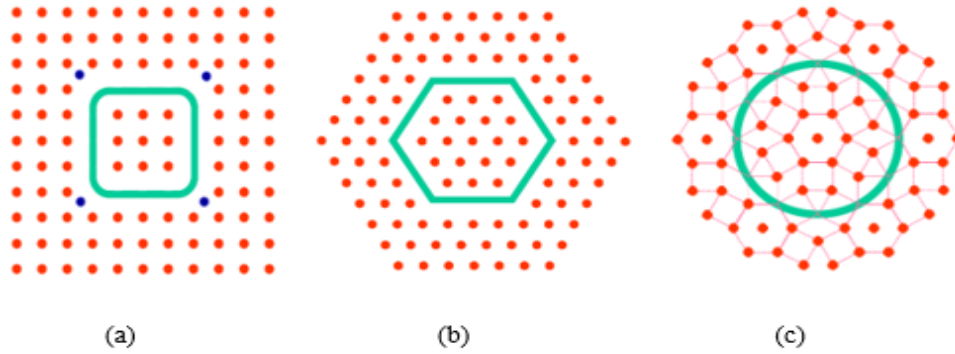


Figure II.3 : Résonateurs en anneaux à cristaux photoniques (Photonic Crystal ring resonators, PCRRs) : (a) un anneau quasi-carré dans un réseau carré, (b) un anneau hexagonal dans un réseau triangulaire, et (c) un anneau circulaire dans un quasi-cristal photonique [9].

II.3.2 Caractéristique des résonateurs en anneaux :

Lorsqu'on étudie les résonateurs en anneau, deux grandeurs importantes sont souvent utilisées pour caractériser leurs propriétés : la finesse (F) et le facteur de qualité (Q).

II.3.2.1. Facteur de qualité (Q) :

Le facteur de qualité est une mesure qui décrit la conservation d'énergie dans un résonateur, et dépend de la durée de vie τ des photons à l'intérieur du résonateur et peut être définie par la relation suivante [15] :

$$Q = \omega_r \tau \dots\dots\dots (1)$$

Avec ω_r : la pulsation

Plus la lumière demeure dans le résonateur (avant d'en sortir), plus le facteur de qualité est élevé et meilleur [9].

Une interprétation énergétique de Q est également possible : il s'agit du rapport entre l'énergie moyenne E et le mode résonant et de l'énergie ΔE dissipée dans ce même mode sur une période d'oscillation à 2π près :

$$Q = 2\pi \cdot \frac{E}{\Delta E} \dots\dots\dots (2)$$

Si l'on considère $\Delta\lambda$ comme la largeur à mi-hauteur (full width at half maximum, FWHM) et λ comme la longueur d'onde à la résonance tel que représenté sur la figure II.4, le facteur de qualité (Q) peut également s'exprimer de la manière suivante [16] :

$$Q = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \dots\dots\dots(3)$$

Le facteur de qualité est inversement proportionnel au FWHM, ce qui implique qu'une résonance étroite dans le domaine fréquentiel correspond à un résonateur à faibles pertes [17].

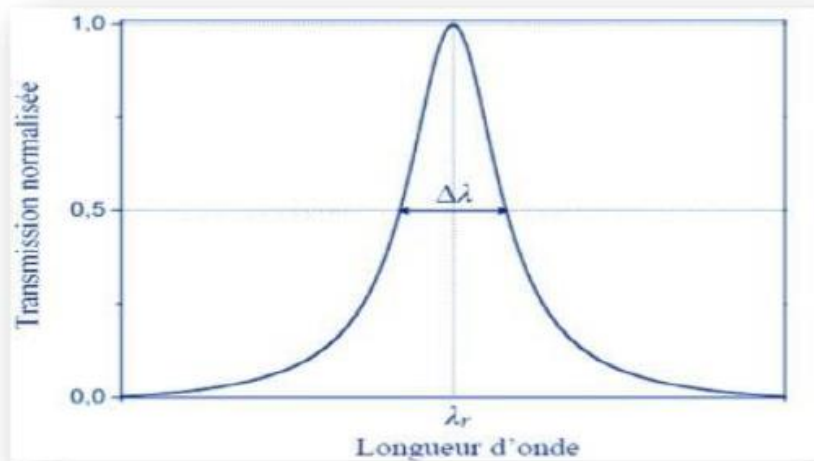


Figure II.4: largeur spectral d'un résonateur en anneau [9].

II.3.2.2. Finesse

Elle est définie comme le rapport entre l'intervalle spectral libre (ISL : la distance entre deux pics) et la largeur à mi-hauteur ($\Delta\lambda$) d'une résonance [16] :

$$F = \frac{ISL}{\Delta\lambda} \dots\dots\dots(4)$$

Une finesse élevée est un atout important pour ce type de résonateurs, ce qui fait d'eux de bons candidats pour d'autres applications telles que la détection et le filtrage.

II.4. Couplage des résonateurs avec les guides d'onde

L'une des problématiques les plus importantes est celle de coupler les résonateurs avec des guides d'onde. En effet, le guide d'onde est l'élément fondamental permettant l'entrée et la sortie du signal pour le résonateur, il est donc indispensable pour ce composant. Lorsque la lumière avec une longueur d'onde appropriée est injectée à l'entrée d'un guide d'onde (bus), couplé latéralement à un ou plusieurs PCRRs, elle sera transmise au résonateur par couplage évanescent. Grâce aux multiples rotations effectuées et aux phénomènes d'interférences constructives, l'intensité s'accroît pour des longueurs d'onde spécifiques et la résonance se produit. A la résonance, une intensité très élevée existe ainsi dans l'anneau. Ces intensités sont évanescentes et décroissent exponentiellement hors de l'anneau. Comme seules quelques

longueurs d'onde résonnent à l'intérieur de l'anneau, la structure fonctionne en quelque sorte comme un filtre à extraction [2].

Le schéma de principe d'un filtre à extraction est représenté sur la figure II.5. C'est un système à quatre ports, un port d'entrée et trois ports de sortie, où deux guides d'ondes, le guide d'entrée (bus) et le guide de sortie (drop), sont couplés par l'intermédiaire d'un résonateur optique. Ce dispositif élémentaire de la technologie WDM permet le transfert sélectif et directif de la lumière entre deux guides d'ondes via une zone de couplage. Autrement dit, lorsque des signaux WDM (c'est-à-dire des signaux multi-fréquences) se présentent à l'entrée du premier guide d'onde (bus), une seule fréquence sera sélectionnée et transférée ensuite dans le second guide d'onde (drop) [9].

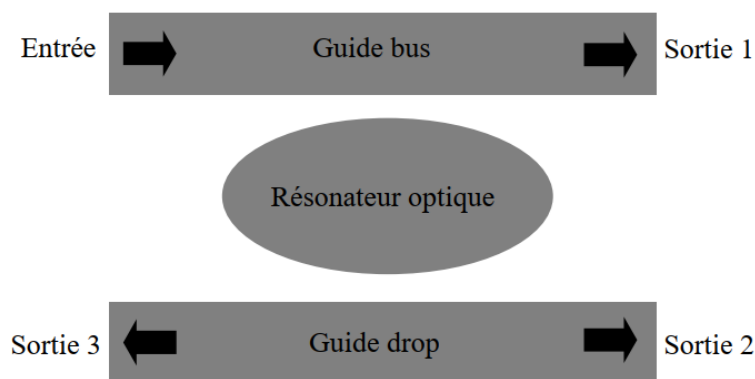


Figure II.5 : Représentation schématique d'un filtre channel drop.

II.5. Quelques topologies

II.5.1. Filtre à résonateur en anneau de forme Carrée

La structure considérée dans la figure II.6.a est constituée d'un résonateur en anneau en forme d'un carré dans un réseau carré d'un cristal photonique bidimensionnel. Le résonateur est placé entre deux guides parallèles. Afin d'améliorer l'efficacité de couplage et la sélectivité spectrale de ce filtre, les tiges bleues ont été introduite dans les quatre coins du résonateur (marqué 's') ayant les mêmes caractéristiques que les tiges de la structure. Le résultat de simulation indique une efficacité d'extraction de 100% et un facteur de qualité de 160, comme le montre la figure II.5.b [18].

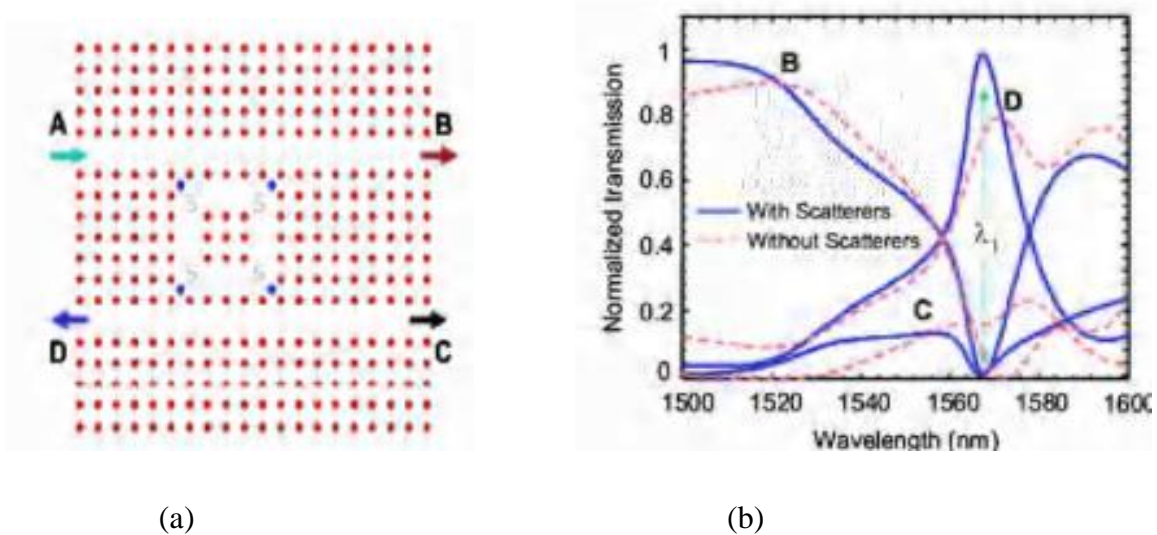


Figure II.6 :(a) Structure schématique du filtre proposé par [18] et (b) son spectre de transmission.

II.5.2. Filtre à résonateur en anneau de forme hexagonale

La figure II.7.a [19] montre la structure schématique d'un filtre à extraction basé sur un résonateur en anneau à CP de forme hexagonale suivant un réseau triangulaire. Les deux guides d'onde sont créés par la suppression de deux rangées de motifs du cristal photonique. Pour former le résonateur en anneau, certaines tiges diélectriques sont enlevées de manière à former une boucle fermée. Les tiges de la structure ont un rayon initial de $R=106$ nm. Cependant, pour améliorer le facteur de qualité Q et l'efficacité du résonateur, des modifications peuvent être apportées. Une première amélioration consiste à augmenter le rayon des tiges de dispersion à $R_s=115$ nm, qui sont placées entre les guides d'onde et le résonateur (colorées en bleu). De plus, il est également bénéfique de réduire les rayons intérieurs à $R_i=67$ nm. Ces ajustements permettent d'optimiser les performances du résonateur en anneau à cristaux photoniques. A partir de la figure II.7.b, un bon facteur de qualité ($Q = 1198$) avec une efficacité d'extraction de 100% ont été observés.

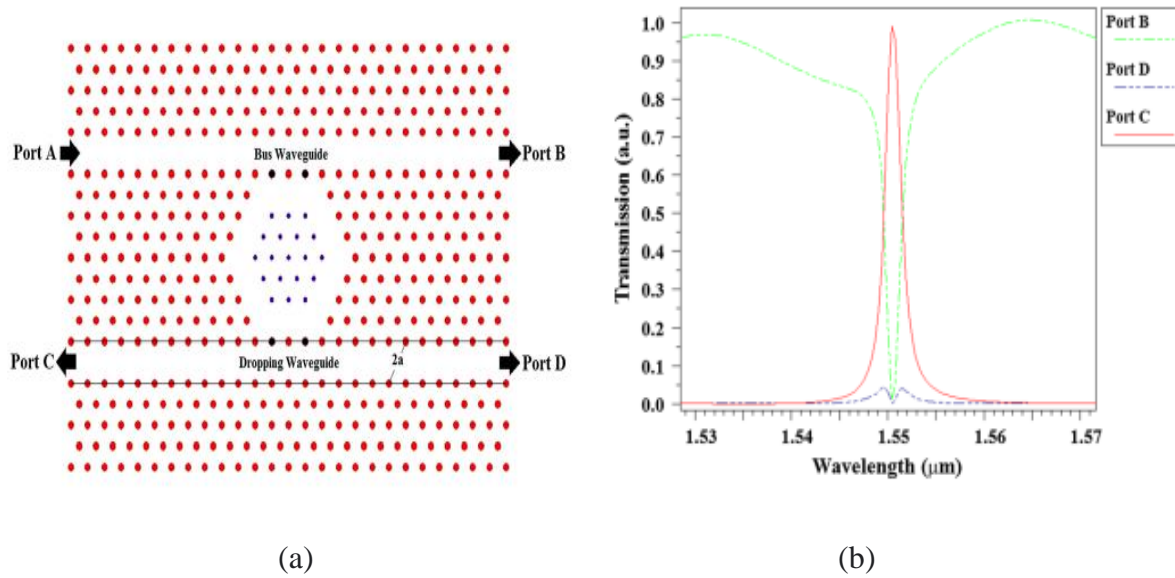


Figure II.7 :(a) Structure schématique du filtre proposé par [19] et (b) son spectre de transmission.

II.6. Application des filtres à extraction

En utilisant les filtres optiques basés sur les résonateurs en anneaux à cristaux photoniques, il est possible de concevoir et de réaliser une large gamme de composants optiques, allant des démultiplexeurs aux capteurs. Ces composants jouent un rôle crucial dans diverses applications optiques, allant des télécommunications à la biologie et à la chimie analytique. Ils offrent des performances optimisées en termes de sélectivité spectrale, de transmission de la lumière et de sensibilité, ouvrant ainsi de nouvelles possibilités pour les avancées technologiques dans différents domaines.

Dans les systèmes de transmission de données, différentes longueurs d'onde portent différentes informations ou canaux de communication. Le multiplexage permet de combiner plusieurs canaux sur une seule fibre optique, ce qui augmente considérablement la capacité de transmission des systèmes. Le démultiplexeur est utilisé à l'extrémité de réception pour séparer ces longueurs d'onde multiplexées et acheminer chaque canal vers son destinataire approprié.

Les démultiplexeurs à cristaux photoniques offrent plusieurs avantages par rapport aux autres techniques de démultiplexage, tels que la compacité et la flexibilité spectrale. Ils permettent également une séparation précise des longueurs d'onde, ce qui améliore la qualité de la transmission des données et réduit les interférences entre les canaux.

De nombreux chercheurs se sont concentrés sur la conception et le développement de différents types de démultiplexeurs à cristaux photoniques. Ces travaux de recherche visent à améliorer les performances, l'efficacité et la fonctionnalité des démultiplexeurs, en offrant de nouvelles approches et des caractéristiques innovantes. Par exemple, en 2017, Farhad Mehdizadeh et ses collaborateurs [20] ont conçu une nouvelle configuration d'un démultiplexeur optique. Le démultiplexeur proposé est représenté sur la figure II.8.a. Il se compose de trois parties principales : un guide d'onde d'entrée, huit guides d'onde de sortie et huit anneaux résonants. Pour créer le guide d'onde d'entrée, ils ont retiré 65 tiges diélectriques dans la direction Γ -M, puis ils ont créé huit guides d'onde en forme de 'L' pour les sorties. Ils ont placé un résonateur en anneau entre le guide d'onde d'entrée et chaque guide d'onde de sortie. Afin de séparer les différents canaux avec des longueurs d'onde spécifiques, ils ont varié les rayons des tiges internes des huit résonateurs. Le spectre de sortie du démultiplexeur a été obtenu et présenté dans la figure II.8. b. Ce démultiplexeur comporte 8 canaux avec des longueurs d'onde centrales égales à 1548,8 nm, 1545,3 nm, 1542,8 nm, 1540,2 nm, 1538 nm, 1535,4 nm, 1533,3 nm et 1531,2 nm. Pour cette structure, l'efficacité de transmission minimale et maximale est d'environ 79 % et 100 %, respectivement.

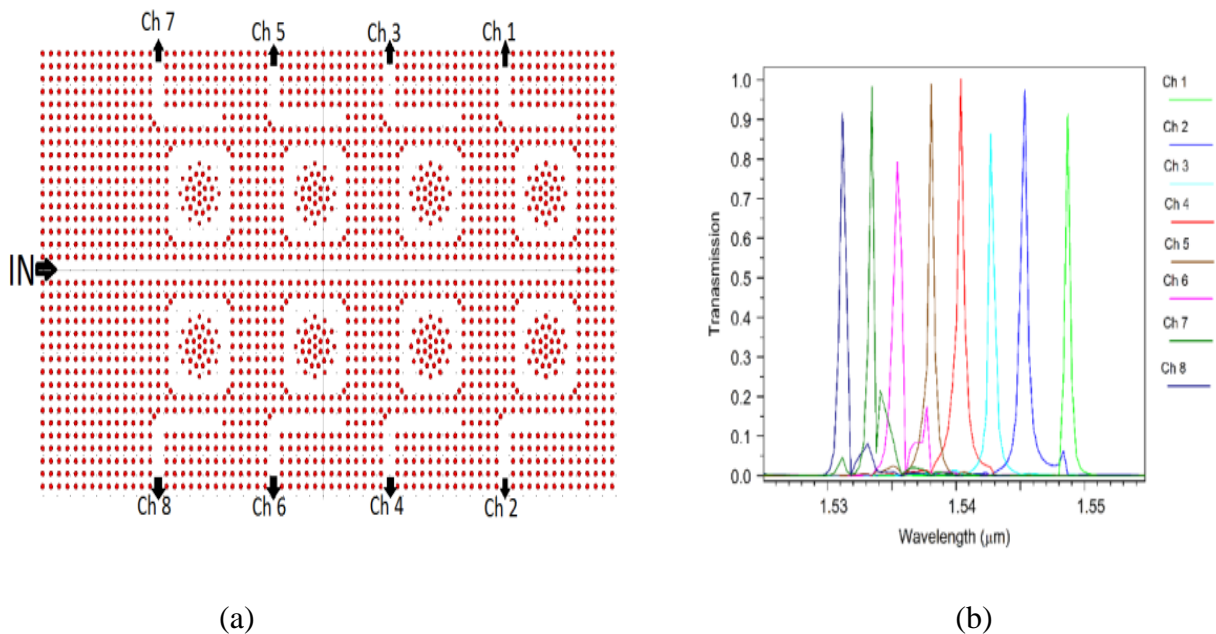


Figure II.8 : (a) Structure schématique du démultiplexeur proposé par [20] et (b) son spectre de transmission.

En 2018, Vahid Fallahi et ses collaborateurs [21] ont conçu un démultiplexeur optique à quatre canaux, comme illustré dans la Figure II.9. a. Ce démultiplexeur est composé d'une matrice de tiges diélectriques de dimensions 45 x 55 (avec 45 tiges dans la direction 'x' et 55 tiges dans la direction 'z'). Ils ont utilisé quatre résonateurs en anneau de forme hexagonale avec des tiges internes de rayons respectifs de 178 nm, 179.5 nm, 181 nm et 182.5 nm. La structure proposée permet de séparer les longueurs d'onde de 1581.5 nm, 1584.75 nm, 1587.25 nm et 1589.5 nm avec des taux de transmission de 100%, 92%, 96%, 94%, respectivement (voir la figure II.9.b).

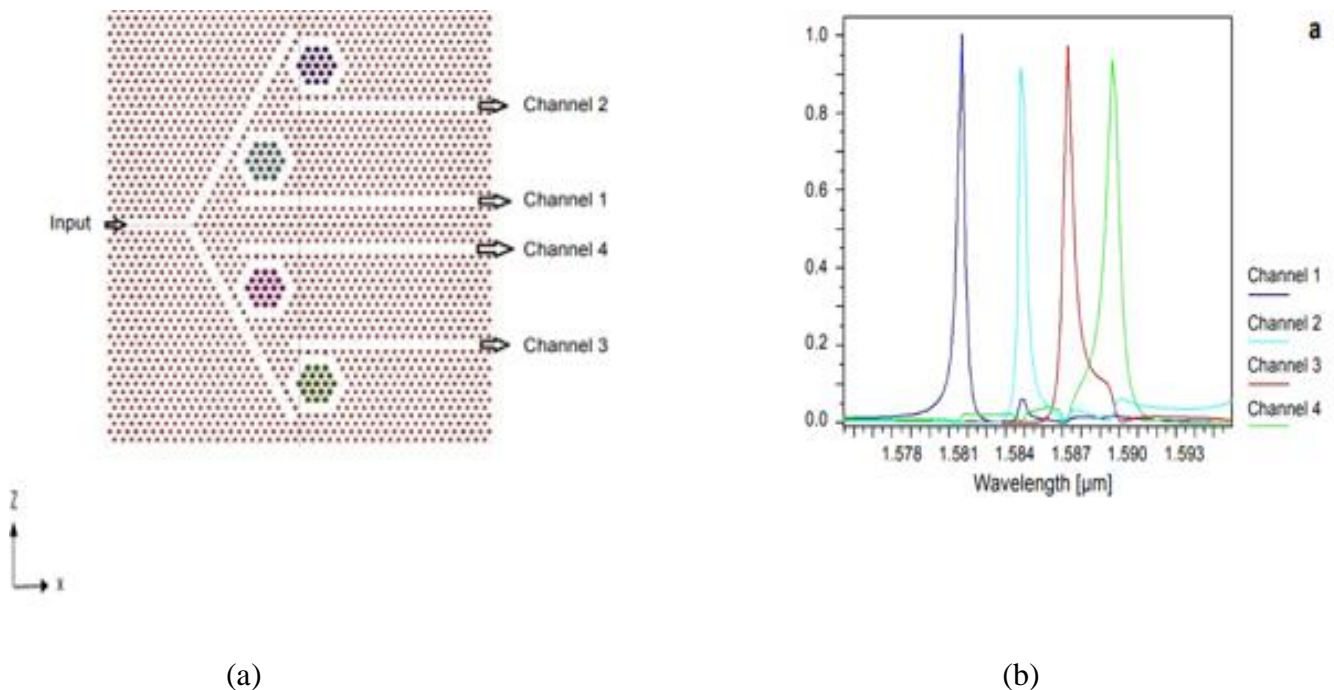


Figure II.9: (a) Structure schématique du démultiplexeur proposé par [21] et (b) son spectre de transmission.

II.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré les filtres à cristaux photoniques bidimensionnels et les caractéristiques essentielles qui les définissent. Nous avons débuté par une discussion détaillée sur les résonateurs en anneaux à cristaux photoniques, qui constituent l'élément fondamental dans la conception de ces filtres. Nous avons présenté leurs propriétés optiques importantes comme le facteur de qualité et la finesse. Ensuite, nous avons expliqué le principe de fonctionnement des filtres à résonateurs en anneaux à cristaux photoniques. Enfin, différents exemples portant sur la conception de ces filtres à base de différents résonateurs en anneaux ont été présentés.

Références

- [1] H. mabrouk, I. DEHIM « Conception d'un filtre optique basé sur un résonateur d'anneau 2D pour les systèmes WDM », Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf - M'sila,2019.
- [2] M. Deddouche, M. Benaïssa, « Résonateurs en cristaux photonique : filtrage et démultiplexage », Master en Télécommunications, Université Aboubakar Belkaïd–Tlemcen,2020.
- [3] C. James. Weaver, Charles L. Cooney, « Tannenbaum. Experiments and calculations concerning a thermal enzyme probe », *Biochimica et Biophysical Acta (BBA) -Enzymology*, vol 452, 285– 291, (1976).
- [4] B. Danielsson et L. Flygare, « Performance of a thermal of thermal biosensor in organic solvents », *Sens. Actuators B*, 523–527, (1990).
- [5] S. Hadj-kaddour, R. Tabet-derraz, « Contribution à la conception des nouvelles topologies de démultiplexeurs en cristaux photoniques à plusieurs canaux pour télécommunications optiques », Mémoire Master en Télécommunication , Université Aboubakar Belkaïd – Tlemcen ,2020.
- [6] C. Chebli, A. Lamich « Caractérisation de cristal liquide à base de cristaux photonique 1D », mémoire de Master Académique, Université Mohamed Boudiaf - M'sila,2020.
- [7] C.Y Chao, W. Fung, L.J. Guo, « Polymer Microring Resonators for Biochemica lSensing Applications, » *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 12, pp. 134– 142, 2006.
- [8] Q. Xu, S. Manipatruni, B. Schmidt, J. Shakya, M. Lipson, “12.5 Gbit/s carrier-injectionbasedsilicon micro-ring siliconmodulators,” *Optics Express*, vol. 15, pp. 430–436, 2007.
- [9] R. Bendjelloul, « Etude et caractérisation de circuits photoniques à base de cristaux photoniques de micro piliers : Application aux filtres à base de résonateurs », Thèse de Doctorat, Université de Constantine, juillet 2017.

- [10] S.H. Kim, H.Y. Ryu, H.G. Park, G.H. Kim, Y.S. Choi, Y.H. Lee, J.S. Kim « Two dimensional photonic crystal hexagonal waveguide ring laser, » Applied physics letters, vol. 81, pp. 2499–2501, 2002.2499–2501.
- [11] V. Dinesh Kumar, T. Srinivas, A. Selvarajan, Investigation of ring resonators in photonic crystal circuits, Photon. Nanostruct. 2 (2004) 199–206.
- [12] L. Wu, M. Wang, “1x2 type photonic crystal power splitter with ring resonators,” Optik, vol. 126, pp. 3613–3615, 2015.
- [13] F.L. Hsiao, C. Lee , “Computational study of photonic crystals nano-ring resonator for biochemical sensing,” IEEE Sensors Journal, vol. 10, pp. 1185–1191, 2010
- [14] H. Alipour-Banaei, F. Mehdizadehb, S. Serajmohammadi, “A novel 4-channel demultiplexer based on photonic crystal ring resonators,” Optik, vol. 124, pp. 5964–5967, 2013.
- [15] F. LARIOUI, « Etude et application des cristaux photoniques : Démultiplexeur », Thèse de Doctorat, FRERES MENTOURI UNIVERSITY – Constantine 1 ,2022.
- [16] L. Ghisa, « Couplage de micro résonateurs. Applications aux fonctions optiques de traitement du signal ». Thèse de Doctorat, Université de Rennes I, Rennes, 2008.
- [17] G. Lenz et al. « Optical Delay Lines Based on Optical Filters, » IEEE J. Quantum Electron. Vol. 37, pp. 525-532, (April2001).
- [18] S. Robinson and R. Nakkeeran, « Two dimensional photonic crystal ring resonator based add drop filter for CWDM systems, » Optik - International Journal for Light and Electron Optics, vol. 124, pp. 3430–3435, Sep. 2013.
- [19] V., Seifouri, M., & Mohammadi, M. (2019). A new design of optical add/drop filters and multi-channel filters based on hexagonal PhCRR for WDM systems. Photonic Network Communications, 37,100-109.
- [20] F. MEHDIZADEH, M. SOROOSH, H. ALIPOUR-BANAEI, «An optical demultiplexer based on photonic crystal ring resonators», International Journal for Light and Electron Optics, 2016.

[21] MAHMOUD YUCEF MAHMOUD, B. GHAOUTI, F. METEHRI, <<channel drop filter using photonic crystal ring resonators for CWDM>> optic, volume 125, page 4718-4721,2014.

Chapitre III

Résultats et interprétations

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous étudierons deux configurations de filtres à extraction utilisant des résonateurs en anneaux à cristaux photoniques bidimensionnels. Ces études seront effectuées en utilisant la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD) intégrée dans le logiciel Fullwave. Nous présenterons également les différentes améliorations que nous avons apportées afin d'optimiser leurs performances.

III.2. Présentation du logiciel Rsoft

La famille des produits RSoft est utilisée pour concevoir, optimiser et simuler des dispositifs et des structures optiques à l'échelle nanométrique. En outre, le logiciel prend en charge la conception, la planification et la simulation de réseaux de télécommunication optiques complets. Dans le RSoft, il existe plusieurs modules intégrés, chaque module assure une fonction bien précise, parmi ces modules on trouve : BeamPROP, FullWAVE, BandSOLVE, GratingMOD et Diffract MOD. Dans notre travail on exploitera seulement deux modules : BandSolve et Fullwave.

La fenêtre du programme Rsoft a une barre de menu située au haut de la fenêtre, une barre d'outils avec plusieurs icônes, et une barre d'état qui est située en bas de la fenêtre (figure III.1).

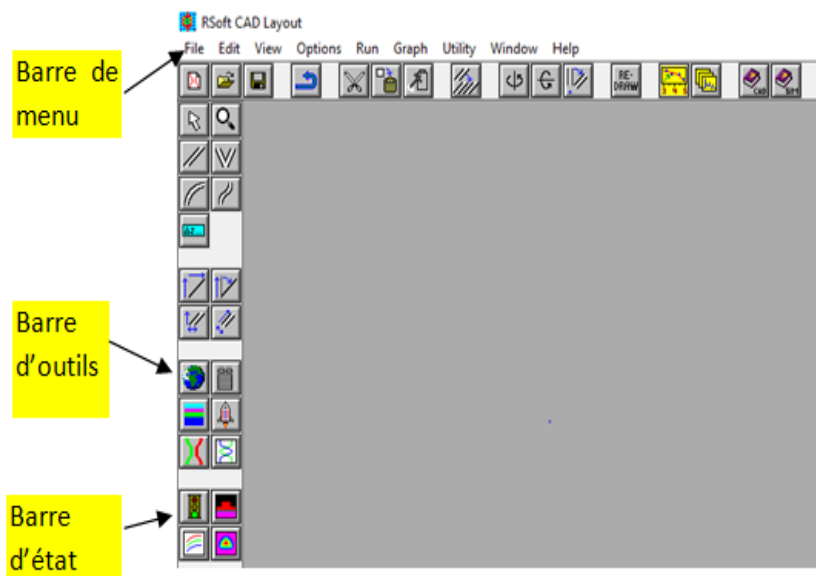


Figure III.1 : fenêtre du programme Rsoft CAD.

III.2.1 Simulateur Fullwave

Le moteur de simulation FullWAVE est une partie de Rsoft photonique. Son objectif est de fournir un ensemble de simulations pour étudier la propagation de la lumière dans les structures

à base des cristaux photoniques. La simulation est basée sur la méthode des différences finies dans le domaine temporel. Cette méthode est un outil puissant pour la résolution des équations de Maxwell. Réalisée dans le domaine temporel, elle permet d'appréhender visuellement la propagation d'une onde électromagnétique dans un milieu structuré (notamment un cristal photonique). On peut obtenir les réponses en champs TE et TM simultanément, ainsi que les cartographies du champ électromagnétique. La figure III.2 montre la fenêtre principale de Fullwave.

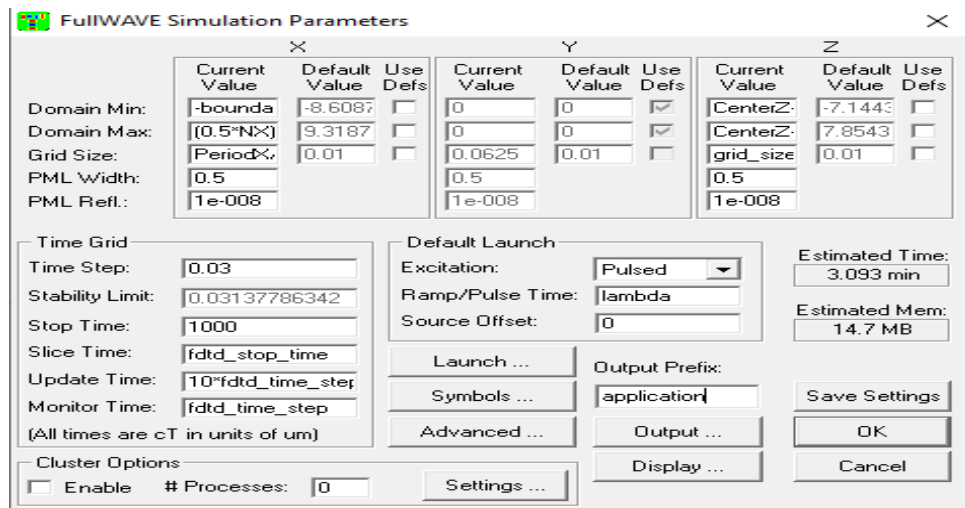


Figure III.2 : Fenêtre du simulateur Fullwave.

III.2.2 Simulateur bandSolve

BandSOLVE est un moteur de simulation utilisé pour la génération et l'analyse des structures à bandes interdites photoniques. Ce module de simulation utilise la méthode des ondes planes optimisée pour les structures périodiques idéales, afin de produire les diagrammes de dispersion. La figure III.3 illustre la fenêtre principale de Bandsolve.

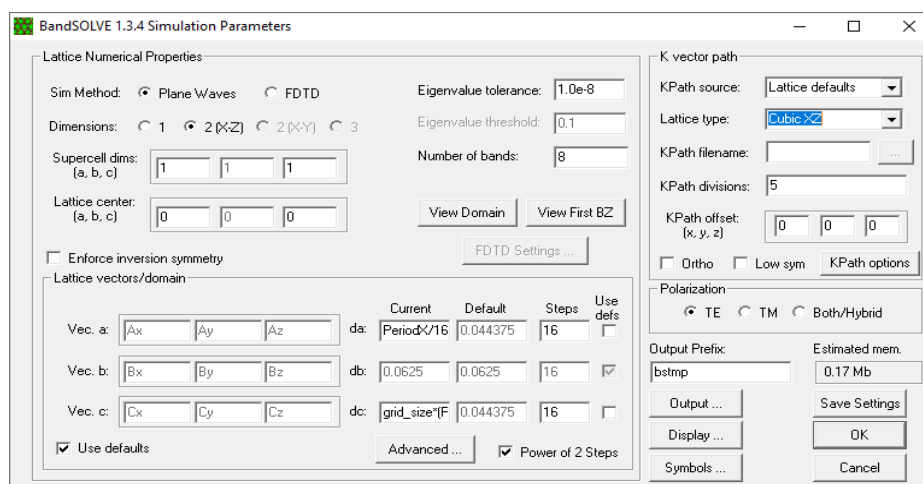


Figure III.3 : Fenêtre du module BandSOLVE.

III.3 Structure d'étude

La structure proposée est un cristal 2D de piliers de silicium (s_i) de section circulaire d'indice de réfraction $n_{si}=3.48$, immergés dans l'air ($n_{air}=1$). Ces piliers sont répartis selon un réseau carré de dimension 22×22 suivant les directions X et Z, respectivement. Ce réseau est caractérisé par un pas de réseau $a=0.71 \mu\text{m}$ (distance entre les centres de deux tiges adjacentes) et un rayon des tiges $r=0.1*a \mu\text{m}$. Le schéma de la structure est reporté sur la figure III.4.a.

Le diagramme de dispersion de la structure étudiée est calculé en utilisant le simulateur BandSOLVE basé sur la méthode des ondes planes (PWE). Sur la figure III.4.b, on remarque l'apparition de deux bandes interdites en polarisation TM, mais aucune bande interdite n'est détectée pour la polarisation TE. Ces bandes interdites s'ouvrent pour les fréquences normalisées $0.419 < \frac{a}{\lambda} < 0.495$ et $0.962 < \frac{a}{\lambda} < 0.991$ correspondant respectivement aux longueurs d'onde $1.434 \mu\text{m} < \lambda < 1.694 \mu\text{m}$ et $0.716 \mu\text{m} < \lambda < 0.738 \mu\text{m}$. Nous nous intéressons à la bande interdite TM la plus large qui permet d'interdire la propagation des ondes électromagnétiques dans la gamme des longueurs d'onde des télécommunications.

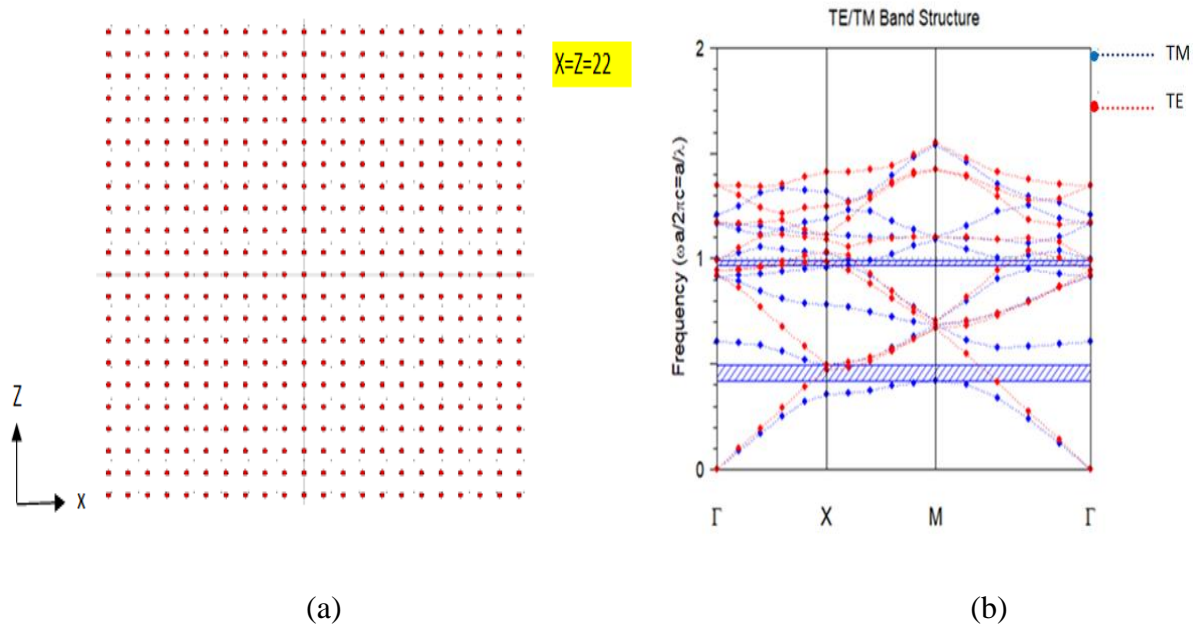


Figure III.4 : (a) Structure schématique d'un CP-2D et son (b) digramme de bande.

III.4. Filtre à base de résonateur en anneau : Système à quatre ports [1].

III.4.1. Structure de base

Le filtre proposé est illustré sur la figure III.5.a. La structure du filtre se compose d'un résonateur en anneau à cristal photonique (Photonic Crystal ring resonator, PCRR) en forme d'octogone situé entre deux guides d'ondes horizontaux. Le guide d'onde supérieur est appelé bus tandis que le guide inférieur drop. Les deux guides sont formés par la suppression d'une seule rangée de tiges. Ce filtre contient quatre ports, un port d'entrée, étiqueté A, et trois ports de sortie B, C et D. Les tiges qui sont placées entre le résonateur et les guides d'ondes sont appelées tiges de couplage. La distance qui sépare le résonateur et chaque guide d'onde est désignée par la distance de couplage (D_c), elle est égale à une seule rangée de piliers ($D_c = 1$).

Pour tracer le spectre de transmission de notre structure, nous avons utilisé le logiciel Fullwave de Rsoft basé sur la méthode FDTD (Finite différences time domaine méthode). La figure III.5.b montre le résultat obtenu au port B, C et D. Sur cette figure, on note l'existence d'un pic résonant à la longueur d'onde $\lambda = 1.5534 \mu\text{m}$ obtenu à la sortie D. ce pic est caractérisé par un taux de transmission de 59%, qui correspond à l'efficacité d'extraction de du filtre, et un facteur de qualité de $Q = 174.53$. D'après ce résultat, il est clair que des améliorations

supplémentaires sont nécessaires pour atteindre les performances souhaitées.

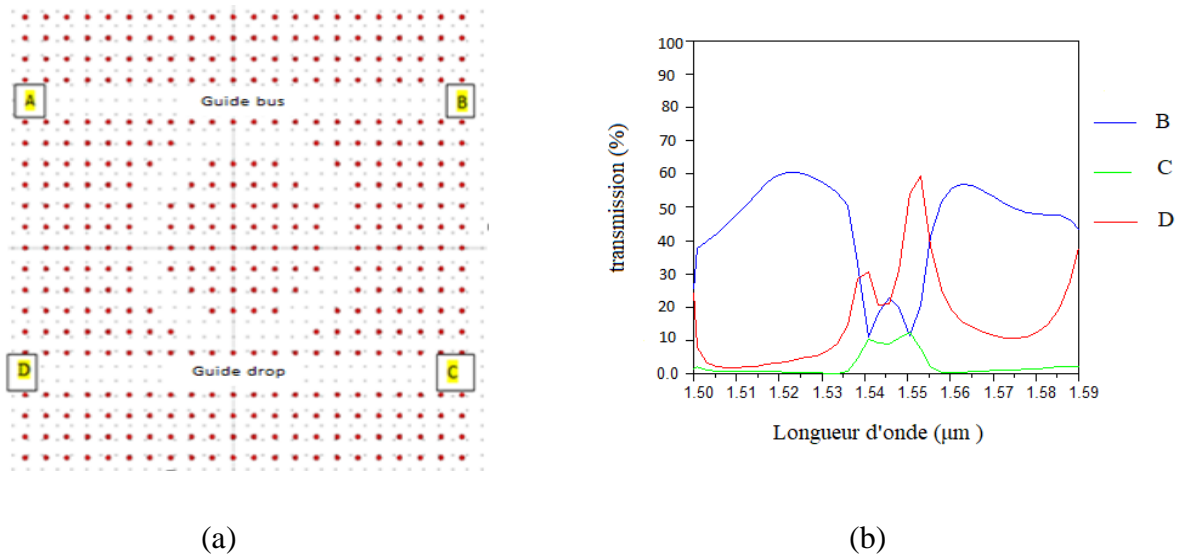


Figure III.5 : (a) Structure schématique du filtre proposé et son (b) spectre de transmission.

III.4.2. Structure modifiée

Selon les résultats précédemment exposés, nous proposons trois approches pour améliorer les résultats obtenus :

a- Première approche : L'ajout des tiges R_a

Pour améliorer les performances de notre filtre, nous avons adopté une approche visant à accroître le confinement de la lumière dans le résonateur. À cette fin, nous avons ajouté huit tiges aux tiges internes du résonateur, ainsi que douze tiges aux tiges adjacentes du résonateur. Ces tiges supplémentaires, identifiées en bleu sur la figure III.6, présentent les mêmes caractéristiques que les autres tiges de la structure.

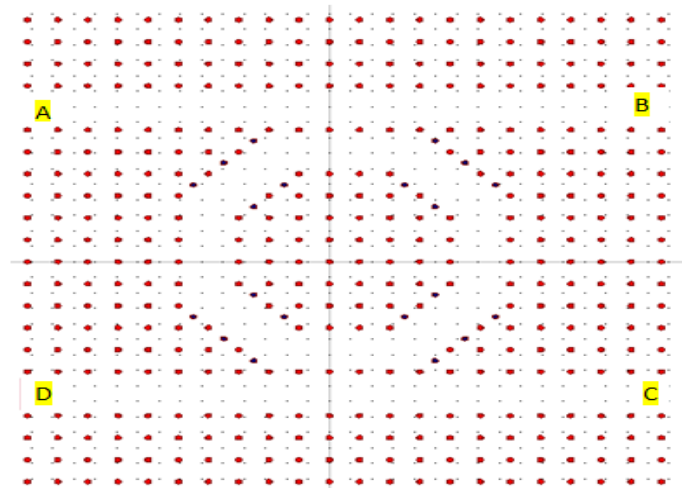


Figure III.6 : Structure avec l'ajout des tiges R_a .

Les résultats que nous avons obtenus après avoir ajouté les vingt tiges sont reportés sur la figure III.7. Cette figure montre l'augmentation de la transmission à 93% avec un facteur de qualité de $Q=225.55$ à la longueur d'onde $\lambda = 1.5338 \mu\text{m}$.

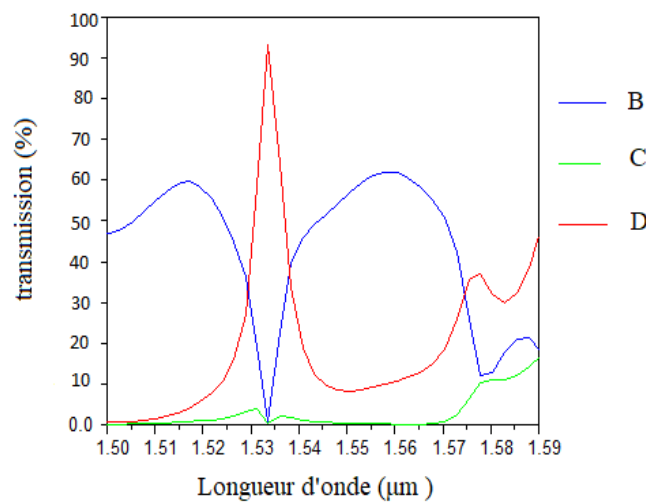


Figure III.7 : Spectre de transmission du filtre proposé avec l'ajout des tiges R_a .

b- Deuxième approche : Modification du Rayon des tiges R_s

Dans cette section, nous avons effectué une modification du rayon des quatre tiges de dispersion situées aux coins externes du résonateur. Afin de les distinguer des autres tiges de la structure, les quatre tiges de dispersion ont été représentées en vert et ont été nommées " R_s ", comme le montre la figure III.8. L'impact de la modification du rayon des tiges de dispersion sur les caractéristiques du filtre est résumé sur le tableau III.1.

| Rayon des tiges de dispersion R_s (μm) | Transmission(%) | Facteur Q |
|---|-----------------|-----------|
| 0.059 | 64 | 119.82 |
| 0.06 | 65 | 122.704 |
| 0.062 | 67 | 142.01 |
| 0.071 | 93 | 225.55 |
| 0.073 | 94 | 232.39 |
| 0.075 | 96 | 255.63 |
| 0.079 | 90 | 243.46 |
| 0.082 | 82 | 247.38 |

Tableau III.1 : Influence de la variation du rayon des tiges de dispersion sur les caractéristiques du filtre.

D'après les données présentées dans le tableau, nous pouvons observer que la variation du rayon des tiges de dispersion a une influence sur l'efficacité d'extraction du filtre ainsi que sur son facteur de qualité. Dans notre étude, nous avons identifié le rayon $R_s = 0.075 \mu\text{m}$ comme étant le résultat optimal, pour lequel nous avons obtenu une transmission de 96 % et un facteur de qualité de 255.63. La structure du filtre correspondant au rayon optimal, ainsi que son spectre de transmission, sont représentés respectivement sur les figures III.8 et III.9. Ces résultats mettent en évidence l'importance de l'ajustement du rayon des tiges de dispersion dans l'optimisation des performances du filtre.

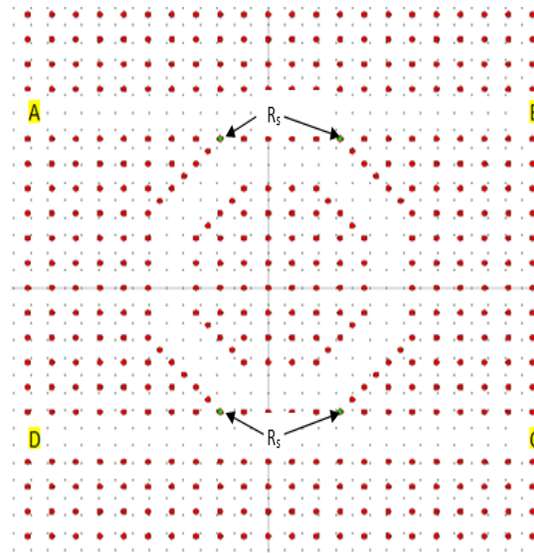


Figure III.8 : Structure schématique du filtre pour $R_s = 0.075 \mu\text{m}$.

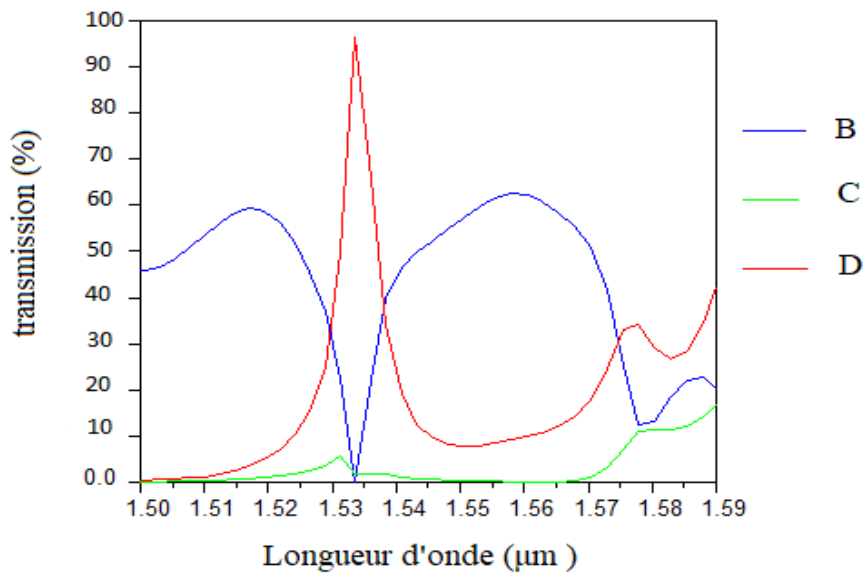


Figure III.9 : Spectre de transmission du filtre proposé avec $R_s = 0.075 \mu\text{m}$.

- **C- Troisième approche : Modification de la distance de couplage D_c**

Nous consacrons cette partie à l'étude de l'effet de la variation de la distance de couplage entre le résonateur et les guides d'onde, dans le but d'obtenir un confinement optimal dans les sections de couplage.

| Distance de couplage D_c | Transmission (%) | Facteur de qualité Q |
|----------------------------|------------------|----------------------|
| 1 | 96 | 255.63 |
| 2 | 24 | 529.68 |
| 3 | 0.88 | - |

Tableau III.2 : Influence de la distance de couplage sur la transmission et le facteur de qualité du filtre.

Le tableau III.2 présente une analyse des performances du filtre à extraction étudié en fonction de la distance de couplage. Dans un premier cas, pour une distance de $D_c=2$ (figure III.10), il est clairement observable qu’il y a une diminution de l’efficacité d’extraction jusqu’à 24% et une amélioration de la sélectivité du filtre. En revanche, pour une distance de $D_c=3$ (figure III.11), on constate qu’une transmission extrêmement faible est obtenue, pour laquelle il n’est même pas possible de calculer le facteur de qualité.

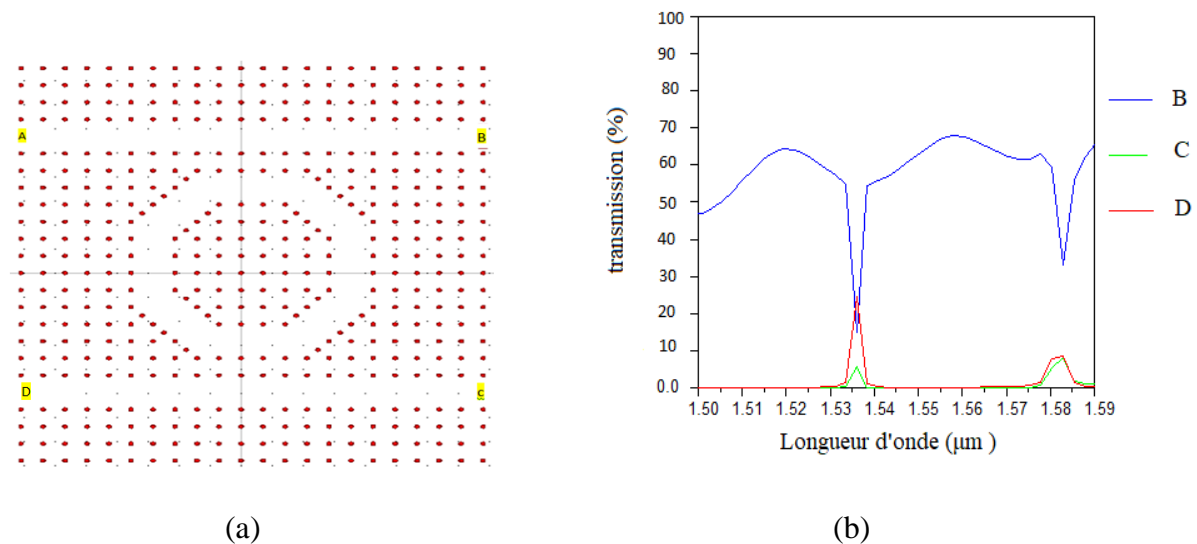


Figure III.10 : (a) structure schématique du filtre pour $D_c=2$ et (b) son spectre de transmission.

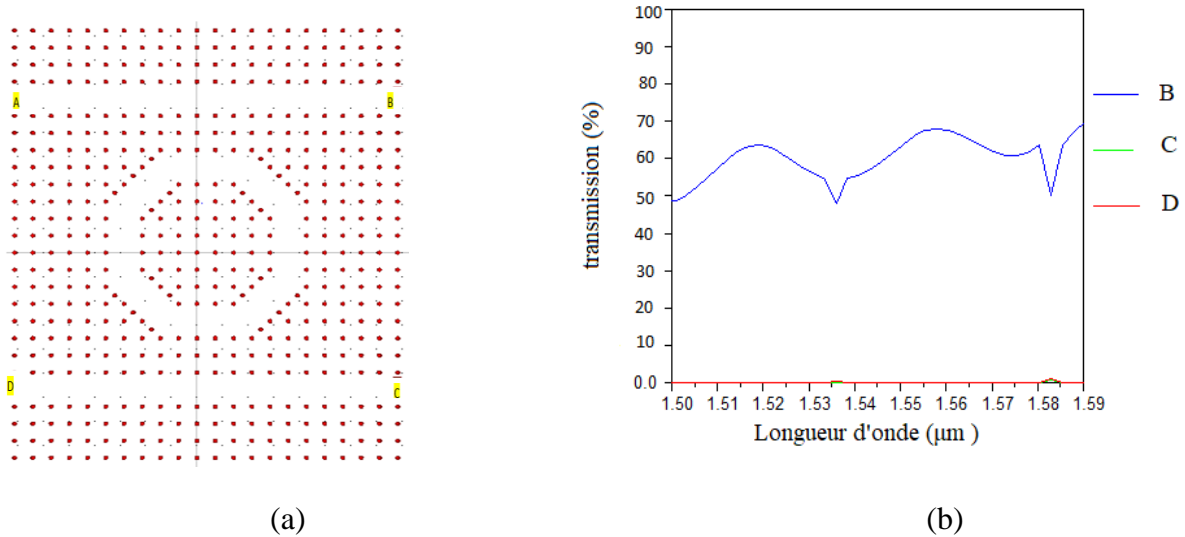


Figure III.11 : (a) structure schématique du filtre pour $D_c=3$ et son (b) spectre de transmission.

Ces résultats mettent en évidence l'importance de choisir une distance de couplage appropriée pour garantir de bonnes performances du filtre à extraction. Il est essentiel de trouver un compromis entre le facteur de qualité et l'efficacité de transmission du filtre. Dans ce cas, on retient la distance de $D_c=1$ comme résultat optimal pour laquelle la puissance extraite atteint son maximum (96%) au mode résonant $\lambda = 1.5338 \mu\text{m}$ avec un facteur de qualité de 255.63. Cela indique une réduction des pertes de couplage, ce qui signifie que le résonateur est capable de transférer efficacement la puissance du guide bus vers le guide drop.

III.4.3. Structure finale

En conclusion, nous pouvons affirmer que les conditions optimales pour ce filtre sont $R_a=0.1*a$ (rayon des tiges ajoutées), $R_s=0.075 \mu\text{m}$ (rayon des tiges de dispersion), et une distance de couplage égale à $D_c=1$, pour lesquelles, le filtre est caractérisé par une efficacité d'extraction de 96% et un facteur de qualité de 255.63 à la longueur d'onde $\lambda = 1.5338 \mu\text{m}$. La figure III.12 illustre la structure finale optimisée ainsi que son spectre de transmission.

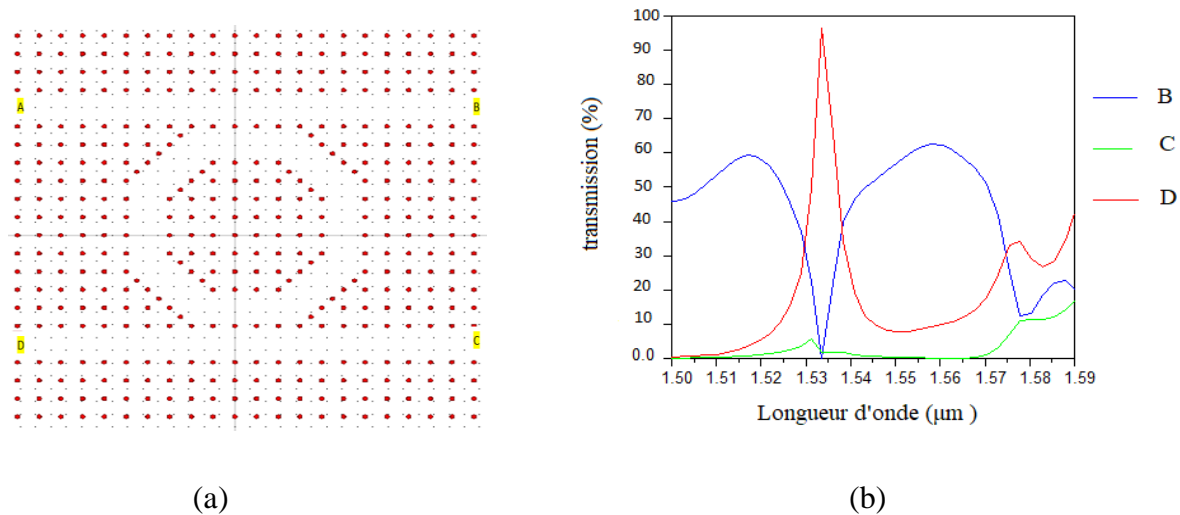


Figure III.12 :(a) la structure finale optimisée et (b) son spectre de transmission.

La figure III.13 présente les cartographies du champ réalisées à l'aide du simulateur Fullwave pour deux longueurs d'onde différentes : $\lambda = 1.5338 \mu\text{m}$ et $\lambda = 1.5503 \mu\text{m}$. À la longueur d'onde de résonance $\lambda = 1.5338 \mu\text{m}$, nous pouvons observer que le champ extrait du guide d'onde bus est transmis à travers le résonateur vers le guide d'onde drop. En revanche, pour $\lambda = 1.5503 \mu\text{m}$, nous constatons que le signal ne se couple pas (absence de résonance) et continue de se propager et sort par le port B de la structure.

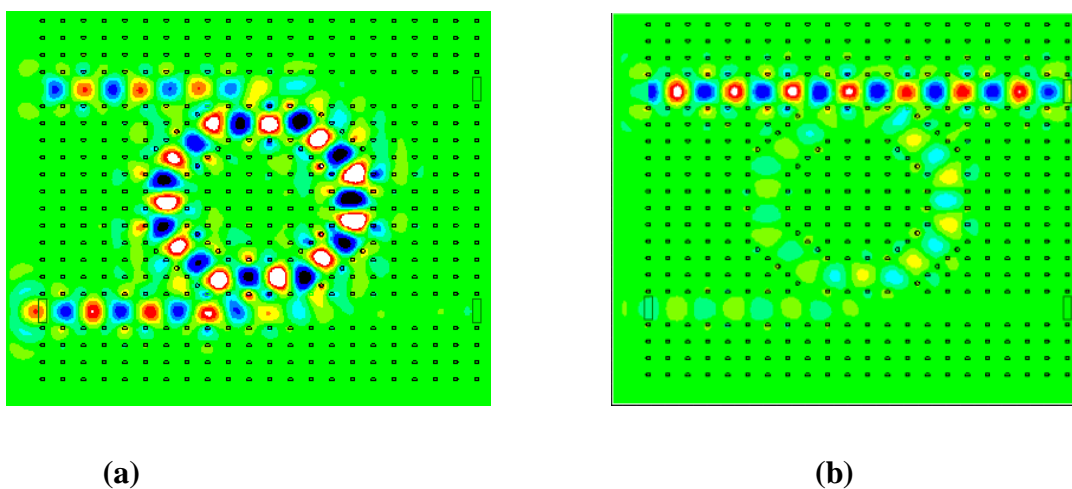


Figure III.13 : Cartographies du champ pour les longueurs d'onde : (a) $\lambda = 1.5338 \mu\text{m}$ et (b) $1.5503 \mu\text{m}$.

III.5. Filtre à base de PCRR : système à trois ports

III.5.1. Structure de base

On s'intéresse dans cette étude à un filtre d'extraction d'un résonateur en anneau à cristaux photoniques en forme de T, qui est représentée sur la figure III.14.a. Cette structure est

composée de deux guides d'onde perpendiculaire et d'un résonateur de forme octogonale qui est placé entre eux. Le guide d'entrée est créé par la suppression d'une rangée de tiges du cristal photonique dans la direction horizontale (guide bus), Tandis que Le guide de sortie (guide drop) est formé par l'omission de quelques motifs du cristal photonique dans la direction verticale. Cette structure contient trois ports, un port d'entrée et deux ports de sorties qui sont étiquetés respectivement A, B et C. La distance qui sépare le résonateur et chaque guide d'onde est égale à une seule rangée de tiges $D_c=1$. Initialement, la longueur du réflecteur est choisie égal à $L=2$ tiges.

La figure III.14.b montre le spectre de transmission obtenu à la sortie des ports B et C en utilisant le simulateur Fullwave. Selon cette figure, nous constatons l'existence d'un mode de propagation à la longueur d'onde $\lambda=1.5338 \mu\text{m}$, caractérisé par une efficacité d'extraction de 100% et un facteur de qualité $Q=225.55$. Les résultats obtenus dans cette étude indiquent qu'il reste encore des améliorations à apporter.

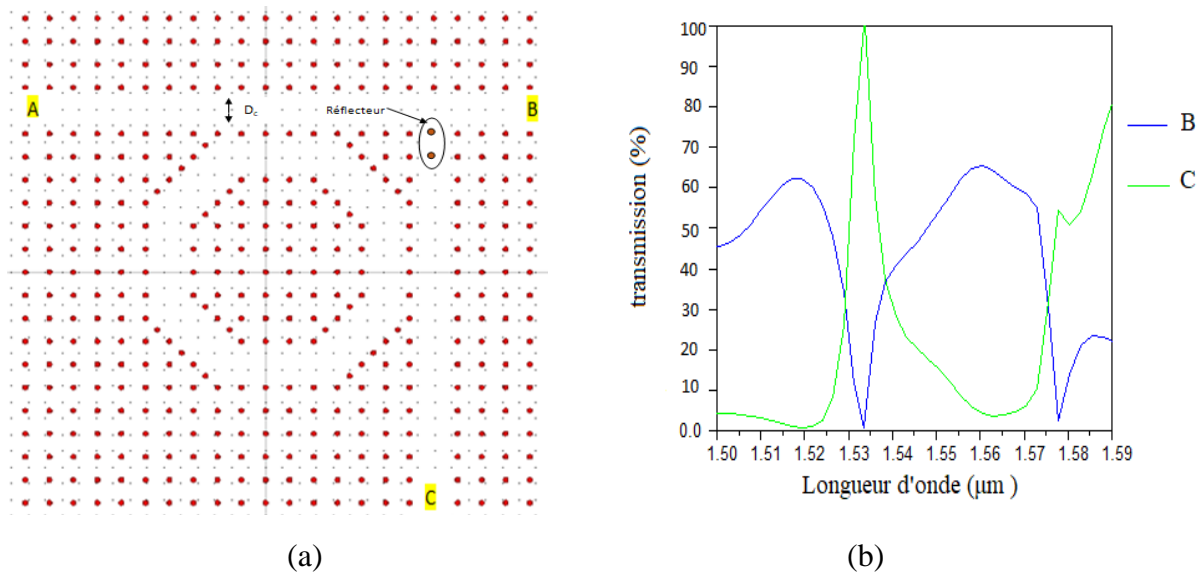


Figure III.14 : (a) Structure schématique du filtre en forme de T et son (b) spectre de transmission.

III.5.2. Structure modifiée

D'après les résultats présentés précédemment, les performances du filtre ne sont pas encore satisfaisantes et des caractéristiques clés tels que le facteur de qualité ne sont pas encore optimaux. Pour améliorer cette caractéristique, des ajustements peuvent être apportés à divers paramètres tels que la longueur du réflecteur et la distance de couplage.

a- Modification de la longueur du réflecteur L

Afin d'analyser l'effet de la longueur du réflecteur sur les caractéristiques du filtre, nous avons procédé à des simulations de la structure en variant la longueur du réflecteur. Cette étude nous permet de mieux comprendre comment cette variable influence les performances du filtre. Les résultats sont résumés dans le tableau III.3.

| Longueur du réflecteur (L) | Transmission (%) | Facteur de qualité(Q) |
|----------------------------|------------------|-----------------------|
| 2 | 100 | 225.55 |
| 3 | 100 | 260.03 |
| 4 | 100 | 228.92 |
| 5 | 81 | 213.02 |
| 6 | 81 | 383.45 |

Tableau III.3 : Influence de la longueur du réflecteur sur la transmission et le facteur de qualité du filtre.

Les résultats du tableau indiquent une légère amélioration du facteur de qualité pour différentes valeurs de L. Cela signifie que l'ajustement de la longueur du réflecteur peut avoir un impact positif sur les performances du filtre. Une longueur du réflecteur optimale permet d'améliorer le confinement de la lumière et de minimiser les pertes, ce qui se traduit par une augmentation du facteur de qualité du filtre. Cependant, il est important de noter que cette amélioration est légère, ce qui suggère que d'autres paramètres du filtre pourraient également être ajustés pour obtenir des améliorations plus significatives. Nous avons choisi la longueur L=3 comme résultat optimal en raison de sa transmission maximale et de son facteur de qualité relativement élevé. La structure schématique et la réponse spectrale du filtre optimisé à la longueur L=3 et sont illustrés sur la figure III.15.

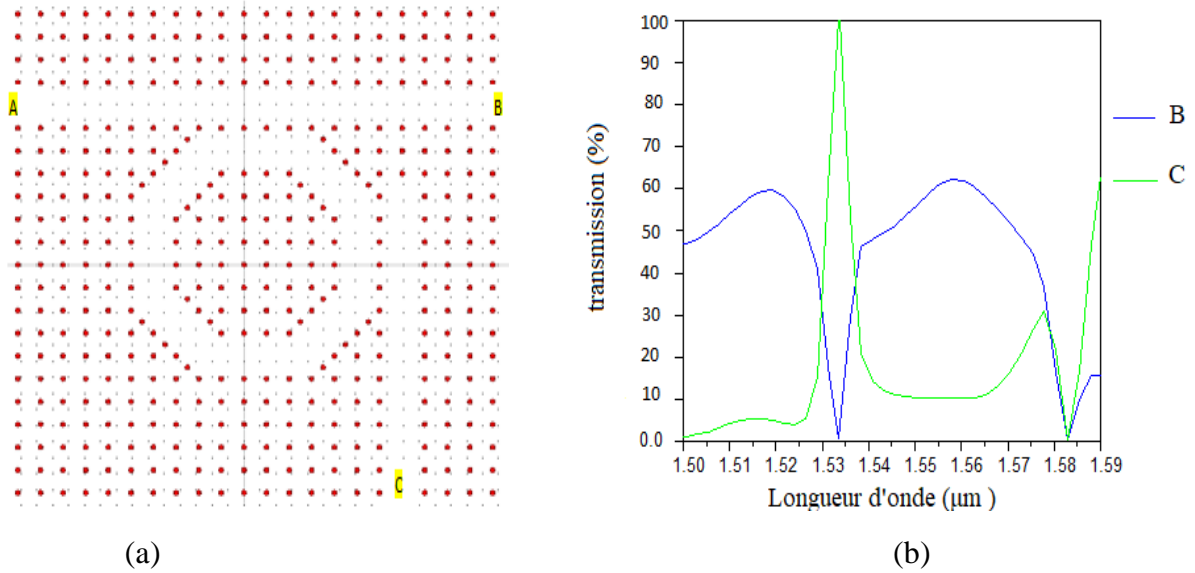


Figure III.15 : (a) structure schématique du filtre et son (b) spectre de transmission.

b - Modification du rayon des tiges de dispersion R_s

Dans cette section, nous avons apporté des modifications aux quatre tiges de dispersion situées aux coins externes du résonateur, désignées par R_s sur la figure III.16. L'objectif de cette approche est d'améliorer le facteur de qualité du filtre. En ajustant le rayon de ces tiges, nous avons cherché à optimiser le confinement de la lumière dans le résonateur et à réduire les pertes dues à ces courbures.

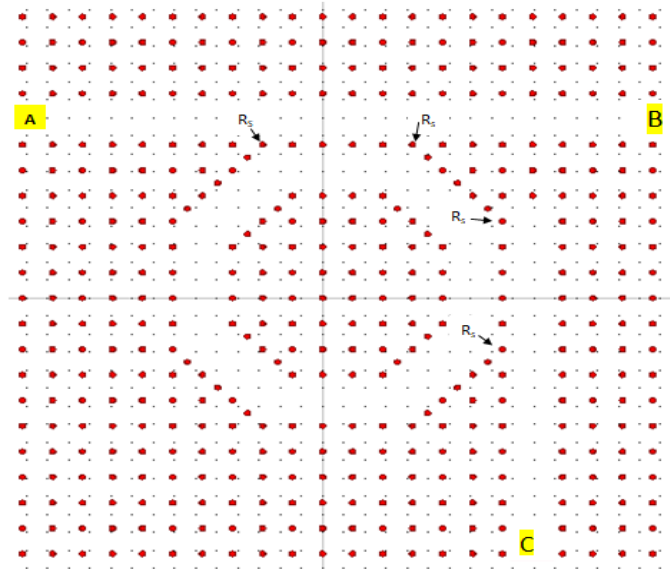


Figure III.16 : structure proposé avec la modification du rayon des tiges de dispersion.

| Rayon de des tiges de dispersion(μm) | Transmission (%) | Facteur de qualité (Q) |
|---|------------------|------------------------|
| 0.061 | 95 | 225.19 |
| 0.068 | 99 | 269.05 |
| 0.07 | 100 | 278.83 |
| 0.073 | 100 | 280.38 |
| 0.079 | 97 | 284.75 |
| 0.083 | 96 | 289.39 |
| 0.071 | 100 | 222.03 |

Tableau III.4 : Influence du rayon des tiges de dispersion sur la transmission et le facteur de qualité du filtre.

Le tableau III.4 présente l'influence de la variation du rayon des tiges de dispersion sur les caractéristiques du filtre. Ces résultats indiquent une légère amélioration du facteur de qualité en maintenant l'efficacité d'extraction à 100%. Cette observation est notée pour $R_s=0.073 \mu\text{m}$, pour laquelle le facteur de qualité relevé est égal à $Q=280.38$.

C-Modification de la distance de couplage

Dans cette partie, nous allons explorer l'effet de la distance entre le résonateur et les guides d'onde. Pour ce faire, nous allons calculer l'efficacité d'extraction et le facteur de qualité pour plusieurs valeurs de la distance de couplage D_c . Le résultat obtenu est résumé sur le tableau III.5

| Distance de couplage (D_c) | Transmission(%) | Facteur de qualité (Q) |
|--------------------------------|-----------------|------------------------|
| 1 | 100 | 280.38 |
| 2 | 44 | 590.80 |
| 3 | 5.6 | 740.39 |

Tableau III.5 : Influence de la distance de couplage sur la transmission et le facteur de qualité du filtre.

D'après ce tableau, nous observons que les valeurs de $D_c=2$ et $D_c=3$ présentent des performances moins favorables en termes de transmission par rapport à la configuration pour laquelle $D_c=1$. La transmission pour $D_c=2$ est réduite à 44% et pour $D_c=3$, la transmission est très faible à seulement 5.6%. En revanche, on note une amélioration significative dans la valeur du facteur de qualité. Il est égal à 590.80 et 740.39 pour $D_c=2$ et $D_c=3$, respectivement, alors que sa valeur était de seulement de 280.38 pour $D_c=1$.

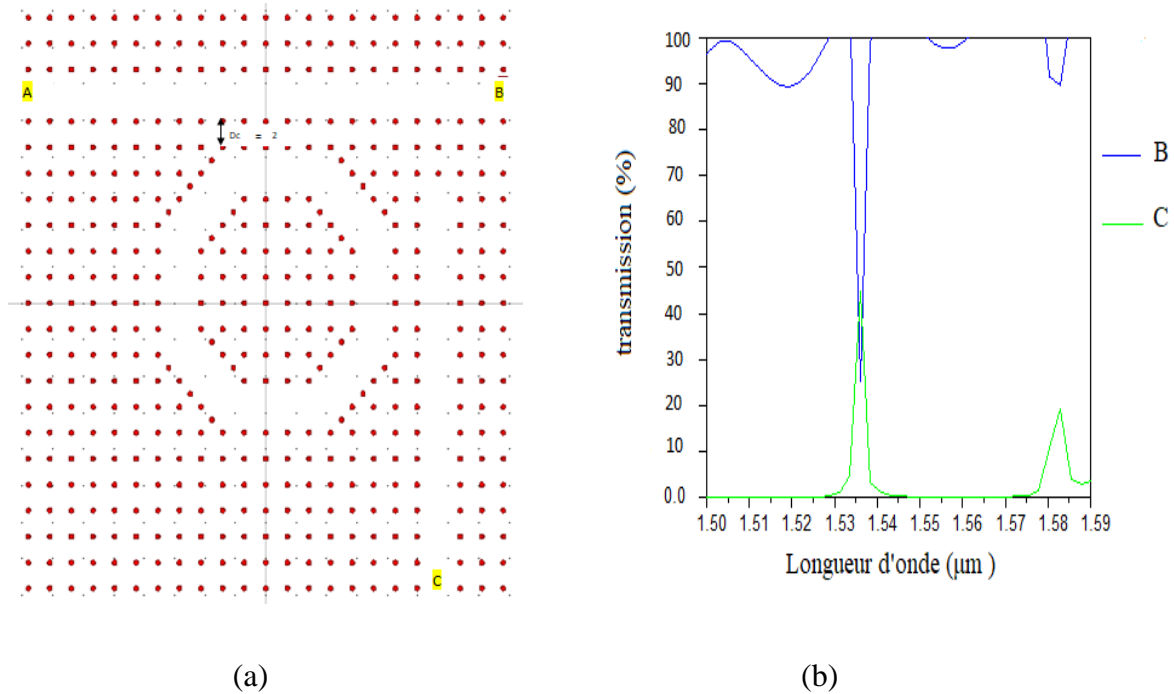


Figure II. 17 : (a) structure schématique du filtre pour $D_c=2$ et son (b) spectre de transmission.

En considérant ces résultats, nous avons identifié que la configuration avec $D_c=1$ offre les meilleures performances en termes de transmission. Par conséquent, nous retenons $D_c=1$ comme distance optimale pour notre filtre.

III.5.3. Structure finale

En menant une étude approfondie sur les performances du filtre à extraction basé sur les résonateurs en anneau à cristal photonique bidimensionnel, nous avons pu déterminer les conditions optimales pour obtenir les meilleures caractéristiques. Ces conditions comprennent la longueur du réflecteur ($L=3$ tiges), le rayon des tiges de dispersion ($R_s=0.073$ μm) et la distance de couplage ($D_c=1$ tige).

L'ensemble de ces paramètres optimaux a conduit à des performances améliorées pour notre filtre. Nous avons obtenu une efficacité d'extraction de 100% et un facteur de qualité de 280.38

à la longueur d'onde $\lambda = 1.5338 \mu\text{m}$. Ces résultats démontrent l'importance de l'optimisation de ces paramètres pour atteindre les meilleures performances. La structure schématique finale du filtre proposé et sa réponse spectrale sont illustrés sur la figure III.18.

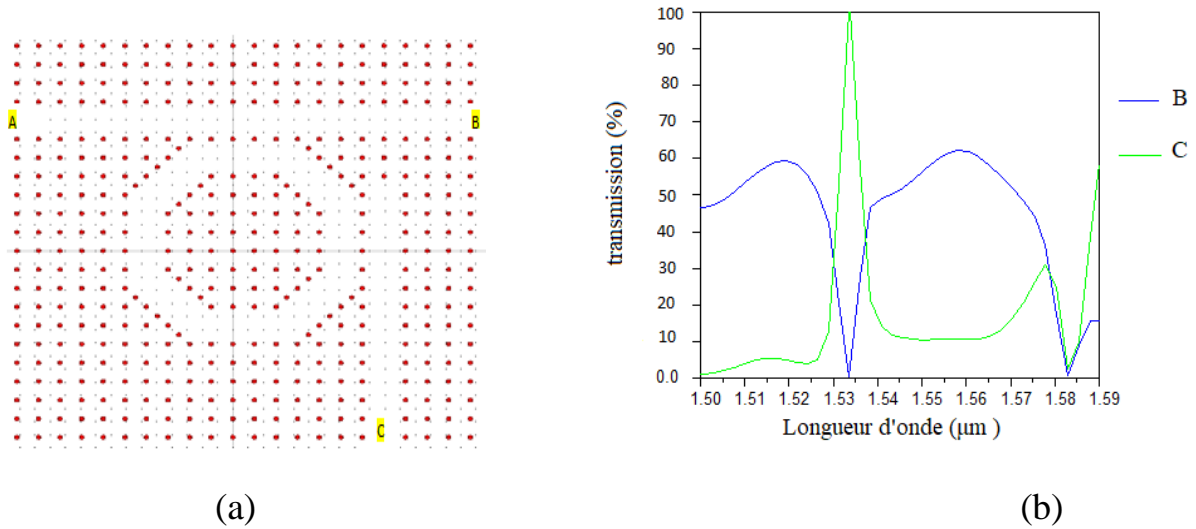


Figure III.18 : Structure finale du filtre et son (b) spectre de transmission.

La figure III.19 montre les résultats de la simulation du champ électromagnétique. À la longueur d'onde spécifique de résonance $\lambda = 1.5338 \mu\text{m}$, il y a un couplage efficace entre le guide d'onde et le résonateur en anneau. Cela signifie que le signal est complètement extrait du guide d'onde bus et transféré vers le guide d'onde drop via le résonateur (figure III.19.a). Cependant à $\lambda = 1,5502 \mu\text{m}$, le signal ne se couple pas efficacement avec le résonateur. Par conséquent, il continue de se propager dans le guide d'onde bus et sort par le port B (figure III.19. b).

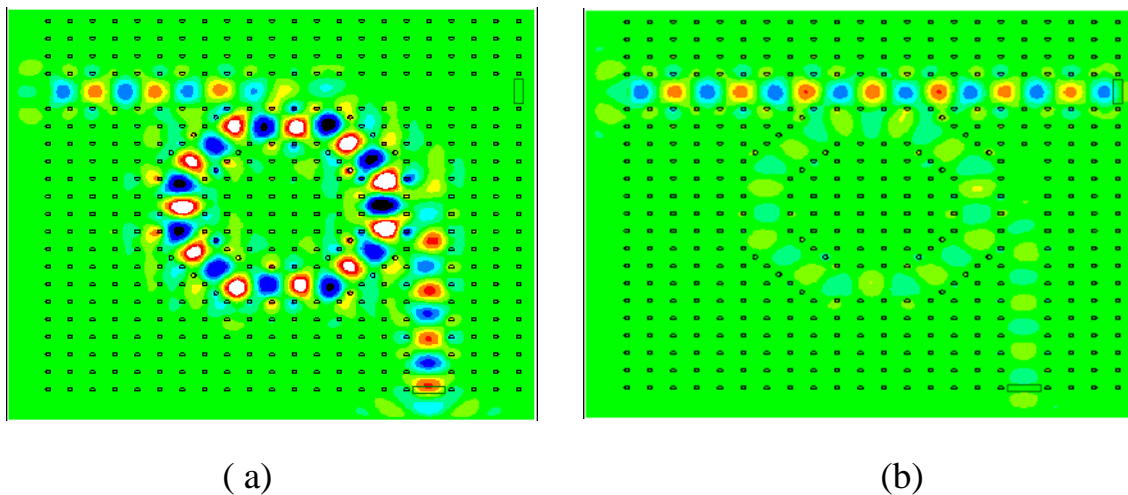


Figure III.19 : Cartographies du champ pour les longueurs d'onde : (a) $\lambda = 1.5336 \mu\text{m}$ et (b) $\lambda = 1.5502 \mu\text{m}$.

III.6. Conclusion

Ce chapitre met en évidence les résultats de nos études sur les filtres à extraction à base de résonateurs en anneau à cristaux photoniques bidimensionnels. Nous avons présenté les différentes améliorations que nous avons apportées pour optimiser leurs performances. Dans l'ensemble, ces améliorations visent à optimiser les performances de ces filtres, en offrant une meilleure sélectivité spectrale, et une plus grande efficacité d'extraction.

Les résultats obtenus jusqu'à présent nécessitent encore des améliorations supplémentaires. Bien que nous ayons réalisé des progrès significatifs dans l'optimisation des performances des filtres à base de résonateurs en anneau à cristaux photoniques bidimensionnels, il reste des défis à relever.

Référence

Référence

[1] A. Tavousi, « Wavelength-division demultiplexer based on hetero-structure octagonal shape photoniccrystal ring resonators », Optik,volume 179,pages 1169-1179,2019

Conclusion générale

Conclusion générale

Notre travail met en évidence les avantages de l'utilisation des cristaux photoniques (CPs) pour le filtrage optique. Les CPs sont des matériaux caractérisés par une variation périodique de l'indice de réfraction. Cette caractéristique permet à ces matériaux de contrôler la propagation de la lumière, créant ainsi des zones d'interdiction de propagation pour certaines longueurs d'ondes à l'intérieur du cristal photonique. Ces zones sont appelées bandes interdites photoniques. Les cristaux photoniques sont largement utilisés dans plusieurs applications comme le guidage, le filtrage, le démultiplexage et la détection.

Dans le cadre de cette étude, nous nous sommes concentrées sur l'analyse des composants optiques utilisant des cristaux photoniques bidimensionnels (CP-2D). Nous avons particulièrement focalisé notre attention sur la conception des filtres à extraction qui jouent un rôle essentiel dans les circuits photoniques intégrés et les systèmes de télécommunications optiques.

Dans un premier temps, nous avons entrepris une étude approfondie des principes fondamentaux des cristaux photoniques, offrant ainsi un aperçu général sur les différents types de ces cristaux et de leurs propriétés électromagnétiques. Nous avons également abordé les différentes méthodes numériques utilisées dans la modélisation des cristaux photoniques, en mettant en avant l'ingénierie des cristaux.

Par la suite, nous avons détaillé le concept des filtres optiques en utilisant les cristaux photoniques, en mettant en évidence leurs caractéristiques distinctives. Nous avons également présenté des exemples d'applications qui illustrent les différentes configurations de filtres à cristaux photoniques basés sur les résonateurs en anneaux à cristaux photoniques (PCRRs). Les illustrations fournies ont mis en évidence l'efficacité et la polyvalence de ces dispositifs dans des contextes pratiques spécifiques, confirmant ainsi leur pertinence et leur utilité dans des applications concrètes.

Dans la dernière partie de cette étude, nous avons développé deux configurations de filtres à extraction en utilisant la méthode des différences finies dans le domaine temporel bidimensionnel (FDTD-2D). Ces filtres sont basés sur le couplage entre des guides d'onde et des résonateurs en anneaux à cristaux photoniques de forme octogonale. Une discussion autour des paramètres permettant l'amélioration du fonctionnement de ces composants a été mise au point. Le but étant d'ajuster ces paramètres pour atteindre les performances maximales possibles.

Conclusion générale

Nos travaux de modélisation et de simulation ont permis d'optimiser les performances de ces filtres en ajustant les paramètres clés tels que le rayons des tiges de dispersion, la distance de couplage et la longueur du réflecteur. Nous avons observé des améliorations significatives dans l'efficacité d'extraction et le facteur de qualité.

Bien que nous ayons réalisé des progrès dans l'optimisation des performances des filtres à base de résonateurs en anneau à cristaux photoniques bidimensionnels, il est clair qu'il reste encore des défis à surmonter. Cependant, avec une recherche continue et des efforts de développement, nous sommes confiants dans le fait que ces défis pourront être relevés et que les filtres à cristaux photoniques connaîtront de nouvelles avancées, ouvrant ainsi la voie à de nombreuses applications prometteuses dans le domaine de l'optique et des télécommunications.

Résumé

Les cristaux photoniques sont des matériaux artificiels dont l'indice diélectrique varie périodiquement selon une ou plusieurs directions de l'espace. Cette périodicité entraîne l'apparition de gammes de longueurs d'onde pour lesquelles la lumière ne peut pas se propager dans la structure.

Dans cette étude, nous nous sommes concentrés sur l'analyse des filtres à extraction basés sur le couplage latéral entre des guides d'onde et des résonateurs en anneaux à cristaux photoniques (PCRRs). Nous avons présenté deux types de filtres : le premier comprenant un PCRR positionné entre deux guides d'onde parallèles, tandis que la deuxième comporte un PCRR inséré entre deux guides d'onde perpendiculaires. Les propriétés de ces filtres ont été étudiées numériquement en utilisant la méthode des différences finies dans le domaine temporel à deux dimensions (2D-FDTD).

Mots clés : Cristaux photoniques, bande interdite photonique, PCRR, filtre.

Abstract

Photonic crystals are artificial materials in which the refractive index varies periodically in one or more directions of space. This periodicity leads to the emergence of wavelength ranges for which light cannot propagate through the structure.

In this study, we focused on the analysis of extraction filters based on the lateral coupling between waveguides and photonic crystal ring resonators (PCRRs). We presented two types of filters : the first one consisting of a PCRR positioned between two parallel waveguides, while the second one involves a PCRR inserted between two perpendicular waveguides. The properties of these filters were numerically investigated using the two-dimensional finite-difference time-domain method (2D-FDTD).

Keywords : Photonic crystals, photonic band gap, PCRR, filter.