

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

Université Abderrahmane Mira

Faculté de Technologie



Département d'Automatique, Télécommunication et d'Electronique

Projet de Fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Télécommunication

Spécialité : Réseaux et télécommunication

Thème

Etude et conception d'un démultiplexeur 4 canaux à base de cristaux photoniques bidimensionnels

21 /10/2021

Réalisé par :

Benaziez Anissa

Cherdouh Ghiles

Dirigé par :

Mme Bendjelloul Rahima

Examiné par :

Mme Hamzaoui Dehbia

Mme Bouncer Samira

Année universitaire : 2020/2021

Remerciements

Avant tout, nous remercions le **BON DIEU** pour nous avoir aidés à accomplir ce présent travail.

Au nom de la science et de la technologie, au nom de la vertu du travail et de l'esprit d'élévation de la connaissance, nous tenons à exprimer tous nos respects à notre encadreur **Mme R. BENDJELLOUL**, pour le sujet qu'elle nous a proposé, ses soutiens, ses précieux conseils et ses critiques positives. Nous adressons tout particulièrement à **Mme D.Hamzaoui**, nos sincères reconnaissances et nos remerciements les plus vifs, pour l'honneur qu'elle nous a fait en acceptant la présidence du jury. Nous voudrions également exprimer nos remerciements à **Mme Bouncer Samira**, qu'elle veuille bien trouver ici l'expression de nos profondes reconnaissances pour avoir fait partie du jury.

En fin, que toutes les personnes ayant participé de près ou de loin à la réalisation de ce projet, trouvent ici l'expression de nos profonds remerciements.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail et ma profonde gratitude

A tous ceux qui se sont sacrifié pour m'offrir les conditions propices à ma réussite:

A mon cher père

A ma chère mère

A mes frères et mes sœurs

A toute ma famille

A mes amis

A toute personne qui aime le savoir et défie les difficultés.....

Anissa

Dédicace

*À mes très chers parents qui se sont toujours sacrifiés pour me voir réussir,
que dieu leur procure bonne santé et longue vie.*

*Aux personnes dont j'ai bien aimé la présence dans ce jour ; mes proches de
mes frères et mes sœurs, chacun à son nom*

À toute la famille

À tous mes amis

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce

Projet soit possible, je vous dis merci.

Ghíles

Table des matières

Liste des Liste des symboles et abréviation.....	i
Liste des tableaux	ii
Introduction générale	
Introduction générale.....	1
CHAPITRE I : Généralité sur les cristaux photoniques	
I.1.Introduction.....	3
I.2.Définition.....	3
I.3.Analogie électron-photon.....	3
I.4.Les différent type de cristaux photoniques.....	5
I.4.1.Les cristaux photoniques unidimensionnelles CPs-1D.....	6
I.4.2.Les cristaux photoniques unidimensionnelles CPs-2D.....	6
I.4.1.1.Propriétés physiques d'un CPs-2D	7
A. Contraste d'indice.....	7
A.1. Fort contraste d'indice (approche membrane).....	7
A.2. Fort contraste d'indice (approche substrat).....	7
I.4.2.2.Maille élémentaire.....	7
I.4.3.Les cristaux photoniques unidimensionnelles CPs-3D.....	7
I.5. Quelques définitions	8
I.6.Réseau réciproque.....	8
I.7.Zone de Brillouin.....	9
I.8 Diagrammes de bandes.....	10
I.9.Défauts dans les cristaux photoniques.....	11
I.9.1.Défauts dans un cristal photonique bidimensionnel.....	11
I.10.Application des cristaux photoniques.....	12

I.10.1. Les fibres optiques.....	12
I.10.2. Capteurs à cristaux photoniques.....	13
I.11. Techniques de modélisation.....	13
I.11.1. Méthodes des ondes planes (PWE).....	13
I.11.2. Méthode FDTD (Finite Différence Time Domain).....	14
I.9. Conclusion.....	14
Références	14

CHAPITRE II : Les démultiplexeur à base de cristaux photoniques

II.1. Introduction.....	16
II.2. Démultiplexeur à base de cristaux photoniques.....	16
II.3. Résonateurs en anneaux à cristaux photoniques (PCRRs).....	18
II.3.1. Caractéristique des résonateur en anneaux	19
II. 3.1.1. Facteur de qualité.....	19
II. 3.1.2. Finesse.....	20
II.4. Couplage des résonateurs avec les guides d'onde	21
II.5. Démultiplexeur à base de PCRR	21
II.6. Quelques topologies	22
II.7. Conclusion.....	24
Références.....	24

CHAPITRE III : Résultats et interprétations

III.1. Introduction.....	26
III.2. Présentation du logiciel.....	26
III.2.1. Le simulateur FullWAVE	26
III.2.2 Le simulateur BandSOLVE	27
III.3. Structure sans défauts	28

III.4. Structure avec défauts	30
III.4.1.Filtre à base de résonateur en anneau à cristal photonique	30
III.4.2. Optimisation du filtre.....	32
III.5.Démultiplexeur à bases de résonateurs en anneaux à cristaux photoniques.....	34
III.6. Conclusion.....	37
Conclusion générale	
Conclusion générale.....	37

Liste des symboles et abréviation

1D : Unidimensionnel.

2D : Bidimensionnel.

3D : Tridimensionnel.

λ : Longueur d'onde.

a : Période du cristal photonique.

r : Rayon du cristal photonique.

f : Facteur de remplissage.

n : Indice de réfraction.

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

η : est la constante de Planck réduite.

C : Célérité de la lumière dans le vide.

W : Pulsation.

ϵ : Permittivité diélectrique.

μ : Perméabilité magnétique.

TM :transverse électrique, la polarisation magnétique.

TE :transverse magnétique, la polarisation électrique.

BIP:Bande Interdite Photonique.

CP: Cristal Photonique.

FDTD-2D:BidimensionalFiniteDifference Time Domain.

PBG :Photonic Band Gap.

Liste des figures

CHAPITRE I : Généralité sur les cristaux photoniques

Figure I.1: Représentation schématique des différents types des cristaux photoniques : unidimensionnel (A), bidimensionnel (B) et tridimensionnel (C)[1]

Figure 1.2 : Structures bidimensionnelles : (a) connectée, (b) déconnectée [5].

Figure 1.3 : Structure 2D : (a) structure carrée, (b) structure triangulaire, (c) structure hexagonale.

Figure I.4 : Polarisation possible dans une structure à bande interdite photonique bidimensionnelle.

Figure I.5 : Réseau réel, réciproque, première zone de Brillouin et zone de Brillouin irréductible pour les réseaux 2D (a) carré et (b) triangulaire.

Figure 1.6 : Diagrammes de bandes d'une structure bidimensionnelle pour les polarisations TE (en rouge) et TM (en bleu).

Figure 1.7 : Défauts ponctuels : (a) Défaut lacunaire, (b) et (c) Défauts de substitutions.

Figure 1.8 : Diagramme de bandes 2D d'une cavité H1 en polarisation TE [15].

Figure 1.9 : Photographie d'une fibre à trous, de diamètre de cœur (au centre) de $1\mu\text{m}$ [18].

CHAPITRE II: Les démultiplexeur à base de cristaux photoniques

Figure II.1 : Démultiplexeur à 8 canaux.

Figure II.2 : démultiplexeur à base de guides d'onde en cascade (a), démultiplexeur à base de cavités résonantes (b)

Figure II.3 : Résonateurs en anneaux à cristaux photoniques : (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 [26].

Figure II.4 : Réponse spectrale d'un résonateur en anneau

Figure II.5 : Représentation schématique d'un démultiplexeur à base de PCRRs.

Figure II.6 : Représentation schématique (a) d'un démultiplexeur constitué de trois CDFs en cascade et (b) d'un démultiplexeur hétéro-structure [35, 36].

Figure II.7 : Structure schématique du démultiplexeur proposé par [37].

CHAPITRE III : Résultats et interprétations

Figure. III.1: Fenêtre principale des paramètres de simulation de FullWAVE.

Figure.III.2: Fenêtre principale des paramètres de simulation de BandSOLVE.

Figure III.3 : Structure d'étude.

Figure III.4 : Diagramme de bandes de la structure d'étude.

Figure III.5 : Représentation schématique de l'élément fondamental constituant le démultiplexeur.

Figure III.6 : Spectre de transmission du filtre.

Figure III.7 : schéma optimale de filtre.

Figure III.8 : (a) Transmission et (b) facteur de qualité du CDF en fonction du rayon (r_s) des quatre tiges (s).

Figure 4.9: spectre de transmission de la structure optimisée du filtre.

Figure III.10 : Représentation schématique du démultiplexeur.

Figure III.11 : Spectre de transmission du démultiplexeur.

Figure III.12 : Représentation schématique du démultiplexeur pour $D=5$.

Figure III.13 : Spectre de transmission du démultiplexeur pour $n=5$.

Figure III. 14: Répartition du champ dans le démultiplexeur aux longueurs d'onde : (a) $\lambda=0.15827 \mu\text{m}$, (b) $\lambda = 0.158528 \mu\text{m}$, (c) $\lambda = 0.15872 \mu\text{m}$ et (d) $\lambda = 0.1589 \mu\text{m}$.

Liste des figures

Liste des tableaux

Tableau III.1 : influence du rayon 'R' sur la longueur d'onde de sortie du filtre.

Tableau III.2 : Caractéristiques du démultiplexeur.

Tableau III.3 : Caractéristiques du démultiplexeur proposé pour différentes valeurs de 'd'.

Introduction générale

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

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

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

L'application des cristaux photoniques en tant que démultiplexeur constitue un domaine de recherche très prometteur en raison de leur extrême miniaturisation, leur meilleur confinement de la lumière et leur intégration possible. Le démultiplexeur à cristaux photoniques représente un élément fondamental pour les chaînes de la télécommunication optique. Pour cela, Nous étudions la propagation des ondes dans ces structures à base de couplage guide à cristaux photoniques et résonateur en anneau dans le but de réaliser des démultiplexeurs à l'aide du logiciel FullWAVE.

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

Le premier chapitre est une introduction générale à l'étude des propriétés des cristaux photoniques. Nous présenterons ensuite le phénomène d'ouverture de bandes interdites et les différents types des cristaux photoniques, nous focaliserons notre étude sur les cristaux bidimensionnels (CPs-2D). Nous continuerons par une présentation des principaux défauts qui existent aux niveaux des cristaux photoniques. Enfin, Nous terminerons ce chapitre par quelques applications des cristaux photoniques.

Dans le deuxième chapitre, nous parlerons des démultiplexeurs à base de cristaux photoniques 2D. Nous porterons une attention particulière au résonateur en anneau à base de cristaux photoniques, qui sera l'élément de base de notre démultiplexeur. Nous terminerons par la présentation de quelques topologies des démultiplexeurs à base de différentes formes de résonateurs en anneaux.

Dans le troisième chapitre, nous décrirons les outils numériques nécessaires à l'étude des démultiplexeurs à cristaux photoniques. Nous discuterons les résultats de simulation obtenus en utilisant le simulateur FullWAVE, basé sur la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD). A partir de ces résultats, nous confirmerons la faisabilité d'un démultiplexeur quatre canaux à base de résonateur en anneaux aux cristaux photoniques.

Enfin, nous terminerons notre travail par une conclusion générale.

References

- [1] E. YABLONOVITCH., Physical Review Letters, 58(20), 20592062 (1987).
- [2] S. JOHN., Physical Review Letters 58, 2059 (1987).
- [3] E. Yablonovitch, « Photonic band-gap crystals », J. Phys: Condensed Matter, Vol 5 N°16, pp. 2443-2460, 1993.
- [4] P. C. Lacaze, « Les nanotechnologies : Concepts et applications », Lavoisier, pp 113-114, 2013.

I.1.Introduction

Les matériaux artificiellement structurés « cristaux photoniques (CPs) » ont suscité un grand intérêt dans plusieurs travaux de recherches ses dernières années. Ces structures également connus sous le nom de structures à bandes interdites photonique (BIP), permettent de manipuler la lumière à l'échelle de la longueur d'onde sur une, deux ou trois directions de l'espace.

Ce premier chapitre est une introduction générale sur les cristaux photoniques. Nous débuterons par la définition des cristaux photoniques, puis nous feront une analogie électrons-photon. Nous continuerons par une présentation des différents types des cristaux photoniques ainsi que les défauts existants, nous verrons aussi leurs applications ainsi que les différentes techniques de modélisation.

I.2.Définition

Les cristaux photoniques (PC) sont des matériaux qui possèdent une constante diélectrique périodiquement modulée, avec les propriétés de confiner et de contrôler la propagation de la lumière en raison de l'existence d'une bande interdite photonique (BIP), il s'agit d'une bande de fréquences dans laquelle la propagation de la lumière dans le cristal photonique est interdite [1]. Selon les variations de l'indice de réfraction et de la période dans l'espace, il existe des cristaux photoniques unidimensionnels (1D), bidimensionnels (2D) et tridimensionnels (3D).

I.3.Analogie électron-photon

La théorie des cristaux photoniques s'inspire très largement de la similitude entre un photon qui se propage dans un cristal photonique et un électron dans un semi-conducteur. En effet, l'équation de Schrödinger, régissant le déplacement des électrons dans un matériau caractérisé par un potentiel périodique est analogue à l'équation de propagation, dérivée des équations de Maxwell, utilisée pour décrire la propagation d'une onde électromagnétique dans un matériau caractérisé par sa constante diélectrique périodique ϵ [2].

Avant de montrer les similitudes qui existent entre ces deux équations, commençons d'abord par écrire les équations de Maxwell qui gouvernent le comportement des systèmes optiques et électromagnétiques.

Dans le cas d'un milieu diélectrique, linéaire, isotrope, non magnétique, et en l'absence de charges et de courants, les équations de Maxwell s'expriment de la manière suivante [3] :

$$\nabla \cdot (\varepsilon(r) \cdot E(r, t)) = 0 \quad (I.1)$$

$$\nabla \cdot H(r, t) = 0 \quad (I.2)$$

$$\nabla \times E(r, t) = -u_0 \frac{\partial H(r, t)}{\partial t} \quad (I.3) \quad (I)$$

$$\nabla \times H(r, t) = \varepsilon_0 \varepsilon(r) \frac{\partial E(r, t)}{\partial t} \quad (I.4)$$



Où E et H désignent respectivement les champs électrique et magnétique, ε est la permittivité relative appelée aussi la constante diélectrique, ε_0 et u_0 représentent la permittivité diélectrique et la perméabilité magnétique du vide, r et t représentent les dépendances spatiales et temporelles.

Par manipulation des deux dernières équations, on obtient l'équation de propagation pour le champ électrique et en suivant les étapes suivantes :

En appliquant l'opérateur rotationnel dans (I. 3), on obtient :

$$\nabla \times (\nabla \times E(r, t)) = -u_0 \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times H(r, t)) \quad (I.5)$$

En introduisant l'équation (I. 4) dans l'équation (I. 5), cette dernière devient :

$$\nabla \times (\nabla \times E(r, t)) = -u_0 \varepsilon_0 \varepsilon(r) \frac{\partial^2 E(r, t)}{\partial t^2} \quad (I.6)$$

La recherche de solutions harmoniques $E(r, t) = E(r)e^{-i\omega t}$ aboutit à :

$$\nabla \times (\nabla \times E(r)) = \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon(r) E(r) \quad (I.7)$$

On sait que :

$$\nabla \times (\nabla \times E(r)) = \nabla \cdot (\nabla \cdot E(r)) - \Delta E(r)$$

$$\nabla E(r) = 0 \quad \Rightarrow \nabla \cdot (\nabla \cdot E(r)) = 0$$

On a aussi :

$$\Delta E(r) = \nabla^2 E(r)$$

On aura donc :

$$\nabla^2 E(r) = -\frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon(r) E(r) \quad (I.8)$$

C'est l'équation de propagation d'une onde électromagnétique dans un milieu de constante diélectrique $\varepsilon(r)$.

$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}}$: La vitesse de la lumière

ω : Pulsation

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 [4] :

$$\nabla^2 \Psi(r) = -\frac{2m}{\hbar^2} (E - V(r)) \Psi(r) \quad (1.9)$$

Où : E est l'énergie de l'électron, m sa masse.

\hbar : est la constante de Planck réduite.

Dans ce cas, l'équation de Schrödinger qui régit le comportement des électrons dans un potentiel V (équation I. 9) est analogue à l'équation de propagation des photons dans un milieu de constant diélectrique (équation I. 8). Ainsi, de la même manière que la périodicité du potentiel cristallin d'un semi-conducteur entraîne l'apparition de bandes interdites en énergie pour les électrons, la périodicité de la constante diélectrique d'un cristal photonique est à l'origine de domaines de fréquences pour lesquels le cristal ne supporte pas de mode électromagnétique, autrement dit, pour lesquels la lumière ne peut se propager dans la structure [2].

I.4. Les différents types de cristaux photoniques

Il existe différents types de cristaux photoniques qui sont classés selon leur dimensionnalité en trois types comme le montre la figure I.1 :

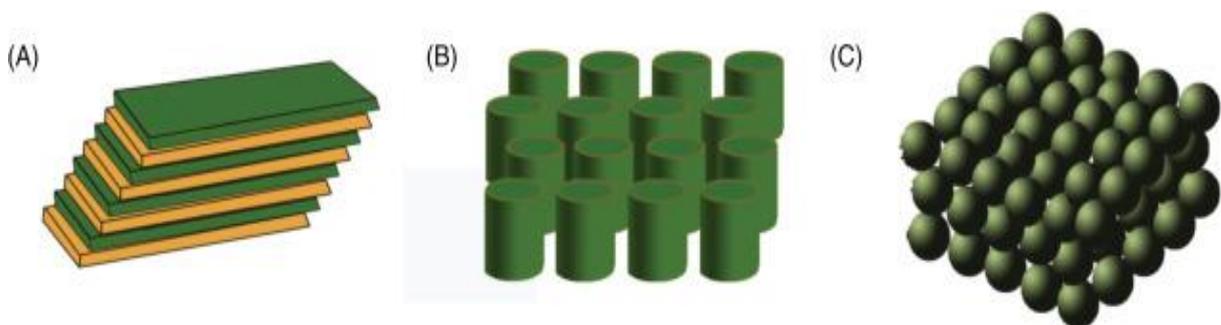


Figure I.1 : Représentation schématique des différents types de cristaux photoniques : unidimensionnel (A), bidimensionnel (B) et tridimensionnel (C)[1].

I.4.1. Les cristaux photoniques unidimensionnels CPs-1D

Les cristaux photoniques à une dimension CP-1D, appelés aussi « Miroirs de Bragg » sont des successions de couches d'indices de réfraction différents, empilées, de manière périodique

I.4.2. Les cristaux photoniques bidimensionnels (CPs -2D)

Un cristal photonique bidimensionnel est une structure qui présente une modulation périodique de la permittivité diélectrique suivant deux directions de l'espace, et homogène dans la troisième. Les propriétés optiques des structures bidimensionnelles sont fortement dépendantes de la polarisation de l'onde électromagnétique. Il existe plusieurs façons de réaliser ces structures bidimensionnelles. Par exemple, on peut placer des tiges diélectriques dans l'air appelé structure déconnectée ou encore dans un autre diélectrique appelé structure connectée (figure I.2). Afin d'ouvrir des bandes interdites larges, il faut un contraste d'indice (différence entre les indices du milieu et des tiges) suffisamment grand [5].

Les réponses optiques de ces structures dépendent de la polarisation de l'onde électromagnétique qui peut être soit de type TE (Transverse Electric) ou bien TM (Transverse magnétique) et peuvent ne pas posséder une bande interdite complète.

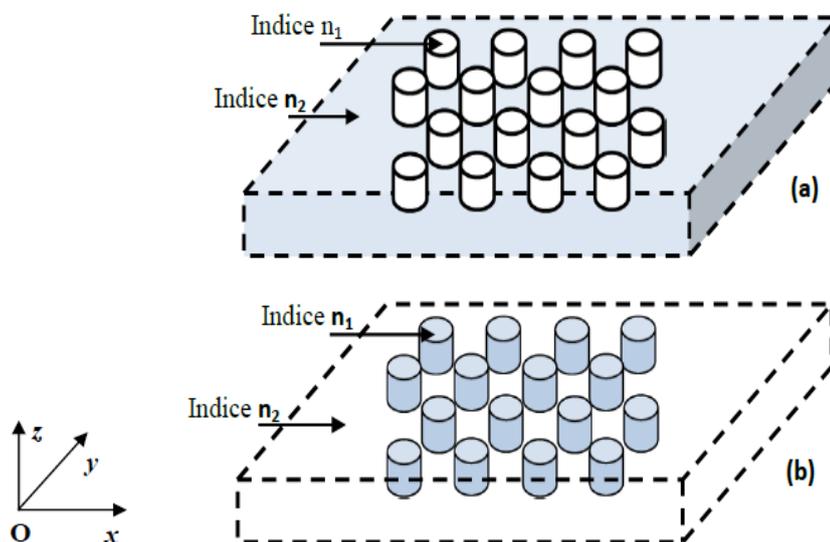


Figure 1.2 : Structures bidimensionnelles : (a) connectée, (b) déconnectée [5].

I.4.2.1. Propriétés physiques d'un CP-2D

A. Contraste d'indice

A.1. Fort contraste d'indice (approche membrane)

Les confinements à fort contraste d'indice sont généralement obtenus à l'aide d'une membrane semi-conductrice suspendue dans l'air, une couche de Si (silicium) ou encore une couche de GaAs (Arséniure de gallium)

Un fort contraste d'indice permet un bon confinement vertical de la lumière et limite les pertes de propagation. De plus, la profondeur nécessaire des trous est plus petite que dans le cas des faibles contrastes d'indice (quelques centaines de nanomètres au lieu de plusieurs micromètres), donc la gravure est plus facile. En revanche, ces structures sont plus fragiles (membranes suspendues dans l'air) et souffrent d'une mauvaise évacuation thermique qui peut poser des problèmes pour certaines applications comme les lasers.

A.2. Faible contraste d'indice (approche substrat)

Si la différence d'indice entre les deux milieux est faible ($\Delta n \approx 0,1 - 0,2$), on parle d'approche substrat. Dans ce cas, le confinement vertical est faible et les pertes de propagation peuvent être importantes dans certaines situations. L'épaisseur de la couche guidant doit être relativement importante (supérieure au micromètre) pour conserver un guidage monomode.

I.4.2.2. Maille élémentaire

Les structures 2D sont des cristaux dont la permittivité diélectrique est périodique dans les deux dimensions et reste invariante dans la troisième dimension. Elles se regroupent principalement suivant trois familles qui sont illustrées sur la figure I.3 [5].

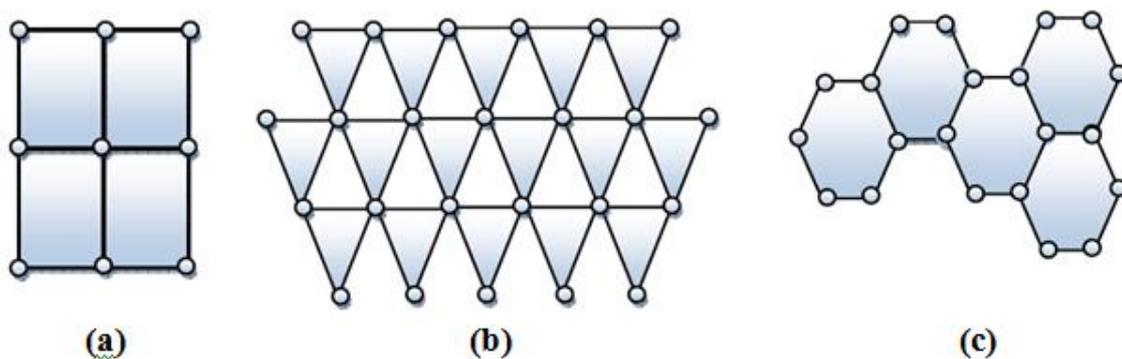


Figure 1.3 : Structure 2D : (a) structure carrée, (b) structure triangulaire, (c) structure hexagonale.

I.4.3. Les cristaux photoniques tridimensionnels (CPs-3D)

Les cristaux photoniques tridimensionnels (CPs-3D) suscitent encore beaucoup d'intérêts. Ce sont des structures périodiques suivant les trois directions de l'espace.

Il existe un grand nombre de structures possibles. Le premier cristal photonique tridimensionnel a été formé de sphères de silicium arrangées selon une structure diamant.

I.5. Quelques définitions

I.5.1. Polarisation

Si on prend comme exemple un cristal photonique à deux dimensions avec des tiges, le calcul du diagramme de bande de ce cristal nous renseigne sur les propriétés (la position et la largeur) des bandes interdites photoniques pour chaque polarisation.

- La polarisation TE lorsque le champ magnétique est parallèle à l'axe des tiges, comme le montre la figure I.4.b.
- La polarisation TM lorsque le champ électrique est parallèle à l'axe des tiges, comme il est schématisé sur la figure I.4.a.

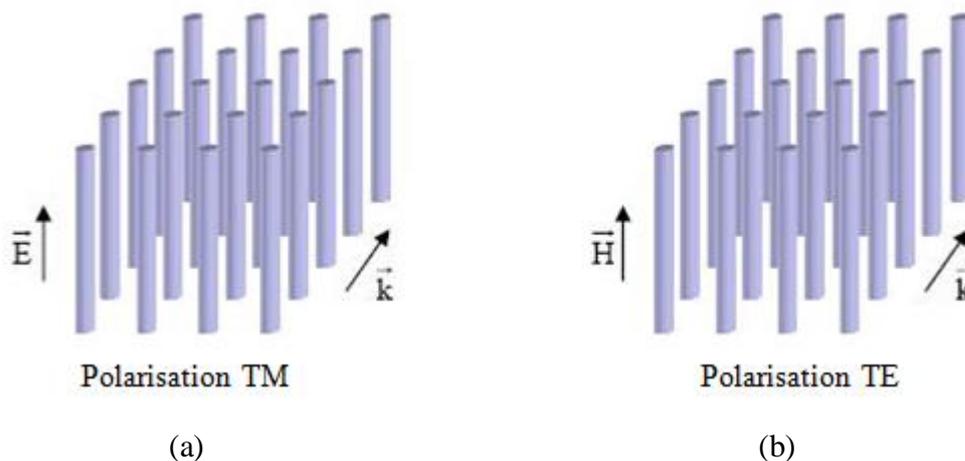


Figure I.4 : Polarisations possible dans une structure à bande interdite photonique bidimensionnelle.

I.6. Réseau réciproque

Un réseau cristallin est constitué par la répétition périodique dans les trois dimensions de l'espace d'une maille élémentaire. Les vecteurs de base de la maille élémentaire définissent une base \vec{a}_i qui représente les vecteurs primitifs du réseau.

Dans l'étude des cristaux photoniques, la représentation des diagrammes de bandes se fait pour des composantes du vecteur d'onde k . Pour travailler avec ce vecteur d'onde, on utilise une nouvelle base appelée base réciproque. Cette dernière est définie à partir des vecteurs de base du réseau direct, correspondant au réseau du cristal photonique dans l'espace physique, grâce à la transformation :

$$\vec{a}_i, \vec{b}_j = 2\pi\delta_{ij}$$

Avec \vec{a}_i , les vecteurs de base du réseau direct, \vec{b}_j les vecteurs de base du réseau réciproque et δ_{ij} le symbole de Kronecker.

C'est cette base qui va nous permettre de définir la zone de Brillouin dans l'espace des vecteurs d'onde (réseau réciproque) pour représenter les courbes de dispersion.

I.7.Zone de Brillouin

Les zones de Brillouin (ZB) sont des régions qui partitionnent l'espace réciproque associé au cristal. Il en existe une infinité et peuvent être définies à l'aide des plans de Bragg qui sont les plans médiateurs de l'ensemble des vecteurs formés par des combinaisons linéaires des vecteurs du réseau réciproque.

On appelle zone de Brillouin irréductible la plus petite surface qui permet de déduire la relation de dispersion dans tout l'espace réciproque. 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 M, Γ et X. Dans 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, M, Γ et K. Le vecteur d'onde parcourt ainsi les directions de plus haute symétrie:

X Γ , M Γ et MX pour le réseau carré, et : K Γ , M Γ et MX pour un réseau triangulaire.

La figure 1.5 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. Les points de haute symétrie du réseau réciproque sont également reportés sur la figure 1.7 pour les deux types de réseaux.

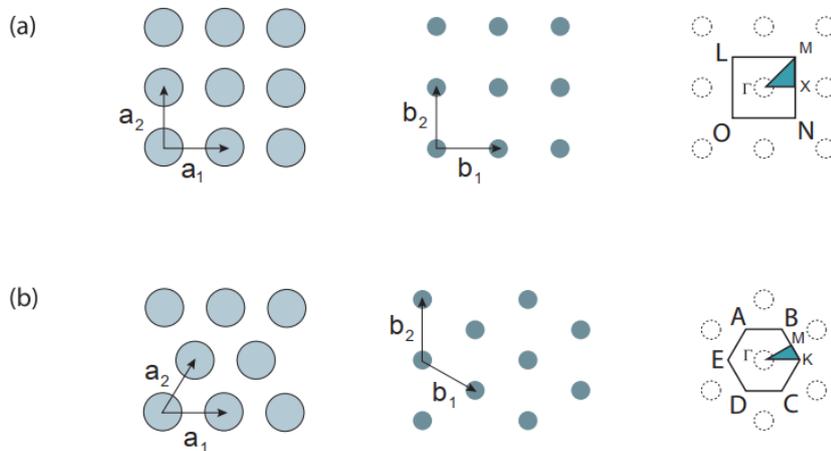


Figure I.5 : Réseau réel, réciproque, première zone de Brillouin et zone de Brillouin irréductible pour les réseaux 2D (a) carré et (b) triangulaire.

I.8 Diagrammes de bandes

Pour calculer les diagrammes de bandes il faut considérer pour chaque cristal, toutes les directions de propagation possibles. Comme en physique du solide [6], on montre que pour certaines symétries du cristal, on peut limiter l'étude aux vecteurs d'ondes k situés à l'intérieur d'une zone restreinte appelée zone de Brillouin irréductible. Le vecteur k varie le long des directions de haute symétrie de cette zone qui fait partie du réseau réciproque. Nous présentons sur la figure 1.6 l'exemple d'un diagramme de bande calculé pour une matrice bidimensionnelle de trous d'air répartis suivant un réseau triangulaire.

Le diagramme de la figure 1.6 représente :

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

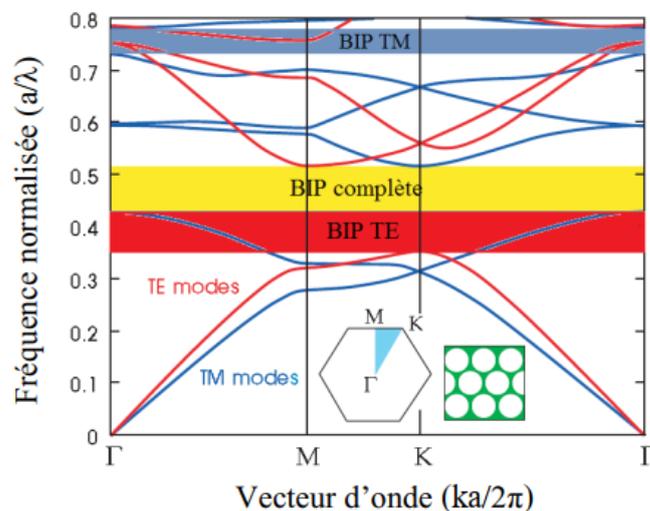


Figure 1.6 : Diagrammes de bandes d'une structure bidimensionnelle pour les polarisations TE (en rouge) et TM (en bleu).

L'un des principaux résultats de la figure 1.8 concerne la différence de comportement entre les polarisations TE et TM. Sur cette figure, 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 bas indice est connecté (des piliers dans l'air par exemple) est plus favorable à l'ouverture d'un gap TM [7,8]. Pour le réseau triangulaire, le recouvrement des deux bandes TE et TM donne naissance à une bande interdite complète.

I.9. Défauts dans les cristaux photoniques

La majorité des applications des cristaux photoniques tourne autour de la bande interdite photonique. Dans certains cas, afin de disposer d'une fréquence de propagation permise à l'intérieur d'une bande de fréquences interdites, il est nécessaire d'introduire des défauts dans la structure périodique. Ces défauts sont obtenus en modifiant localement la périodicité du cristal.

Parmi les défauts possibles dans les CPs, on peut faire la distinction entre les défauts ponctuels qui se comporte comme des micro-résonateurs [9-10], et les défauts linéaires permettant de réaliser un guidage diffractif des ondes [11-12].

I.9.1. Défaut ponctuel :

Dans les cristaux photoniques bidimensionnels, il existe de multiples manières de créer des défauts ponctuels. On peut procéder au retrait, à l'ajout ou à la modification d'un ou plusieurs motifs du cristal.

Pour reprendre la terminologie de la physique du solide, on réalise alors des défauts lacunaires ou de substitution (Figure I.7). Dans tous les cas de cette figure, on crée des cavités optiques dont les modes de résonances vont venir se positionner en énergie au sein des bandes interdites du cristal [13].

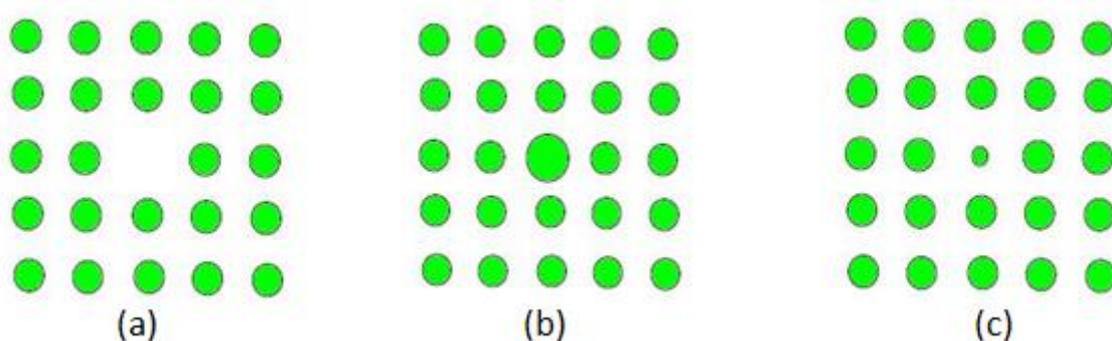


Figure 1.7 : Défauts ponctuels : (a) Défaut lacunaire, (b) et (c) Défauts de substitutions.

Nous distinguerons deux types de cavités : les cavités H_n correspondant à l'omission d'un hexagone de n trous de côté, et les cavités linéiques qui consistent en l'omission de plusieurs trous alignés [14]. Tous ces défauts donnent naissance à des états permis dans la BIP.

La figure (1.8) représente le diagramme de bandes obtenu en 2D pour un défaut constitué d'un seul trou manquant (aussi appelé H_1). On remarque l'apparition dans la BIP

d'une énergie permise correspondant à la longueur d'onde de résonance d'un mode dans cette microcavité.

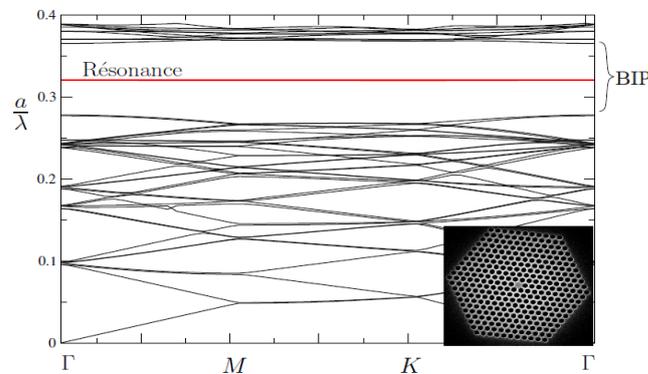


Figure 1.8 : Diagramme de bandes 2D d'une cavité H1 en polarisation TE [15].

I.9.2. Défaut linéaire :

En introduisant un défaut linéaire dans un cristal photonique, il est possible d'orienter la propagation de la lumière dans une direction choisie. Ce type de défauts peut être créé en supprimant ou en modifiant une ou plusieurs rangées de motifs (trous ou de tiges) du cristal photonique (Figure 1.9). Les défauts linéaires sont appelés aussi défauts étendus et peuvent servir de guides d'ondes. Au sein de ces défauts, des modes ayant une fréquence appartenant à la bande interdite photonique peuvent exister. Ces modes électromagnétiques associés aux guides d'onde sont des modes confinés et peuvent se propager le long de ce guide.

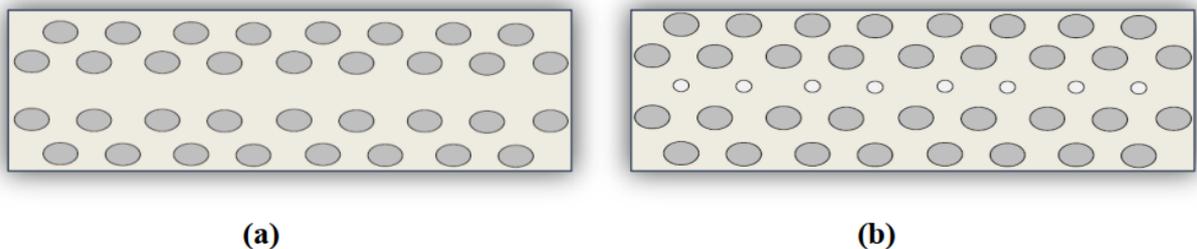


Figure 1.9: Exemples de défauts linéaires dans un cristal photonique 2D créés (a) en omettant une seule rangée de motifs, (b) en variant le rayon d'une seule rangée de motifs de la structure.

I.10. Application des cristaux photoniques

Dans cette partie, nous allons décrire les différentes applications possibles des matériaux à bandes photoniques interdites. Nous nous limiterons au cas des cristaux photoniques bidimensionnels qui sont ceux qui offrent, jusqu'à présent plusieurs applications.

I.10.1. Les fibres optiques

Les fibres à cristaux photoniques sont déjà rentrées dans le domaine des applications industrielles [16]. Elles ont été proposées pour la première fois dans les années 1995 [17]. Ces fibres sont obtenues par empilement de plusieurs tubes de silices pour obtenir une préforme. Ensuite cette préforme est chauffée à une très haute température de l'ordre de 1800°C puis étirée afin qu'elle obtienne un diamètre d'environ 125 μm , pour être similaire à une fibre classique. La fibre est ensuite protégée par une gaine plastique. Comme on le voit sur la figure I.9.

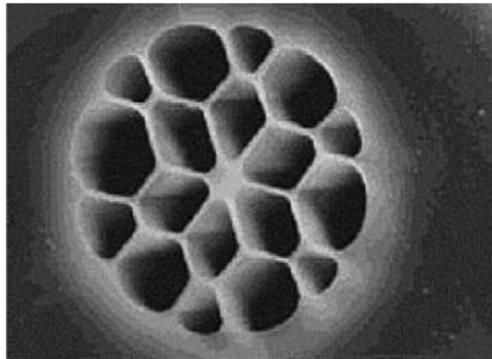


Figure 1.9 : Photographie d'une fibre à trous, de diamètre de cœur (au centre) de 1 μm [18].

I.10.2. Capteurs à cristaux photoniques

Les capteurs à CP ont contribué à améliorer grandement les capacités de détection, notamment d'un point de vue interaction lumière-matière, de la miniaturisation des interfaces ou encore de meilleures sensibilités et limites de détection qui ont pu être obtenues, pour des temps de détection très courts. Ces dispositifs hautement ordonnés peuvent être fabriqués en utilisant des techniques de fabrication microélectroniques, et peuvent être facilement intégrés aux systèmes micro-fluidiques. Dans la grande diversité des architectures proposées, les capteurs à CP basé sur le couplage guide-cavité ont montré un fort potentiel pour leur réalisation. Étant donnée la possibilité d'ajuster précisément les paramètres des cavités à CP (facteur de qualité et fréquence de résonance) le contrôle du confinement de la lumière au sein de la cavité elle-même sera désormais possible. La longueur d'onde de résonance du mode optique résultant est très sensible aux perturbations de l'indice de réfraction des trous d'air du cristal photonique. La faible variation du changement d'indice a pour conséquence une faible variation de la fréquence ou de la longueur d'onde du mode d'intérêt. L'idée consiste donc à

évaluer les performances de détection des cavités et à étudier la diversification des espèces à détecter tout en assurant une transmission maximale de l'information via le guide d'onde.

I.11. Techniques de modélisation

Les différentes méthodes utilisées pour décrire la propagation des ondes électromagnétiques dans les cristaux photoniques dérivent des méthodes standard utilisées en électromagnétique ou en physique de l'état solide. Les principales techniques utilisées sont la décomposition en ondes planes, la méthode des différences finies dans le domaine temporel.

I.11.1. Méthodes des ondes planes (PWE)

La technique de décomposition en ondes planes consiste à résoudre, dans l'espace fréquentiel, l'équation d'onde en développant le champ électromagnétique sur une base d'ondes planes. Cette méthode est très efficace pour calculer les diagrammes de bandes de cristaux infinis parfaitement périodiques. Elle permet de déterminer la fréquence, la polarisation, et la distribution du champ pour les modes d'une structure photonique.

En pratique, la structure est définie par une cellule et par un réseau périodique selon lequel cette cellule est reproduite pour couvrir entièrement l'espace. La cellule peut être uniquement le motif du cristal photonique pour un cristal sans défaut, mais peut aussi être de dimension plus grande (on parle alors de supercellule) dans le cas de structures non périodiques comme les guides d'onde ou les cavités.

I.11.2. Méthode FDTD (Finite Difference Time Domain)

La méthode FDTD (Finite Difference Time Domain) 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.

Elle ne nécessite aucune hypothèse de départ sur la forme possible des solutions ou des ondes se propageant dans la structure, ce qui la rend indépendante de la géométrie du système à modéliser.

Elle est basée sur la discrétisation temporelle et spatiale des équations de Maxwell en remplaçant les dérivées partielles par leur développement de Taylor à l'ordre 2, c'est-à-dire par des différences finies. Le principal inconvénient de la FDTD, qui tend cependant à s'estomper avec les évolutions des capacités informatiques, est qu'elle est très lente et demande des ressources informatiques importantes [19].

I.9. Conclusion

Un cristal photonique est un matériau artificiel qui présente une périodicité spatiale de la constante diélectrique, dans une, deux ou trois directions de l'espace. Ce nouveau type de matériau est capable de bloquer la propagation des ondes optiques dans certaines directions de propagation. Dans ce chapitre, nous avons rappelés les concepts fondamentaux et les notions de bases associées aux cristaux photoniques.

- [1] K. Sakoda, Optical properties of photonic crystals. Springer series in optical sciences vol. 80, Springer-Verlag, Berlin, 2001.
- [2] BENDJELLOUL Rahima, « 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.
- [3] K. Sakoda, Optical properties of photonic crystals. Springer series in optical sciences vol. 80, Springer-Verlag, Berlin, 2001.
- [4] C. Kittel, Quantum Theory of Solids. John Wiley and Sons Inc., New York, 1963.
- [5] ABRI née BADAoui Hadjira, « Etude et Conception des Micro - composants à Base des Cristaux Photonique Bidimensionnels », Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen, Décembre 2012.
- [6] E. Chow, S.Y. Lin, S.G. Johnson, P.R. Villeneuve, J.D. Joannopoulos, J.R. Wendt, G.A. Vawter, W. Zubrzycki, H. Hou, and A. Alleman. "Nature 407(6807), 983.-986, 2000".
- [7] J.D. Joannopoulos, R. D. Meade, J. N. Winn, Photonic Crystals- Molding the Flow of Light. Princeton University Press, Princeton, NJ, 2008.
- [8] J. M. Lourtioz, H. Benisty, V. Berger, J. M. Gérard, D. Maystre, et A. Tchelnokov, Les cristaux photoniques ou « la lumière en cage ». GET et Lavoisier, Paris, 2003.
- [9] A. M. Yacomotti, F. Raineri, C. Cojocar, P. Monnier, J. A. Levenson, et R. Raj, "Nonadiabatic dynamics of the electromagnetic field and charge carriers in high-Q photonic crystal resonators," Phys. Rev. Lett., Vol. 96, p. 093901, 2006
- [10] P. E. Barclay, K. Srinivasan, et O. Painter, "Nonlinear response of silicon photonic crystal microresonators excited via an integrated waveguide and fiber taper", Optics Express, Vol. 13, p. 801, 2005.
- [11] X. Letartre, C. Seassal, C. Grillet, P. Rojo-Romeo, P. Victorovitch, M. Le Vassor d'Yerville, D. Cassagne, et C. Jouanin, "Group velocity and propagation losses measurement in a single-line photonic crystal waveguide on InP membranes", Appl. Phys. Lett., Vol. 79, p. 2312-2314, 2001
- [12] C. Jamois, R. Wehrspohn, L. C. Andreani, C. Hermann, O. Hess, et U. G. Aosele, "Silicon-based two-dimensional photonic crystal waveguides," Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications, Vol. 1, p. 1-13, 2003.
- [13] Abri Badaoui Hadjira, « Etude et conception des microcomposants à base des cristaux photoniques bidimensionnels », Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, décembre 2012.
- [14] Ahlembenmerkhi, « Optimisation du confinement de la lumière dans des cavités à cristaux photoniques », Thèse de doctorat, Université Mentouri – Constantine, 20 /05 / 2012.
- [15] N. Louvion, « Microscopie en champ proche optique de structures à base de cristaux photoniques » Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, N° 2005-25, 2005.

[16] J. D. Joannopoulos, P. R. Villeneuve, S. Fan, “Photonic crystals: putting a new twist on light,” *Nature*, vol. 386, pp. 143–149, 1997.

[17] P. Sanchis, P. Bienstman, B. Luyssaert, R. Baets, J. Marti, “Analysis of Butt Coupling in Photonic Crystals,” *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 40, pp. 541–550, 2004.

[18] A. Sharkawy, S. Shi, D. W. Prather, R. A. Soref “Electro-optical switching using coupled photonic crystal waveguides,” *Optics Express*, vol. 10, pp. 1048–1059, 2002.

[19] H. Takano, B.S. Song, T. Asano, S. Noda, “Highly efficient multi-channel drop filter in atwo-dimensional hetero photonic crystal,” *Optics Express*, vol. 14, pp. 3491–3496, 2006.

II.1. Introduction

Les cristaux photoniques permettent actuellement de réaliser un grand nombre de fonctions optiques très adaptées aux réseaux actuels, telles que les guides d'onde, les diviseurs de puissances, les filtres, les coupleurs, les démultiplexeurs, ...etc. L'utilisation de ces structures ouvre une voie vers une miniaturisation des composants d'optique intégrée et une amélioration de leurs performances.

Dans ce chapitre, les démultiplexeurs basés sur les cristaux photoniques bidimensionnels sont décrits. Les notions de résonateurs en anneau à cristaux photoniques et de facteur de qualité sont également définies. Nous expliquons ensuite le mécanisme de couplage des résonateurs avec les guides d'onde. La dernière partie de ce chapitre est consacrée à la présentation de quelques configurations des démultiplexeurs à base de résonateurs en anneaux.

II.2. Démultiplexage à base de cristaux photonique :

Afin d'optimiser l'utilisation de la capacité effective des fibres optiques existantes, nous pouvons augmenter le nombre de longueurs d'onde à l'intérieur de chaque fibre. En utilisant les technologies de multiplexage en longueur d'onde (WDM) et de multiplexage en longueur d'onde dense (DWDM), une seule fibre optique suffit pour transmettre plusieurs signaux de longueurs d'onde différentes (ou canaux) en même temps. Cette technologie permet d'obtenir de très hauts débits de transmission d'information. On appelle multiplexeur le composant qui permet d'injecter sur la même ligne plusieurs signaux de différentes longueurs d'onde. Le démultiplexage est l'opération inverse du multiplexage, elle permet d'extraire plusieurs longueurs d'ondes bien précises et bien distinctes d'un flux de données, et le dispositif qui permet de réaliser cette opération est le démultiplexeur.

Considérons un signal optique comprenant les longueurs d'onde $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_i$. Il est possible de diviser celui-ci en une série de « n » signaux de sortie (avec $n = 1, 2, \dots, i$) de telle sorte que la sortie (n) permettra d'extraire la longueur d'onde λ_n . La figure (II.1) illustre ce principe avec un exemple de démultiplexeur à 8 canaux de sortie.

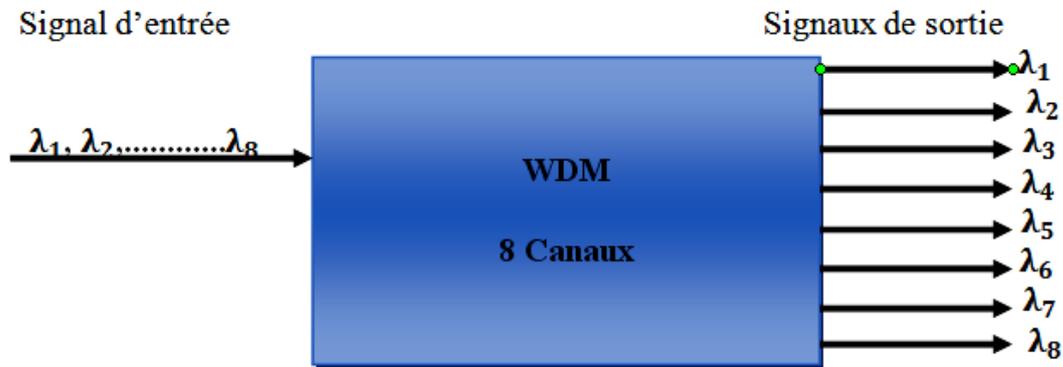


Figure II.1 : Démultiplexeur à 8 canaux.

Le démultiplexeur classique peut être réalisé par le biais de filtres sélectifs en longueur d'onde, de réseaux de diffractions, de coupleurs guide à guide [20] ... Cependant, ces dispositifs demeurent d'une taille relativement importante : plusieurs millimètres ou centimètres. Notre approche est de chercher à réduire la taille de ces composants en les remplaçant par des dispositifs à cristaux photoniques.

Différentes techniques ont déjà été présentées dans la littérature afin de séparer plusieurs longueurs d'onde grâce aux cristaux photoniques. Les guides d'onde en cascade [21] et les cavités résonantes [22], sont les dispositifs les plus couramment utilisés pour concevoir des démultiplexeurs optiques à base de CPs. Tous les travaux mentionnés ci-dessus présentent certains inconvénients et limitations : tels qu'un grand espacement entre les canaux, une faible efficacité de transmission, et une faible sélectivité spectrale. La diminution de l'espacement entre les canaux dans les démultiplexeurs dont les canaux sont très proches les uns des autres est très cruciale dans les applications DWDM. De ce fait, beaucoup de chercheurs se sont intéressés à la réduction de l'espacement entre les canaux dans la conception des démultiplexeurs à cristaux photoniques [23, 24].

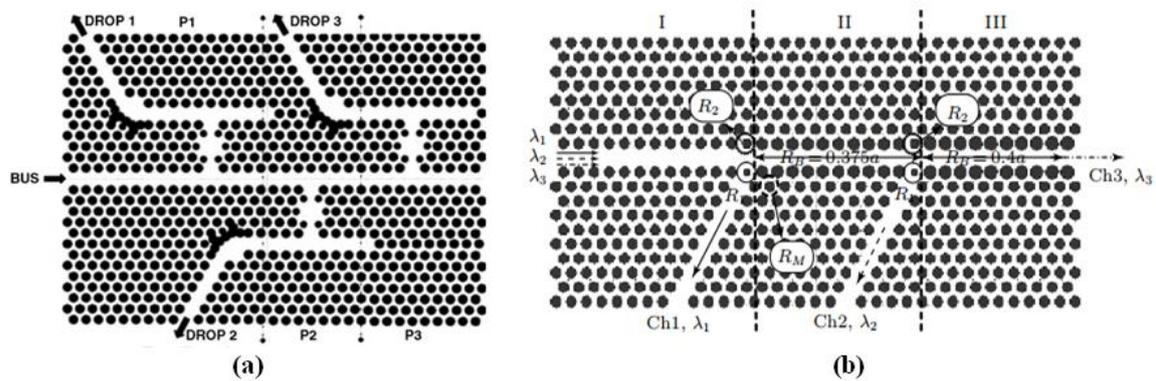


Figure II.2 : démultiplexeur à base de guides d'onde en cascade (a), démultiplexeur à base de cavités résonantes (b)

Dans notre travail nous allons uniquement nous concentrer sur la conception d'un démultiplexeur à base de résonateurs en anneaux à cristaux photonique (photonic crystal ring resonator, PCRR).

II.3. Résonateur en anneau à cristaux photoniques :

Les résonateurs en anneau représentent un autre groupe de résonateurs à cristaux photoniques. Ils sont obtenus par la suppression de quelques motifs du cristal photonique suivant une forme annulaire [25]. La figure II.3 montre quelques exemples de PCRR: un anneau quasi-carré dans un réseau carré, un anneau hexagonal dans un réseau triangulaire, et un anneau circulaire dans un quasi-cristal photonique.

Contrairement aux résonateurs en anneaux conventionnels, à l'intérieur desquels la lumière est confinée par réflexion totale interne, les résonateurs en anneau à cristaux photoniques offrent une sélectivité spectrale élevée et peuvent répondre aux exigences micrométriques actuelles, puisque le confinement de la lumière est assuré par bande interdite photonique.

Jusqu'à présent, diverses applications à base de PCRRs, telles que des diviseurs de puissance [27], des capteurs [28], et des démultiplexeurs [29] ont été rapportées.

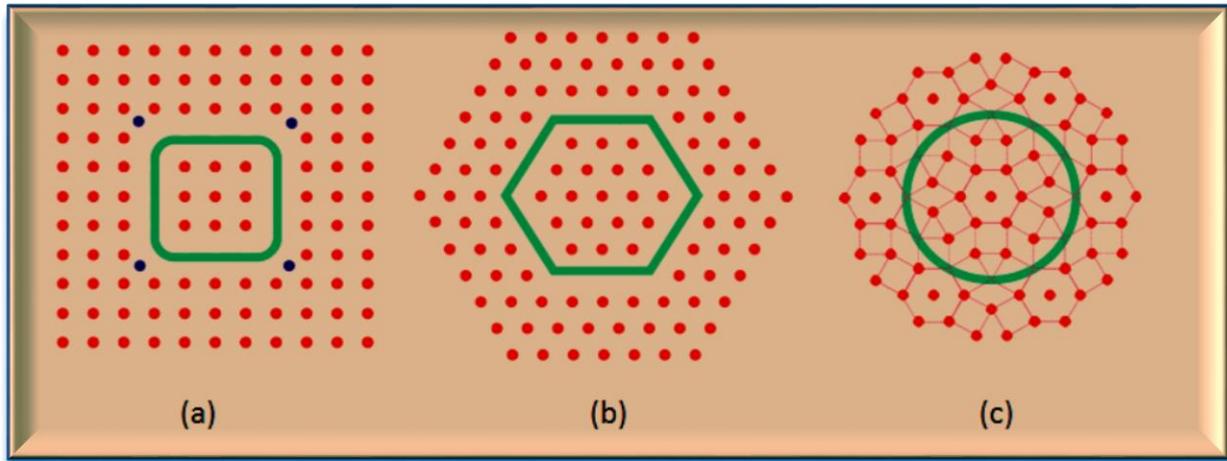


Figure II.3 : Résonateurs en anneaux à cristaux photoniques : (a) un anneau quasi-carré dans un réseau carré, (b) un anneau hexagonal dans un réseau triangulaire, et (c) un anneau circulaire dans un quasi-cristal photonique [26].

II.3.1. Caractéristiques des résonateurs en anneaux

Dans cette partie, nous allons définir deux caractéristiques importantes des résonateurs : la finesse F et le facteur de qualité Q .

II.3.1.1. Facteur de qualité

Le facteur de qualité (Q) est une grandeur utilisée pour exprimer le confinement temporel de l'énergie dans un résonateur. Il est proportionnel à la durée de vie d'un photon à l'intérieur du résonateur et peut être défini en fonction de celle-ci par la relation[30] :

$$Q = \omega_r \tau \quad (II. 1)$$

Avec ω_r :la pulsation.

Une autre manière de quantifier le facteur de qualité en terme spectral est de faire le rapport entre la longueur d'onde centrale λ_r de résonance et de sa largeur à mi-hauteur $\Delta\lambda$ (full widthathalf maximum, FWHM). Cette formulation du facteur de qualité en longueurs d'onde est possible grâce à la forme lorentzienne de la résonance tel que représenté sur la figure 2.6. Il s'exprime comme [30] :

$$Q = \frac{\lambda_r}{\Delta\lambda} \quad (II. 2)$$

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.

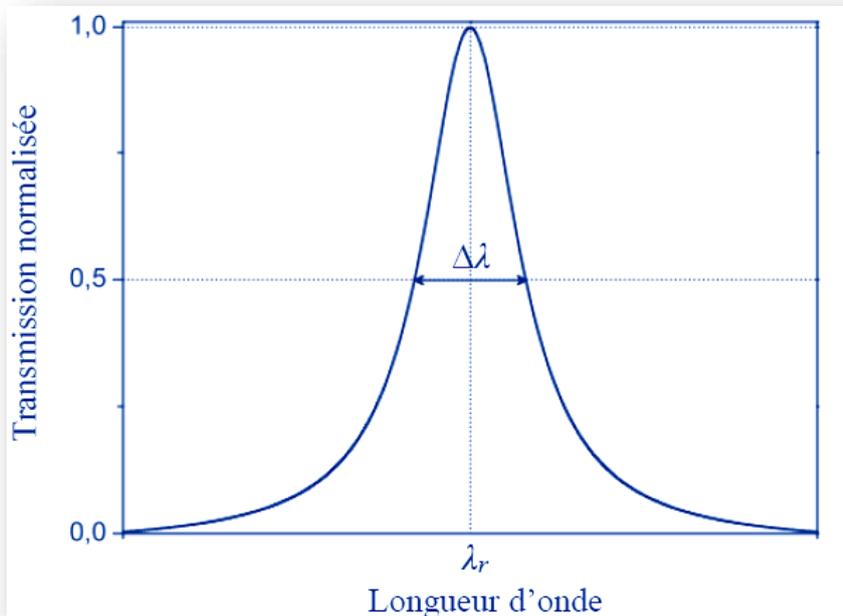


Figure II.4 : Réponse spectrale d'un résonateur en anneau

II.3.1.2. Finesse

En plus du facteur de qualité, une autre mesure communément utilisée est la finesse (F) du résonateur. 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 [30] :

$$F = \frac{ISL}{\Delta\lambda} \quad (II.3)$$

La finesse est d'autant plus grande que les pics sont étroits. Elle se rapporte au nombre de passages du champ dans le résonateur. 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 les capteurs et les démultiplexeurs.

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, 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 [31]. Comme seules quelques longueurs d'onde résonnent à l'intérieur de l'anneau, la structure fonctionne en quelque sorte comme un filtre sélectif en longueur d'onde.

Pour un couplage optimal, la distance entre l'anneau et le guide d'onde doit être très petite pour faciliter le passage. Si cette distance est grande, la lumière passe directement à travers le guide d'onde sans passer dans l'anneau. Pareillement, le choix du rayon de l'anneau est très important car celui-ci doit être grand, pour qu'il y ait plus d'interaction avec le guide, en d'autres termes la courbure de l'anneau à laquelle la lumière va être couplée doit être grande.

II.5. Démultiplexeur à base de PCRR :

On trouvera, dans la littérature, la description de plusieurs types de démultiplexeur à base de résonateurs en anneaux à cristaux photoniques. Le principe consiste en général à extraire une longueur d'onde spécifique d'un train d'ondes circulant dans un guide d'onde, et à la transférer vers un autre guide via un résonateur en anneau à cristal photonique. Le schéma de principe d'un démultiplexeur à base de résonateur en anneau est représenté sur la figure II.5

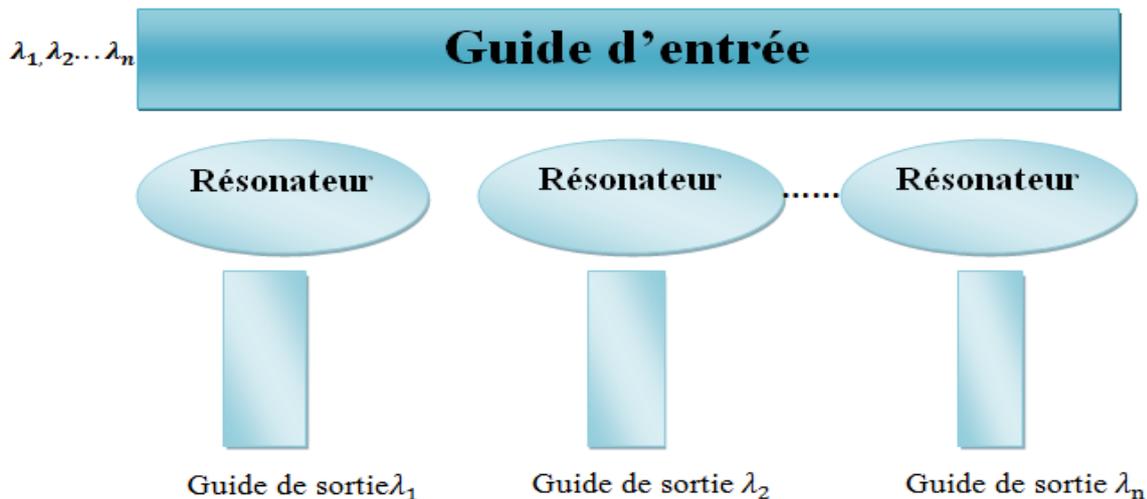


Figure II.5 : Représentation schématique d'un démultiplexeur à base de PCRRs.

La performance du démultiplexeur est évaluée quantitativement en mesurant sa diaphonie (ou Crosstalk, CT), qui est définie comme le rapport de la puissance au port de sortie indésirable pour une longueur d'onde spécifique à la puissance à un port souhaité [32] :

$$CT = 10 \log \frac{\text{Transmission pour une longueur d'onde spécifique au port de sortie non souhaité}}{\text{Transmission pour une longueur d'onde spécifique au port de sortie souhaité}} \quad (\text{II.4})$$

Selon cette définition, une faible diaphonie signifie une meilleure performance.

II.6. Quelques topologies :

Le filtre à extraction (CDF) à base de PCRR est un autre dispositif commun pour la conception des démultiplexeurs optiques. Récemment, différentes structures ont été proposées pour réaliser des démultiplexeurs optiques en utilisant des résonateurs en anneaux à cristaux photoniques [23, 33, 34, 35, 36]. Les figures II.4.a et II.4.b extraites des références [35,36] représentent les structures schématiques de deux configurations différentes de démultiplexeurs conçus à partir de filtres à extraction à base du même type de PCRR (quasi-carré). Dans la figure II.4.a, les CDFs sont en cascade et les longueurs d'ondes désirées à la sortie de chaque canal (B, C, D) sont obtenues en modifiant l'indice de réfraction des tiges intérieures de chaque résonateur.

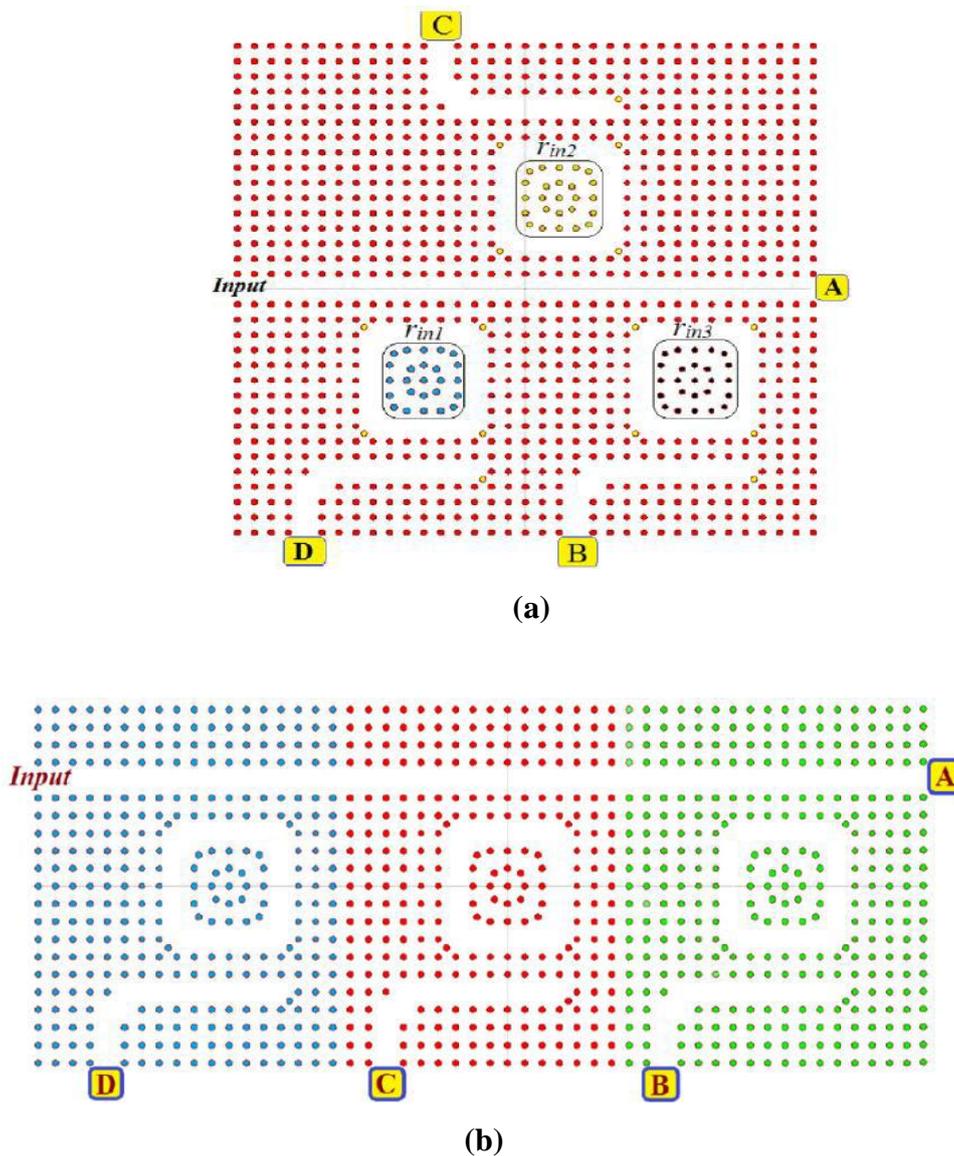


Figure II.6 : Représentation schématique (a) d'un démultiplexeur constitué de trois CDFs en cascade et (b) d'un démultiplexeur hétéro-structure [35, 36].

Les auteurs de la référence [37] eux aussi ont proposé un démultiplexeur à partir d'un CDF à trois ports (figure II.7). La structure de base du filtre utilisé est constituée d'un PCRR de forme carrée. Dans leur dispositif, la sélection des longueurs d'onde pour chaque canal se fait en modifiant les rayons des tiges intérieures de chaque résonateur. Leurs calculs théoriques donnent une transmission moyenne de 78% du signal. Les valeurs minimale et maximale de la diaphonie entre les canaux de sortie dans cette structure sont d'environ -12 et -24 dB, respectivement.

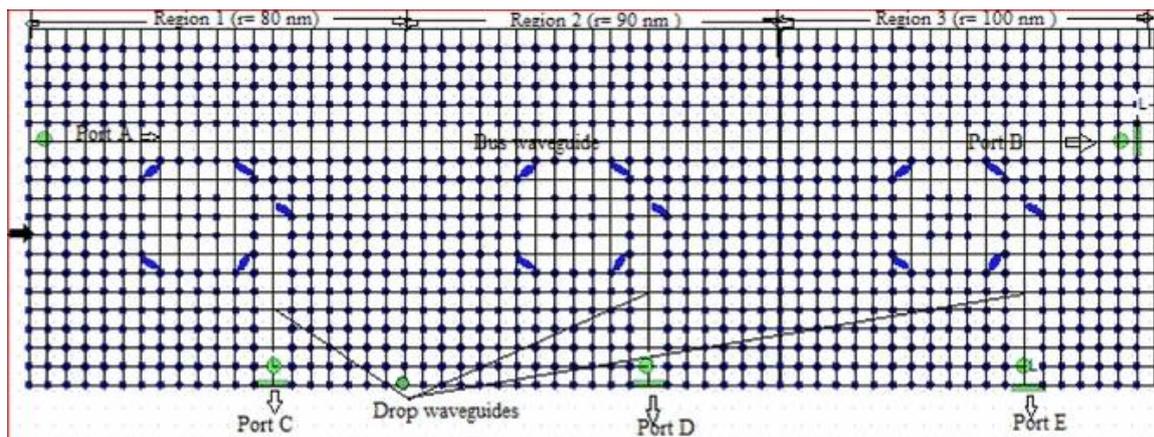


Figure II.7 : Structure schématique du démultiplexeur proposé par [37].

II.7. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation d'un composant particulier très répandue dans les systèmes de télécommunications optiques : le démultiplexeur en longueur d'onde à base de résonateurs en anneaux à cristaux photoniques. De manière à introduire le sujet, nous avons expliqué le mécanisme de démultiplexage en longueur d'onde et présenté les caractéristiques des résonateurs en anneaux. Enfin, différents exemples portant sur la conception de ces démultiplexeurs à base de différents PCRRs ont été présentés en soulignant des travaux de recherche antérieurs.

Références

- [20] Laura Ghisa. Couplage de micros résonateurs. Applications aux fonctions optiques de traitement du signal. Physique (Physics). Université Rennes 1, 2008. Français <tel-00383746>.
- [21] A.E. Akosman, M. Mutlu, H. Kurt, E. Ozbay, “Dual-frequency division de-multiplexer based on cascaded photonic crystal waveguides,” *Physica B : Condensed Matter*, vol. 407, pp. 4043–4047, 2012.
- [22] G. Manzacca, D. Paciotti, A. Marchese, M. Svaluto Moreolo, G. Cincotti, “2D photonic crystal cavity-based WDM multiplexer, ” *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications*, vol. 5, pp. 164–170, 2007.
- [23] 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.
- [24] M.R. Almasian, K. Abedi, “A proposal for optical WDM using embedded photonic crystal ring Resonator with distributed coupling,” *Physica E*, vol. 79, pp. 173–179, 2016.
- [25] C.Y Chao, W. Fung, L.J. Guo, “Polymer Microring Resonators for Biochemical Sensing Applications,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 12, pp. 134–142, 2006.
- [26] Z. Qiang, W. Zhou, R.A. Soref. “Optical add-drop filters based on photonic crystal ring resonators,” *Optics Express*, vol. 15, pp. 1823–1831, 2007.
- [27] L. Wu, M. Wang, “1x2 type photonic crystal power splitter with ring resonators,” *Optik*, vol. 126, pp. 3613–3615, 2015.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] L. Ghisa, “Couplage de micro résonateurs. Applications aux fonctions optiques de traitement du signal”. Thèse de Doctorat, Université de Rennes I, Rennes, 2008.
- [31] Y.F. Xiao, B. Min, X. Jiang, C.H. Dong, L. Yang, “Coupling whispering-gallery-mode micro cavities with modal coupling mechanism,” *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 44, pp. 1065–1070, 2008.
- [32] S. Rawal, R.K. Sinha, “Design, analysis and optimization of silicon-on-insulator photonic crystal dual band wavelength demultiplexer,” *Optics Communications*, vol. 282, pp. 3889–3894, 2009.

- [33] M. Djavid, F. Monifi, A. Ghaffari, M.S. Abrishamian, "Heterostructure wavelength division demultiplexers using photonic crystal ring resonators," *Optics communication*, vol. 281, pp. 4028–4032, 2008.
- [34] H. Alipour-Banaei, F. Mehdizadeh, S. Serajmohammadi "Optical wavelength demultiplexer based on photonic crystal ring resonators," *Photonic Network Communications*, vol. 29, pp. 146–150, 2015.
- [35] M.R. Rakhshani, M.A. Mansouri-Birjandi, "Design and simulation of wavelength demultiplexer based on heterostructure photonic crystals ring resonators," *Physica E*, vol. 50, pp. 97–101, 2013.
- [36] M.A. Mansouri-Birjandi, M.R. Rakhshani, "A new design of tunable four-port wavelength demultiplexer by photonic crystal ring resonators," *Optik*, vol. 124, pp. 5923–5926, 2013.
- [37] T. Asano, W. Kunishi, M. Nakamura, B.S. Song, S. Nada "Dynamic Wavelength Tuning of Channel drop Device in Two-dimensional Photonic Crystal Slab," *Electronics Letters*, vol. 41, pp. 37-38, 2005.

III. 1. Introduction

Dans ce chapitre, nous proposons la conception d'un démultiplexeur à base de résonateurs en anneaux à cristaux photoniques bidimensionnels, en utilisant la méthode 2D-FDTD. Notre travail est une étude complémentaire à l'étude faite par les auteurs de la référence [1].

Nous allons d'abord nous intéresser à la conception d'un filtre à CP qui représente l'élément fondamental du démultiplexeur. En se basant sur les résultats obtenus, nous allons démontrer la possibilité de concevoir un démultiplexeur en longueurs d'onde à quatre canaux.

III. 2. Présentation du logiciel

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.

III.2.1. Le simulateur FullWAVE

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

La FDTD est une méthode de résolution directe des équations de Maxwell dans le domaine temporel, elle utilise l'outil numérique des différences finies. On peut obtenir les réponses en champs TE et TM simultanément, On peut ainsi obtenir les cartographies du champ EM à n'importe quel endroit et n'importe quel moment. La connaissance de l'évolution du champ en fonction du temps permet également d'obtenir des informations sur la réponse spectrale de la structure. La figure III.1 représente la fenêtre principale des paramètres de simulation FullWAVE.

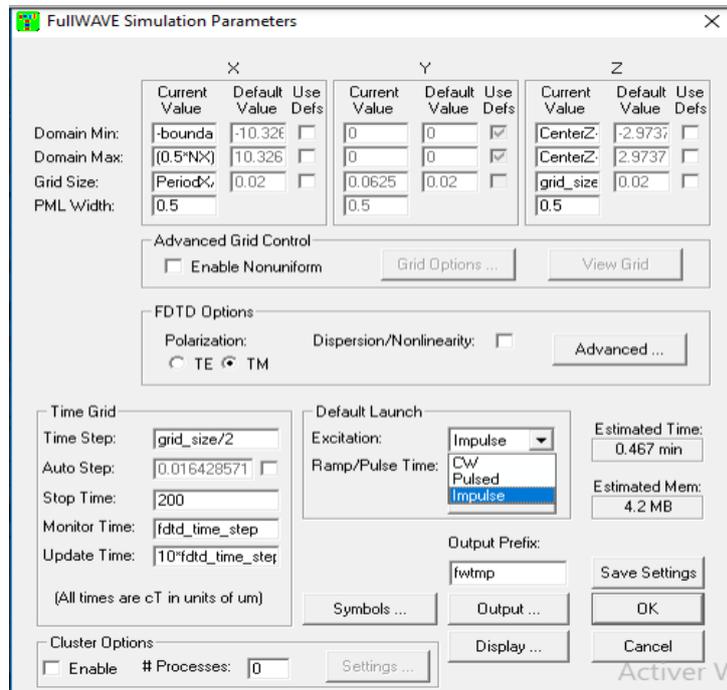


Figure. III.1: Fenêtre principale des paramètres de simulation de FullWAVE.

III.2.2 Le simulateur BandSOLVE

BandSOLVE est un module de simulation pour la génération et l'analyse des structures à bandes interdites photoniques. Ce module de simulation utilise la méthode des ondes planes pour calculer les bandes interdites de structures périodiques. BandSOLVE est idéal pour la réalisation des structures de bande pour les structures à bande interdite photonique telles que des cavités 2D et 3D. La figure III.2 représente la fenêtre principale des paramètres de simulation BandSOLVE.

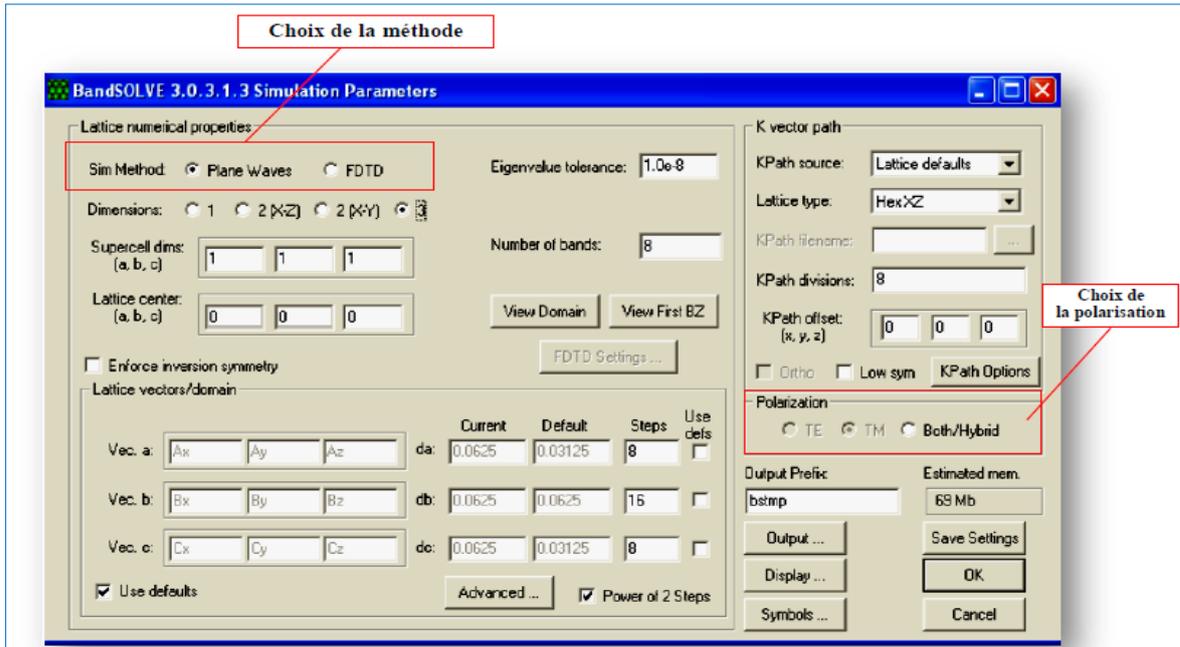


Figure.III.2: Fenêtre principale des paramètres de simulation de BandSOLVE.

III.3. Structure sans défauts :

Dans notre étude nous optons pour un cristal photonique bidimensionnel formé par des piliers de section circulaire réparties selon un réseau triangulaire de période $a=0.61\mu\text{m}$ (a est la distance entre le centre de deux motifs adjacents), plongées dans l'air d'indice de réfraction $n_{\text{air}}=1$. Le rayon des tiges est de $r=0.106\mu\text{m}$ et leur indice de réfraction est $n=4.1$.

Le nombre de tiges qui compose notre structure de base est de 27 tiges suivant l'axe x et de 21 suivant l'axe z . Le schéma de la structure est reporté sur la figure III.3.

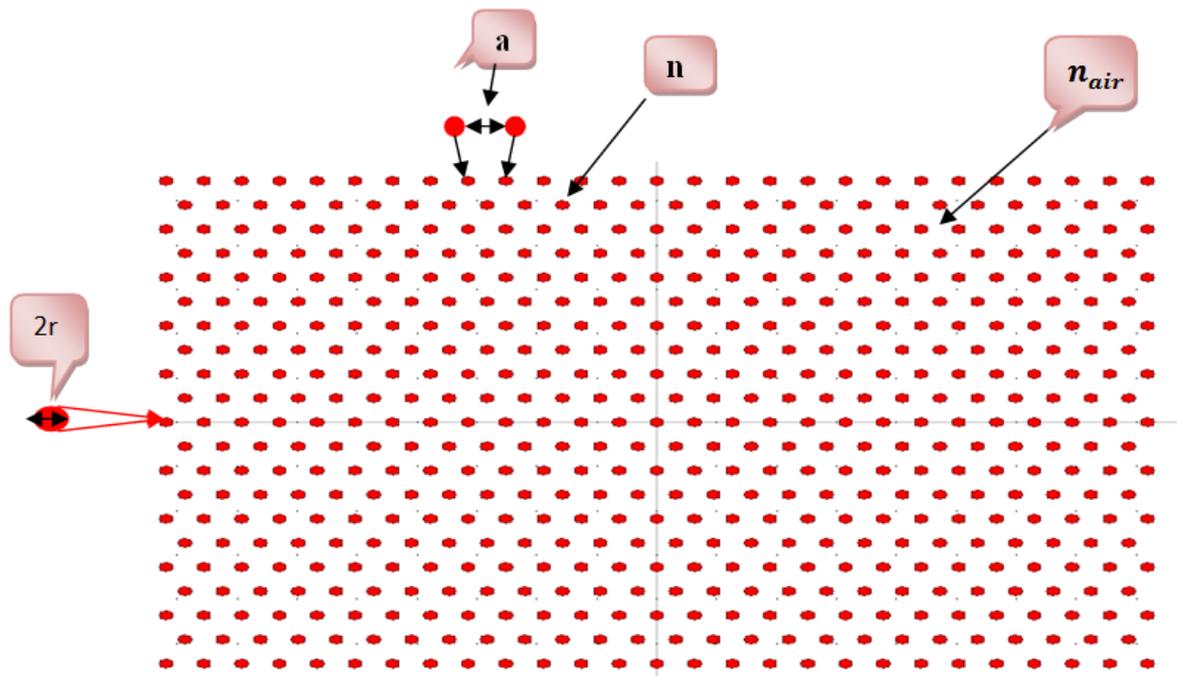


Figure III.3 : Structure d'étude.

Un cristal photonique est généralement caractérisé par son diagramme de bandes. Sur la figure III.4, nous avons présenté le diagramme de bandes de la structure étudiée, calculé avec le logiciel de simulation Bandsolve de RSoft, basé sur la méthode des ondes planes (PWE). En fonction de ce calcul, nous pouvons déterminer les bandes interdites photoniques (BIPs) du cristal considéré. Sur la figure III.4, une bande interdite photonique est observée pour la polarisation TM qui s'ouvre pour des fréquences normalisées entre $0.256 < a/\lambda < 0.45$ correspondant aux longueurs d'ondes $1.355 \mu\text{m} < \lambda < 2.382 \mu\text{m}$. Une onde électromagnétique incidente dans le plan perpendiculaire au réseau des tiges sera donc réfléchie si sa fréquence est comprise dans l'intervalle spectral précédent.

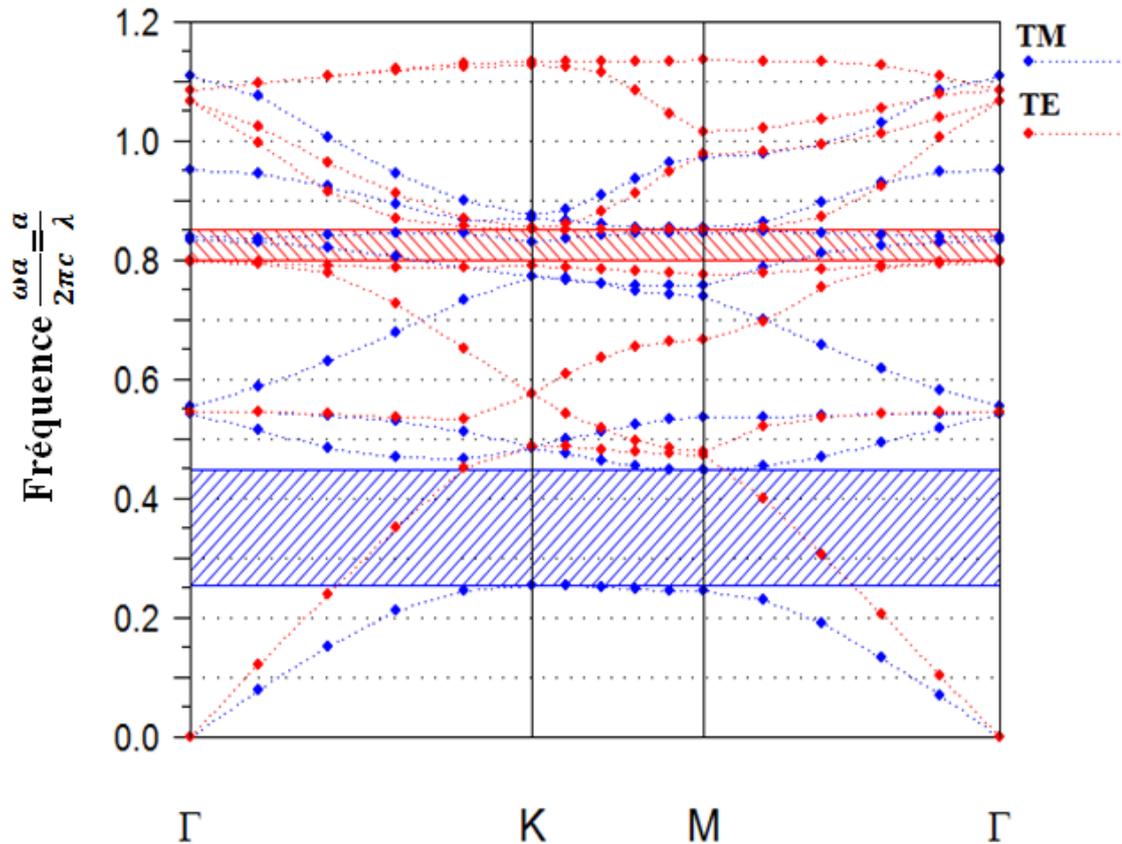


Figure III.4 : Diagramme de bandes de la structure d'étude.

III.4. Structure avec défauts :

III.4.1. Filtre à base de résonateur en anneau à cristal photonique :

Dans ce travail, nous allons étudier un démultiplexeur en longueur d'onde à bases de résonateurs en anneaux à cristaux photoniques. Mais avant d'entamer cette étude, nous allons d'abord nous intéresser à l'élément fondamental qui constitue le démultiplexeur : le filtre. La figure III.5 représente la structure schématique de ce filtre. Il contient deux guides d'onde, entre lesquels est disposé un résonateur en anneau en forme d'hexagone. Les deux guides d'onde sont créés par la suppression de quelques tiges de la structure sans défauts. La forme hexagonale du PCRR est créée en omettant 18 tiges du CP. Les tiges situées à l'intérieur du PCRR sont appelées tiges intérieures, leur rayon est égal à $R=0.18 \mu\text{m}$. Tandis que les tiges de couplage sont celles placées entre le PCRR et les guides d'ondes.

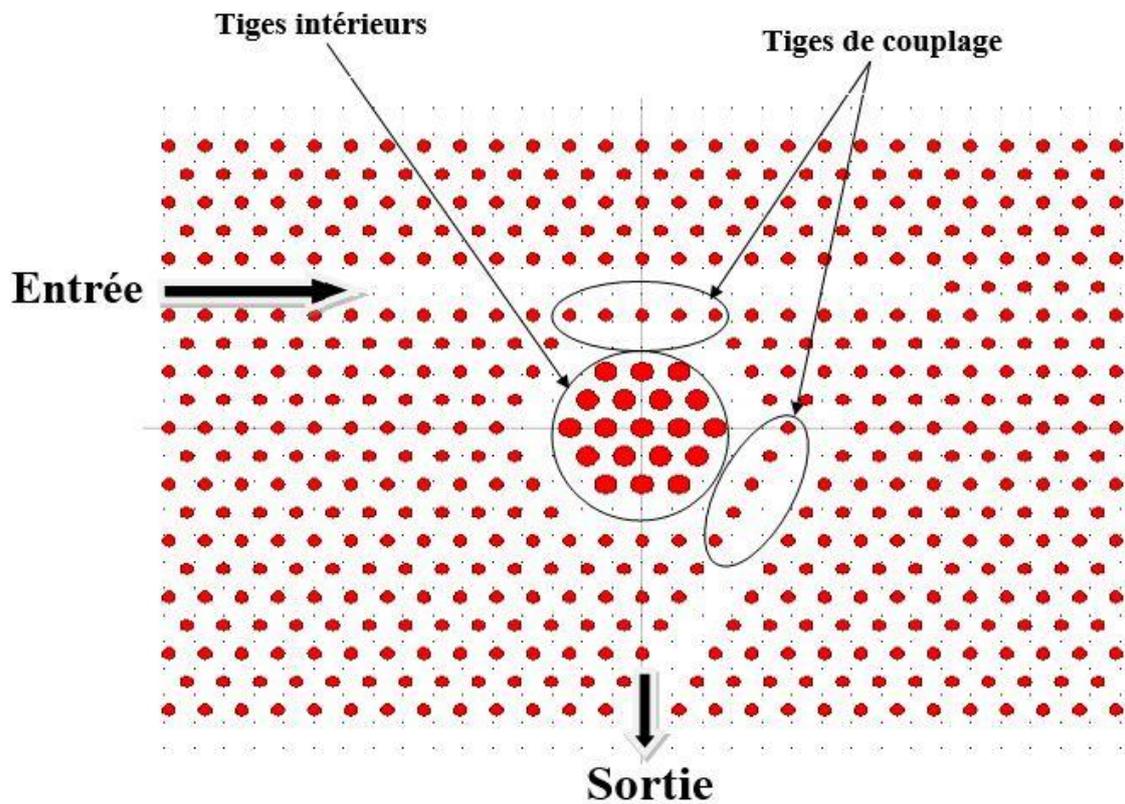


Figure III.5 : Représentation schématique de l'élément fondamental constituant le démultiplexeur.

La transmission et le facteur de qualité sont les caractéristiques les plus importantes du filtre. Pour obtenir ces caractéristiques, nous devons calculer le spectre de transmission de cette structure. Pour ce faire, nous utilisons le logiciel Fullwave de Rsoft, basé sur la méthode des différences finies temporelles (FDTD).

Sur la figure (III.6) est représenté le spectre de transmission du filtre. Sur cette figure, nous observons un pic résonant à la longueur d'onde $\lambda = 1.5781 \mu\text{m}$. Il est caractérisé par un faible taux de transmission de seulement de 96 % et un facteur de qualité $Q_{\text{égl}}$ à 856.07. Ce résultat pourrait être attribué aux pertes par courbure des coins du résonateur et aux pertes de couplage qui limitent le transfert du signal entre le résonateur et les guides d'onde.

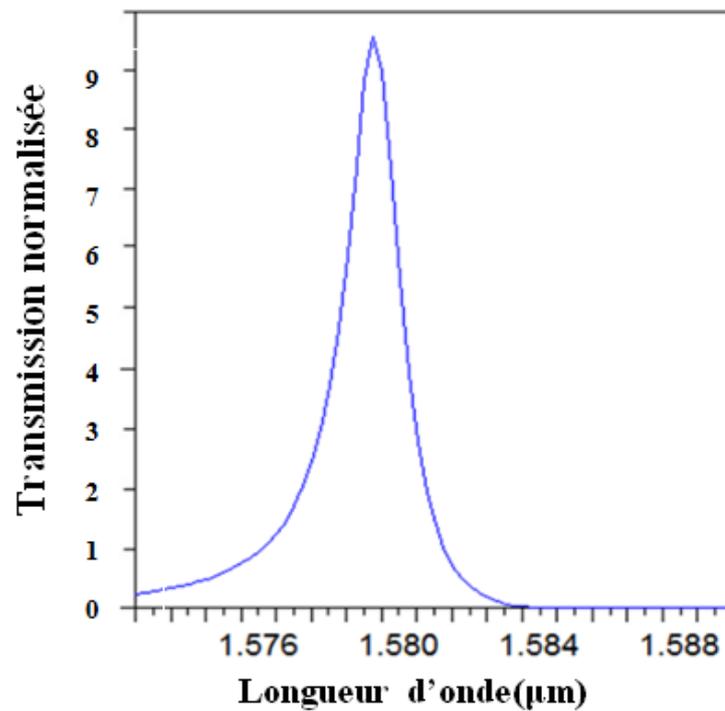


Figure III.6 : Spectre de transmission du filtre

III.4.2. Optimisation du filtre

Afin d'améliorer la transmission du filtre, nous avons modifié la géométrie des zones de couplage (zone située entre le résonateur et les guides d'onde). Pour ce faire, nous avons augmenté le rayon de deux tiges dans chaque zone. Dans toute la suite, ces tiges seront appelées les tiges 's' et leurs rayons ' r_s ', comme le montre la figure III.7.

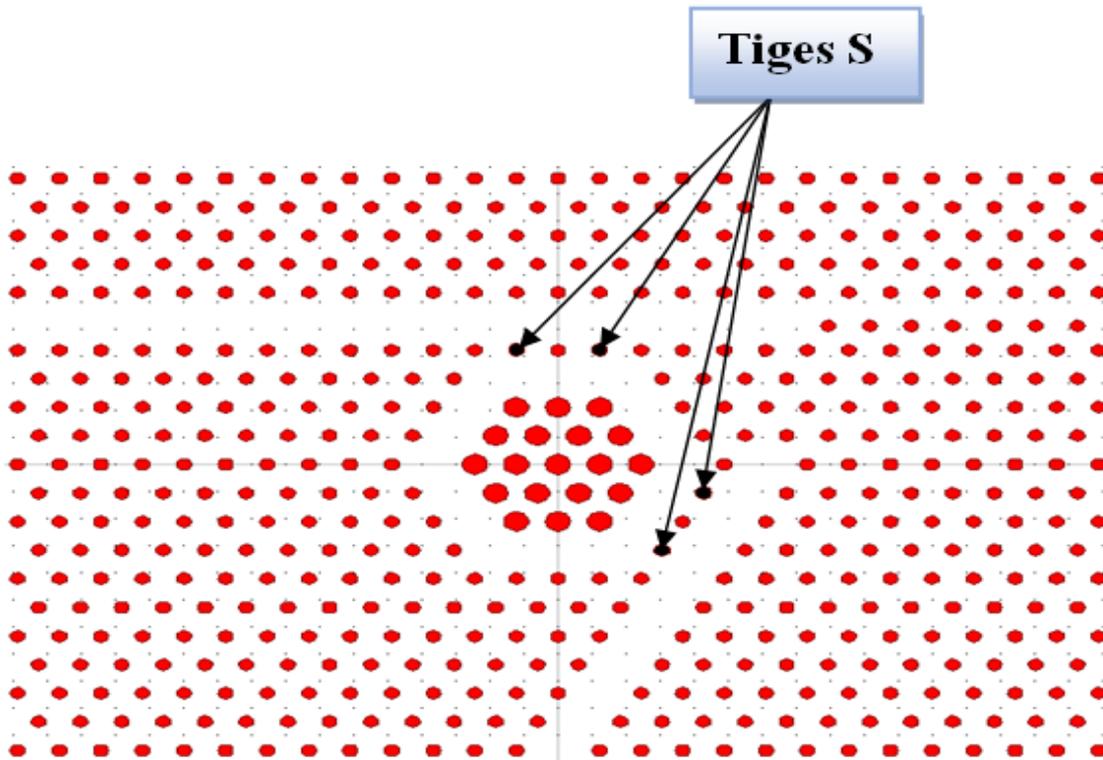


Figure III.7 :schéma optimale de filtre

La figure III.8 présente le résultat d'une simulation évaluant le taux de transmission pour différentes valeurs du rayon ' r_s '. Cette figure montre que la transmission la plus élevée (98.69 %) est enregistrée pour $r_s = 0.115 \mu\text{m}$. Le facteur Q maximum que nous avons calculé $Q = 1087.4$ apparaît à $r_s = 0.118 \mu\text{m}$ avec une transmission de 96.31 %. Donc, on pourrait choisir l'efficacité d'extraction de 98.69 %) et le facteur Q de 998.4 du mode résonant situé à $\lambda = 1.58277 \mu\text{m}$ obtenu pour le rayon $r_s = 0.115 \mu\text{m}$ comme résultat optimal en raison de son facteur Q et sa transmission relativement élevés. En effet, il existe un compromis entre l'augmentation du facteur de qualité du CDF et la diminution de son efficacité d'extraction.

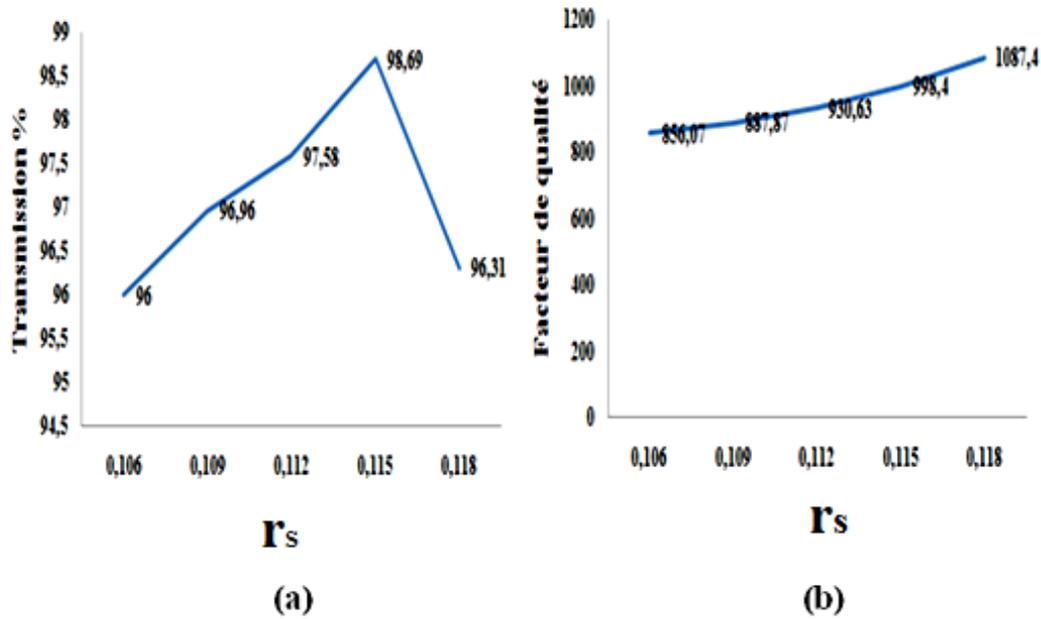


Figure III.8 : (a) Transmission et (b) facteur de qualité du CDF en fonction du rayon (r_s) des quatre tiges (s).

Lespectre de transmission de la structure optimisée du filtre, issue de l'augmentation des quatre tiges 's'avec $r_s = 0.115\mu\text{m}$, calculé à partir des simulations 2D-FDTD est illustrésur la figure III.9. Le résultatde la 2D-FDTD montre qu'il est possible de transférer 98.69 % du signal, situé à $\lambda = 1.58277\mu\text{m}$, du guide d'onde d'entrée vers le guide d'onde de sortie via le résonateur.On note donc une amélioration dans la transmission, par rapport au cas du filtre sans la modification des rayons des quatre tiges dans la zone de couplage. On note également une amélioration dans la valeur du facteur de qualité, elle est de 998.40, alors que sa valeur calculéepourla structure non optimisée était seulement de856.07.Par conséquent, l'amélioration de la transmission et du facteurde qualité est due à la diminution des pertesde couplage et des pertes par courbures.

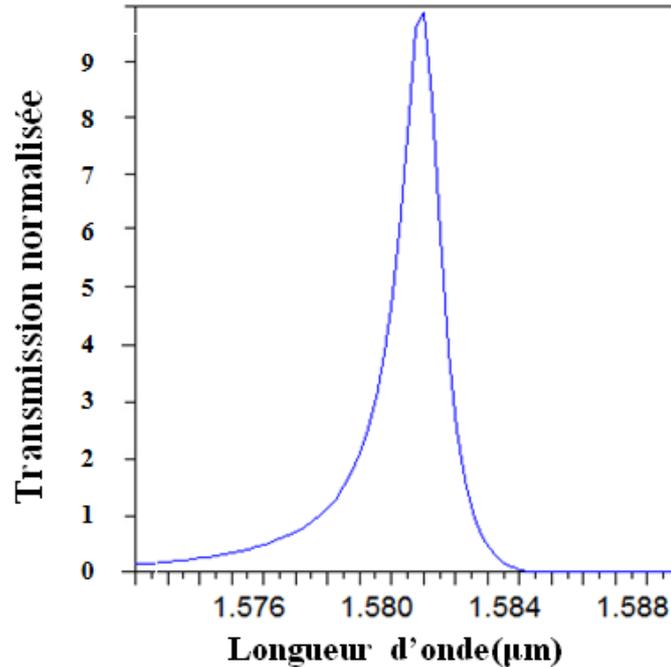


Figure 4.9: spectre de transmission de la structure optimisée du filtre

III.5. Démultiplexeur à bases de résonateurs en anneaux à cristaux photoniques :

Dans cette partie, nous proposons de concevoir un démultiplexeur à quatre canaux à base de résonateurs en anneaux à cristaux photoniques. La sélection des différentes longueurs d'onde à la sortie de chaque canal du démultiplexeur, est obtenue par la modification des rayons 'R' des tiges intérieures du filtre. Le tableau III.1 ci-dessous représente la variation de la longueur d'onde du filtre en fonction de la variation du rayon 'R'.

Rayon des tiges intérieures (μm)	0.180	0.182	0.184	0.186
Longueur d'onde de sortie (μm)	1.58277	1.58528	1.58729	1.58906

Tableau III.1 : influence du rayon 'R' sur la longueur d'onde de sortie du filtre.

En se basant sur les résultats obtenus dans le tableau III.1, nous proposons de concevoir le démultiplexeur qui est schématisé sur la figure III.10. Il est constitué d'un guide d'entrée et de quatre filtres. La distance entre chaque filtre est de trois motifs ($D=3$). Celle-ci doit être choisie judicieusement afin d'éviter toutes interférences entre les canaux.

Les longueurs d'ondes désirées à la sortie des quatre canaux 1, 2, 3 et 4 sont obtenues en modifiant le rayon des tiges intérieures de chaque résonateur tels que $R_1= 0.18 \mu\text{m}$, $R_2= 0.182\mu\text{m}$, $R_3= 0.184\mu\text{m}$ et $R_4= 0.186\mu\text{m}$, respectivement.

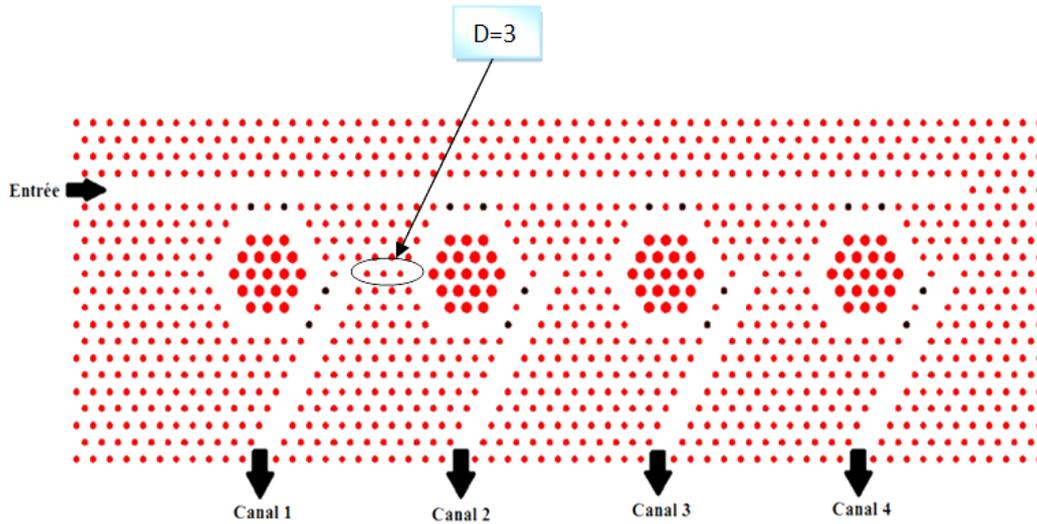


Figure III.10 : Représentation schématique du démultiplexeur

Afin de simuler la structure proposée, nous avons utilisé le logiciel FullWave basé sur la méthode 2D-FDTD. Les résultats obtenus sont représentés sur la figure III.11. Sur cette figure nous observons l'existence de quatre pics résonants à $\lambda_1= 0.15827 \mu\text{m}$, $\lambda_2=0.158528 \mu\text{m}$, $\lambda_3=0.15872 \mu\text{m}$, $\lambda_4=0.1589 \mu\text{m}$ obtenus à la sortie des canaux 1, 2, 3 et 4, respectivement. Ces pics sont caractérisés par les taux de transmission suivant : 97.25 %, 94.6 %, 89.45 %, 91.2 %, respectivement.

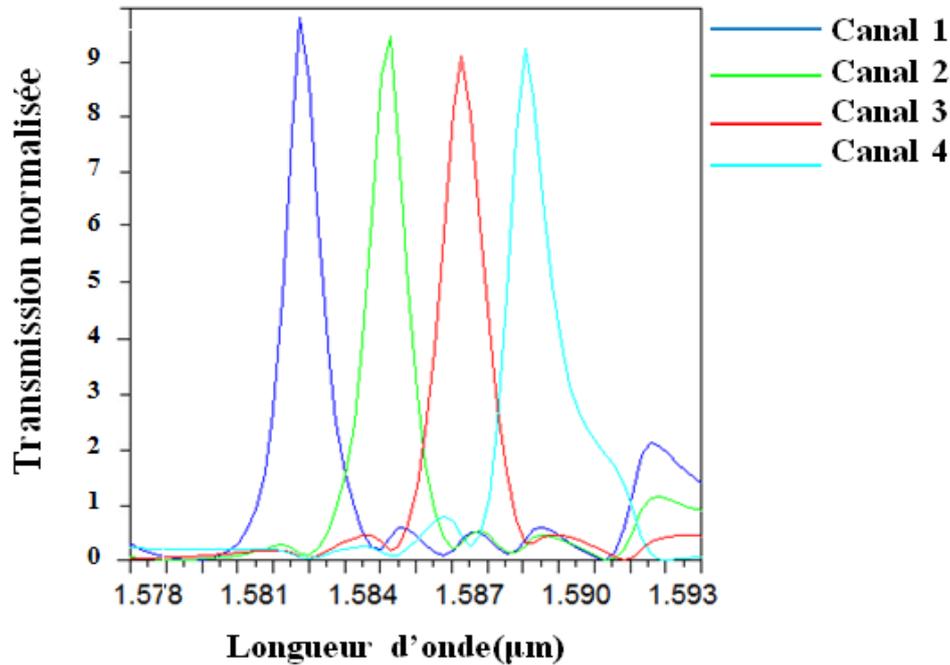


Figure III.11 : Spectre de transmission du démultiplexeur

A partir de la figure III.11, nous avons pu constater qu'avec la structure proposée, qui est basée sur des résonateurs en anneaux à cristaux photoniques, un effet de démultiplexage est donc possible.

La diaphonie (ou Crosstalk, CT) est un paramètre très crucial dans la conception des démultiplexeurs en longueur d'onde. Elle représente l'effet indésirable d'un canal sur les autres canaux. Nous l'avons calculé pour chaque canal, en utilisant l'expression suivante :

$$CT = 10 \log \frac{\text{Transmission pour une longueur d'onde spécifique au port de sortie non souhaité}}{\text{Transmission pour une longueur d'onde spécifique au port de sortie souhaité}}$$

La spécification complète des caractéristiques du démultiplexeur pour une distance de $D=3$ sont indiquées dans le tableau III.2.

Port	λ (nm)	Transmission (%)	Crosstalk (dB)
1	15827	97.25	-15.76
2	15852	94.6	-11.42
3	15872	89.45	-9.05
4	1589	91.2	-10.58

Tableau III.2 : Caractéristiques du démultiplexeur

On constate alors que le niveau de diaphonie entre les canaux de la structure est compris entre -17.34 et -9.98 dB. Ce résultat n'est pas satisfaisant, car on note la présence du signal d'un canal particulier dans les autres canaux.

Afin d'améliorer les performances du démultiplexeur optique à quatre canaux, nous avons cherché à optimiser notre structure proposée de telle manière à améliorer les taux de transmission et de réduire au maximum le Crosstalk. Pour ce faire, nous avons joué sur la distance séparant les différents filtres. Le tableau III.3 indique les spécifications des changements obtenus, en considérant trois différentes distances $D=3$, $D=4$, $D=5$.

Distance	D=3		D=4		D=5	
	Tr(%)	CT(dB)	Tr(%)	CT(dB)	Tr(%)	CT(dB)
Canal 1	97.25	-15.76	41.86	-5.11	98.49	-18.50
Canal 2	94.6	-11.42	80.96	-11.02	96.73	-11.86
Canal 3	89.45	-9.05	81.92	-6.016	88.61	-8.86
Canal 4	31.2	-10.58	80.50	-7.022	92.65	-10.93

Tableau III.3 : Caractéristiques du démultiplexeur proposé pour différentes valeurs de 'D'.

A partir de ce tableau comparatif, on constate que les meilleures caractéristiques du démultiplexeur sont relevées pour une distance $D=5$. Dans ce cas, la structure schématique du démultiplexeur est donnée sur la figure III.12.

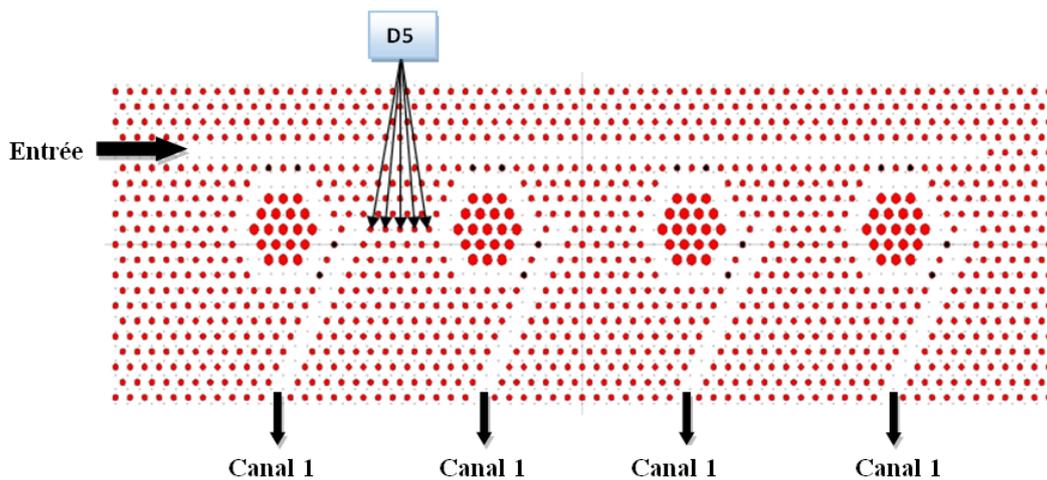


Figure III.12 : Représentation schématique du démultiplexeur pour $D=5$.

La figure III.13 présente le spectre de transmission du démultiplexeur pour une distance $D=5$. Dans ce cas, On observe une amélioration de la transmission pour les canaux 1, 2 et 4 en comparaison avec le résultat obtenu précédemment ($D=3$).

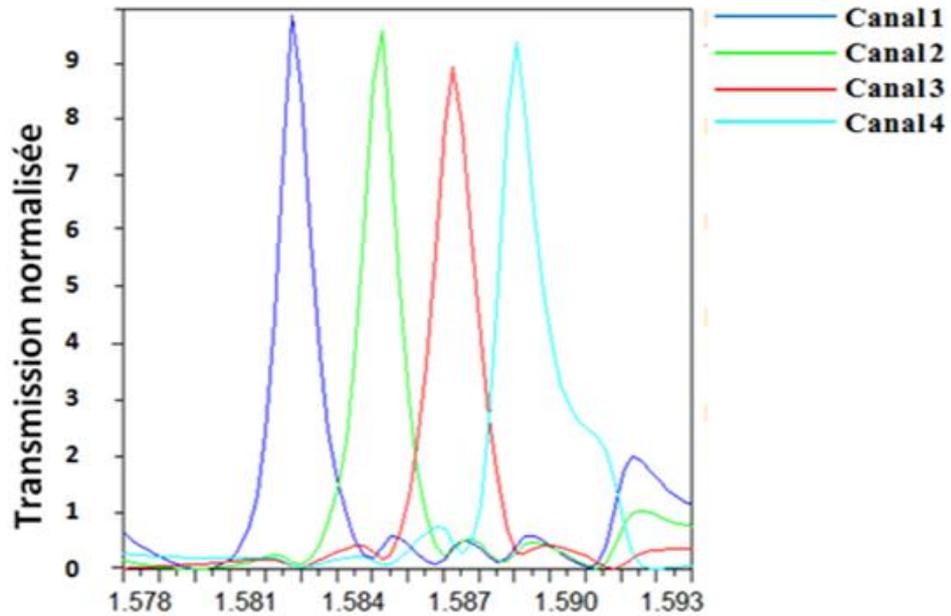
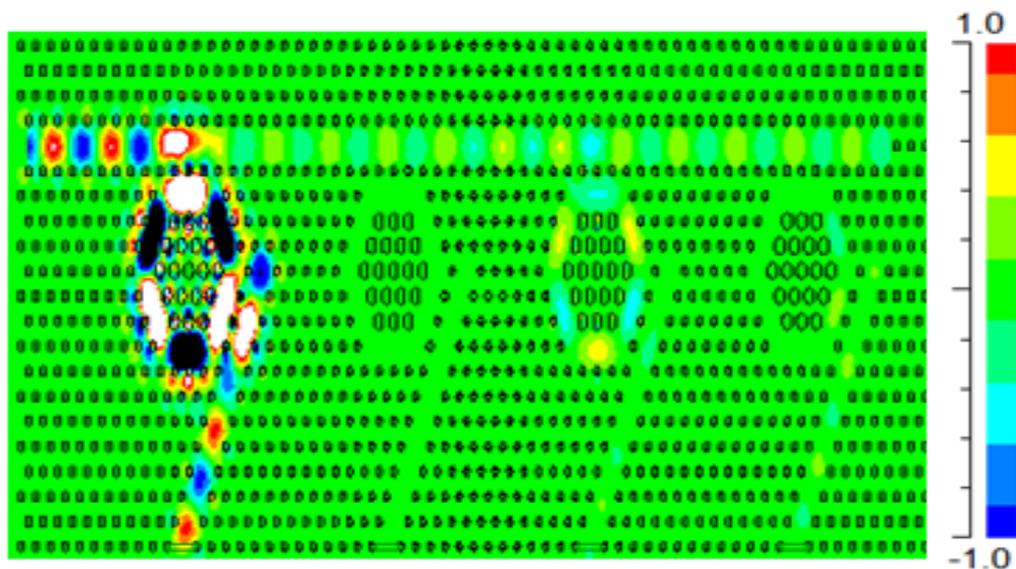
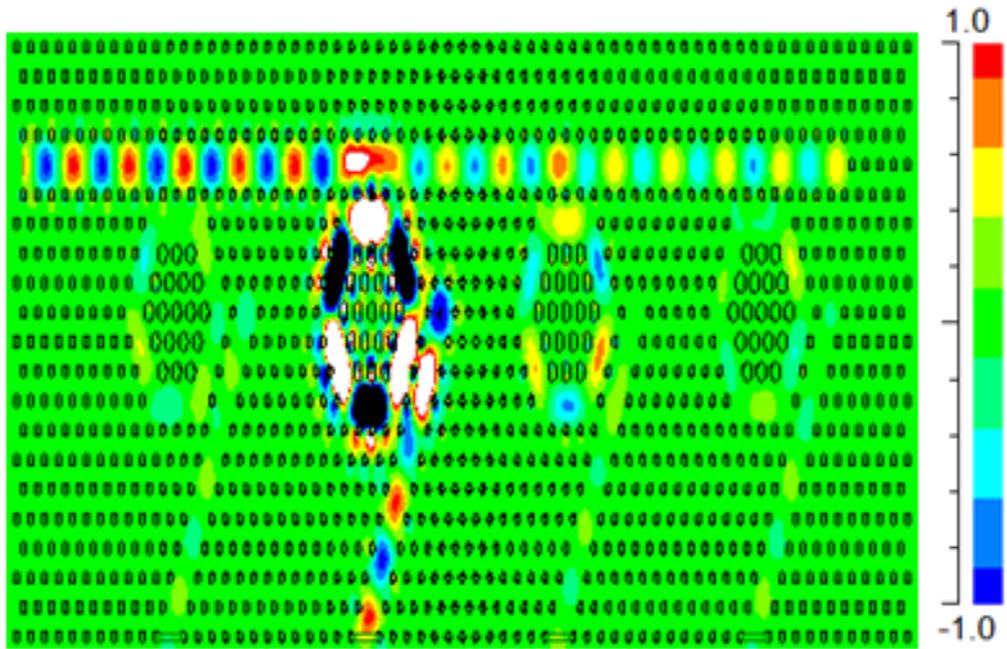


Figure III.13 : Spectre de transmission du démultiplexeur pour $D=5$.

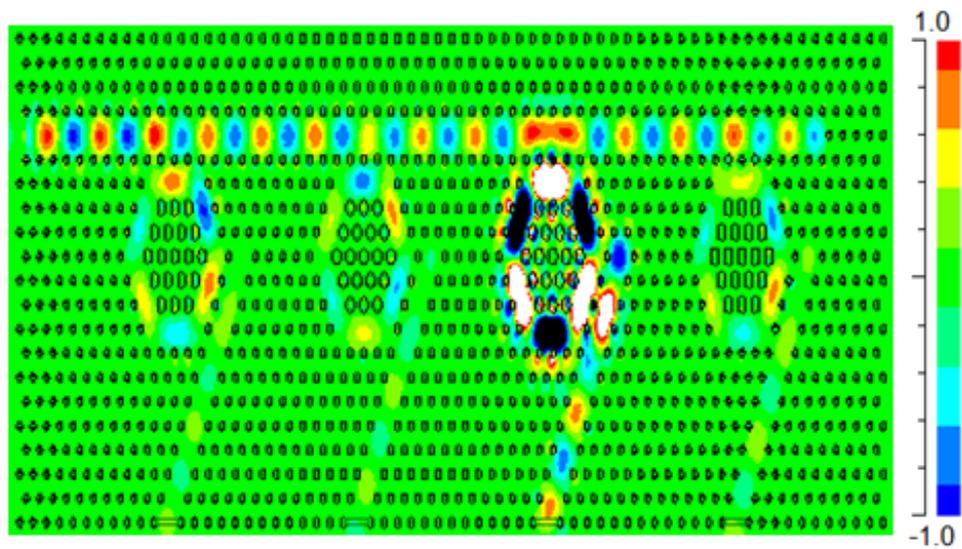
La figure III.14 présente la répartition du champ à l'intérieur du démultiplexeur proposé pour les longueurs d'onde $1.58277 \mu\text{m}$, $1.58528 \mu\text{m}$, $1.58729 \mu\text{m}$, $1.58906 \mu\text{m}$. Selon cette figure, on remarque que notre démultiplexeur sépare nettement les différentes longueurs d'onde.



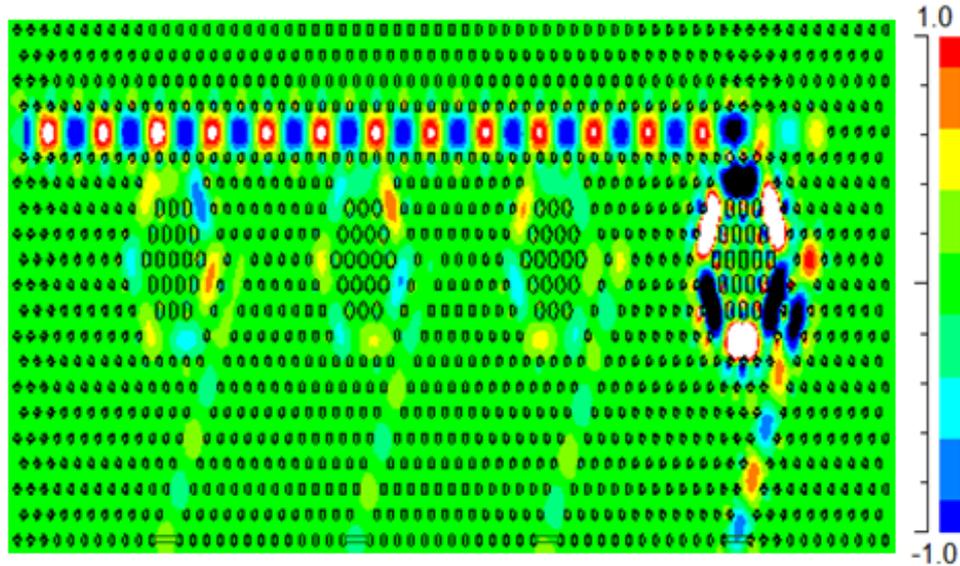
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure III. 14: Répartition du champ dans le démultiplexeur aux longueurs d'onde : (a) $\lambda=0.15827 \mu\text{m}$, (b) $\lambda = 0.158528\mu\text{m}$, (c) $\lambda = 0.15872\mu\text{m}$ et (d) $\lambda = 0.1589\mu\text{m}$.

III.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats de simulation d'un démultiplexeur à base de résonateurs en anneaux à cristaux photoniques bidimensionnels. Les résultats obtenus ont montré que ce type de structure permet de démontrer une fonction de démultiplexage de quatre canaux en longueurs d'onde.

Références

- [1] V. Fallahi, M. Seifouri, S. Olyae, H. Alipour-Banaei, “Four-channel optical demultiplexer based on hexagonal photonic crystal ring resonators”, *Optical Review*, vol.24, pp. 605–610, 2017.

Conclusion générale

Les cristaux photoniques sont des matériaux artificiels possédant une constante diélectrique périodique suivant une, deux ou trois directions de l'espace. Cette périodicité est à l'origine de plusieurs propriétés intéressantes comme par exemple l'ouverture d'une bande interdite photonique (BIP) interdisant la propagation de la lumière. La majorité des applications des cristaux photoniques repose sur leur bande interdite photonique. Pour disposer d'une fréquence permise à l'intérieure de cette bande interdite, il est nécessaire d'introduire des défauts dans cette structure périodique. Ces défauts sont réalisés en modifiant localement la géométrie du cristal.

Au cours de ce travail de mémoire, nous nous sommes attachés à l'étude de composants optiques à base de CP-2D. En particulier, nous avons cherché à concevoir des démultiplexeurs qui sont des composants photoniques élémentaires indispensables au bon fonctionnement de la circuiterie photonique.

Pour atteindre de tels objectifs, nous avons choisi de développer des composants à base de cristaux photoniques bidimensionnels de piliers à fort contraste d'indice. Ceux-ci permettent en effet un contrôle de la lumière dans des volumes restreints. Les composants proposés ont été simulés par la méthode des différences finies dans le domaine temporel à deux dimensions (FDTD-2D) et la méthode des ondes planes (PWE) qui sont parfaitement adaptées à l'étude des structures à base de cristaux photoniques.

Ainsi, nous nous sommes focalisés sur l'étude d'un démultiplexeur à quatre canaux, basé sur le couplage entre guides d'onde et résonateurs en anneaux à cristaux photoniques. Chaque canal est constitué d'un résonateur en anneau, créé par la suppression de quelques motifs de la structure, couplé à un guide d'onde. Une discussion autour des paramètres permettant l'amélioration du fonctionnement de ce composant a été mise au point. Le but étant d'ajuster ces paramètres afin d'obtenir les meilleures transmissions possibles. Nous avons pu constater que la modification du nombre des tiges situées entre les différents résonateurs permet l'amélioration des caractéristiques du démultiplexeur.

Résumé

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

Dans le présent travail, nous nous sommes focalisés sur l'étude d'un démultiplexeur à base de résonateurs en anneaux à cristaux photoniques. Les propriétés de ce démultiplexeur sont numériquement étudiées en utilisant la méthode des différences finies dans le domaine temporel à deux dimensions (2D-FDTD). L'amélioration du fonctionnement de ce composant repose sur l'ajustement de la distance entre les différents résonateurs.

Mots clés :

Cristaux photoniques, démultiplexeur, résonateur en anneaux à cristaux photoniques.

Abstract:

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

In this work, we focused on the study of a demultiplexer based on photonic crystals rings resonators. The properties of this demultiplexer are numerically studied using the finite difference method in the two-dimensional time domain (2D-FDTD). The

improvement of the performances of this component depends on the adjustment of the distance between the different resonators.

Keywords:

Photonic crystals, demultiplexer, photonic crystals rings resonator.