

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

Université Abderrahmane Mira

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

Spécialité : Systèmes Des Télécommunications

### Thème

**Influence des paramètres géométriques sur les  
filtres optiques à base de cristaux photoniques  
bidimensionnels**

Préparé par :

MERMOURI Massissilia

BENSEKHRI Siham

Dirigé par :

*Mme. Bendjelloul Rahima*

Examiné par :

*Mlle. Achour Lyakout*

*Mme. Hamzaoui Dehbia*

Année universitaire : 2021/2022



# Remerciements

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

*Nos vifs remerciements sont d'abord adressés à madame **Bendjelloul Rahima** Qui nous a fait l'honneur de travailler avec nous et que sans elle, ce modeste travail n'aurait pas vu le jour. Nous la remercions infiniment pour son aide, pour la qualité de son encadrement exceptionnel et surtout pour sa disponibilité durant la préparation de ce mémoire.*

*Nos profonds remerciements vont aux membres du Jury, qui nous ont honoré d'avoir accepté d'évaluer ce travail.*

*Et enfin, que nos chers parents et familles, et bien avant tout, trouvent ici l'expression de nos remerciements les plus sincères et les plus profonds en reconnaissance de leurs sacrifices, aides, soutien et encouragement afin de nous assurer cette formation dans les meilleures conditions.*

# *Dédicace*

*Tout d'abord je tiens à remercier Dieu le tout puissant de m'avoir donné la santé, la patience, la volonté et de m'avoir fourni sa bénédiction.*

*Je dédie ce modeste travail :*

*À mes chers parents, symbole de sacrifice, de tendresse, qui ont éclairé mon chemin et qui m'ont encouragé et soutenue toute au long de mes études.*

*À mes très chères sœurs : Assia, kahina et siham et à leurs époux,*

*À mes deux chers frères : Naim et ouanis,*

*À ma belle-sœur Lila*

*À m'a binôme Siham*

*Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers mes chères amies : Nassima, zoubida, Sarah, Aicha et Rosa pour leurs encouragements tout au long de ma démarche.*

*Enfin, j'exprime ma dernière pensée à Younes pour m'avoir apporté le soutien et la bonne humeur dont j'avais tant besoin pour effectuer ce travail.*

*Que Dieu vous garde pour moi*

*Massissilia*

# *Dédicace*

*A ma très chère mère*

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

*A mon très cher père.*

*Tu laisses un grand vide dans ma vie, mais sache qu'il y aura toujours  
une place pour toi dans mon cœur. Même si tu ne sembles pas être  
avec moi. Que dieu te garde dans ces vastes paradis.*

*Mon frère Yacine qui a partagé avec moi tous les moments d'émotion  
lors de la réalisation de ce travail.*

*Pour toutes mes amies Dihia, Sarah, Nadjat, Silia, Lamia, Kenza et  
ma chère cousine Manal qui ont toujours été là pour moi.*

*Je vous aime*

*Siham*



## Table des matières

Liste des abréviations .....	i
Liste des figures... ..	ii
Liste des tableaux.....	iii
Introduction générale.....	1
<b>Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques</b>	
<b>I.1. Introduction.....</b>	<b>3</b>
<b>I.2. Définition des cristaux photoniques.....</b>	<b>3</b>
<b>I.3. Analogie électron-photon.....</b>	<b>5</b>
<b>I.4. Type des cristaux photoniques</b>	
I.4.1. Les cristaux photoniques unidimensionnels (CPs-1D) .....	7
I.4.2. Les cristaux photoniques bidimensionnels (CPs -2D) .....	7
I.4.3. Les cristaux photoniques tridimensionnels (CPs-3D) .....	10
<b>I.5. Défauts dans les cristaux photoniques</b>	
I.5.1. Les défauts ponctuel.....	11
I.5.2. Les défauts linéaire.....	11
<b>I.6. Application des cristaux photonique.....</b>	<b>12</b>
<b>I.7. technologie et matériaux.....</b>	<b>13</b>
<b>I.8. techniques de modélisation</b>	
I.8.1. La méthode des ondes planes PWE.....	13
I.8.2. La méthode FDTD .....	14
<b>I.9. Conclusion .....</b>	<b>14.</b>
<b>Références du chapitre 1 .....</b>	<b>15</b>

## Chapitre II : les filtres à base de résonateurs en anneaux

II.1. Introduction.....	17
II.2. Filtrage dans les cristaux photoniques	
II.2.1. Filtre à base de cavité résonante.....	17
II.2.1.2. Définition et type de cavité.....	17
II.2.1.2. Caractéristique de cavité.....	18
II.2.2. Filtre à base de résonateur en anneau à cristal photonique .....	18
II.2.2.1 Résonateurs en anneaux à cristaux photoniques.....	18
II.2.2.2. Caractéristiques des Résonateurs en anneaux.....	18
II.2.2.2.1. Le facteur de qualité (Q).....	19
II.2.2.2.2 Finesse.....	19
II.2.2.2.3. Couplage entre guide d'onde et résonateur à CPs.....	20
II.5. Travaux réalisés	
II.5.1. Filtre channel drop à base de PCRR carré. ....	20
II.5.2. Filtre channel drop à base de PCRR de forme X.....	21
II.5.3. Filtre channel drop à base de PCRR de forme plus.....	22
II.6. Application des filtres à base de résonateurs en anneau	
II.6.1. Démultiplexeur.....	23
II.6.2. Capteur.....	24
II.7. Conclusion.....	25
Références du chapitre 2.....	26
<b>Chapitre III : Résultats et interprétations</b>	
III.1. Introduction .....	26
III.2. Présentation de l'outil de simulation.....	26



# Table des matières

---

III.2.1. Simulateur « BandSOLVE » .....	27
III.2.2. Simulateur « FullWAVE » .....	27
III.3. Structure proposée .....	28
<b>III.4. Filtre à base de résonateur en anneau à cristal photonique</b>	
III.4.1. Structure non optimisée .....	29
<b>III.4.2. Structure optimisée</b>	
III.4.2.1. Premiers Cas : insertion des tiges de dispersion .....	31
III.4.2.2. Deuxième cas : Modification des tiges de couplage.....	33
III.4.2.3. Troisième cas : modification des tiges adjacente .....	34
III.4.2.4. Quatrième cas : Influence de la distance de couplage	
<b>III.5. Structure finale .....</b>	<b>35</b>
<b>III.6. Paramètres affectant les caractéristiques du filtre.....</b>	<b>37</b>
<b>III.7. Conclusion.....</b>	<b>39</b>
<b>Référence de chapitre 3</b>	
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>40</b>

# Table des matières

---

### Liste des abréviations

**1-D** : Unidimensionnel.

**2-D** : Bidimensionnel.

**3-D** : Tridimensionnel.

**BIP** : Bande Interdite Photonique.

**CPs** : Cristaux photoniques.

**CDF** : Channel Drop Filter.

**TE** : Transverse Electrique.

**FDTD**: Finite-Difference Time-Domain method.

**F**: Finesse

**PWE**: Plane Wave Expansion method

**PCRR**: Photonic Crystal Ring Resonator.

**Q** : Facteur de qualité.

**TM** : Transverse Magnétique.

**V** : volume modal

**WDM**: Wavelength Division Multiplexing.

$\lambda_0$  : longueur d'onde de résonance.

.

## Liste des Figures

### Chapitre 01 :

- Figure I.1** : Représentation schématique des différents types de cristaux photoniques : unidimensionnel (1D), bidimensionnel (2D) et tridimensionnel (3D).....3
- Figure I.2** : la figure à droite présente l'agrandissement d'une aile de papillon. On voit un arrangement périodique des écailles.....4
- Figure I.3** : Exemples de cristaux photoniques naturels : Structure opale inverse 3D apparaissant dans la couleur verte de Paridés Sésostris.....4
- Figure I.4**: Schéma d'un cristal photonique 1D : miroir de Bragg.....7
- Figure I.5** : Structures bidimensionnelles : (a) connectée, (b) déconnectée.....8
- Figure 1.6** : Polarisations possibles dans une structure à bande interdite photonique bidimensionnelle.....8
- Figure 1.7** : Structure 2D : (a) Réseau carré. (b) Le réseau triangulaire. (c) Le réseau hexagonal.....9
- Figure I.8** : Réseau réel, réciproque, première zone de Brillouin et zone de Brillouin irréductible pour les réseaux 2D (a) carré et (b) triangulaire.....10
- Figure I-9** : Diagrammes de bandes d'une structure bidimensionnelle pour les polarisations TE (en rouge) et TM (en bleu).....11
- Figure 1.10** : Structure tas de bois.....11
- Figure I.11** : Défauts ponctuels : (a) défauts lacunaire, (b) et (c) défauts de substitution.....12
- Figure I.12** : Exemples de défauts linéaires dans un cristal photonique 2D créés (a) en omettant une seule rangée de motifs, (b) en modifiant l'indice de réfraction d'une seule rangée de motifs, (c) en variant le rayon d'une seule rangée de motifs de la structure.....13
- Figure I.13** : Quelques exemples de dispositifs à base de cristaux photoniques bidimensionnels : (a) coupleur directionnel, (b) biocapteur, (c) diviseur de puissance, (d) filtre, (e)démultiplexeur et(f) double virage.....14

## Chapitre 02 :

<b>Figure II.1</b> : Exemples de cavités : (a) cavité linéique, (b) Cavité hexagonale, (c) <b>Cavité triangulaire</b> .....	<b>18</b>
<b>Figure II.2</b> : Filtre channel drop à base de cavité résonante.....	<b>19</b>
<b>Figure II.3</b> : Résonateurs en anneaux à cristaux photoniques (photonic crystals 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.....	<b>20</b>
<b>Figure II.4</b> : Réponse spectrale d'un résonateur en anneau.....	<b>21</b>
<b>Figure II.5</b> : Représentation schématique d'un filtre channel drop.....	<b>22</b>
<b>Figure II.6</b> : (a) Structure schématique et (b) spectres de transmission normalisée du CDF à base de PCRR en forme de 'pseudo-circulaire.....	<b>23</b>
<b>Figure II.7</b> : (a) Structure schématique et (b) spectres de transmission normalisée du CDF à base de PCRR en forme de X.....	<b>24</b>
<b>Figure II.8</b> : (a) Structure schématique et (b) spectres de transmission normalisée du CDF à base de PCRR en forme de X.....	<b>24</b>
<b>Figure II.9</b> : : (a) Structure schématique du démultiplexeur proposé et (b) son spectre de transmission.....	<b>25</b>
<b>Figure II.10</b> : Capteurs biochimiques à base de : a) résonateur en anneau [10] et b) résonateur en anneau en cascade.....	<b>26</b>

## Chapitre 03 :

<b>Figure III.1</b> : fenêtre du programme RSoft CAD.....	29
<b>Figure III.2</b> : Fenêtre principale des paramètres de simulation de BandSOLVE .....	30
<b>Figure III.3</b> : Fenêtre principale des paramètres de simulation de FullWAVE.....	31
<b>Figure III.4</b> : Structure sans défauts.....	31
<b>Figure III.5</b> : Diagramme de bandes d'un CP-2D constitué par un réseau carré de pas $a=0.6082\mu\text{m}$ de piliers d'indice de réfraction $n = 3.56$ plongées dans l'air.....	32
<b>Figure III.6</b> : Représentation schématique du filtre proposé.....	33
<b>Figure III.7</b> : La réponse spectrale du filtre optique.....	34
<b>Figure III.8</b> : Répartition du champ dans le CDF en polarisation $TM$ à la longueur d'onde $1.555 (\mu\text{m})$ .....	34
<b>Figure III.9</b> : insertion des tiges de dispersion $R_s$ dans le résonateur.....	35
<b>Figure III.10</b> : (a) Transmission et (b) facteur de qualité du CDF en fonction de la position des tiges de dispersion.....	36
<b>Figure III.11</b> : (a)Transmission et (b) facteur de qualité du CDF en fonction du rayon ( $R_s$ ).....	37
<b>Figure III.12</b> : Spectres de transmission du CDF pour (a) $R_s=0.109 \mu\text{m}$ et (b) $R_s=0.11\mu\text{m}$ .....	37
<b>Figure III.13</b> :(a) transmission et (b)facteur de qualité du CDF en fonction de $R_c$ .....	38
<b>Figure III.14</b> : Spectres de transmission du CDF pour (a) $R_c=0.115 \mu\text{m}$ et (b) $R_c=0.11\mu\text{m}$ .....	38
<b>Figure III.15</b> :(a) transmission et (b)facteur de qualité du CDF en fonction de $R_a$ .....	39

<b>Figure III.16.</b> Spectres de transmission du CDF pour (a) $R_a=0.106 \mu\text{m}$ et (b) $R_c=0.11\mu\text{m}$ .....	39
<b>Figure III.17 :</b> (a) Schéma du CDF pour $D_c = 1$ et (b) son spectre de transmission.....	40
<b>Figure III.18 :</b> (a) Schéma du CDF pour $D_c = 2$ et (b) son spectre de transmission.....	40
<b>Figure III.19:</b> (a) Schéma du CDF pour $D_c = 1a$ et (b) son spectre de transmission.....	41
<b>Figure III.20 :</b> Structure optimisée du filtre.....	42
<b>Figure III.21 :</b> Réponse spectrale du filtre CDF de la structure optimisée.....	42
<b>Figure III.22 :</b> Répartition du champ dans le CDF en polarisation $TM$ aux longueurs d'onde : (a) $1.55 \mu\text{m}$ (à la résonance) et (b) $1.535 \mu\text{m}$ (hors résonance).....	43







## Liste des tableaux

<b>Tableau III.1</b> : Modification de la longueur d'onde en fonction du rayon des tiges internes.....	33
<b>Tableau III.2</b> : Récapitulatif des positions des tiges de dispersion.....	36
<b>Tableau III.3</b> : Spécifications du CDF proposé pour différentes valeurs de $a$ .....	33
<b>Tableau III.4</b> : Spécifications du CDF proposé pour différentes valeurs de $R$ .....	34
<b>Tableau III.5</b> : Spécifications du CDF proposé pour différentes valeurs de $R_i$ .....	34

# Introduction général

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

Au cours des dernières années, les cristaux photoniques ou matériaux à bande interdite photonique ont suscité un intérêt important dans la communauté scientifique. Pour comprendre comment ces matériaux agissent sur la lumière, il est nécessaire de connaître l'origine de leurs propriétés, en particulier leurs caractéristiques de dispersion de la lumière [1].

La notion de "cristaux photoniques" a été proposée pour la première fois en 1987 [2]. Le premier cristal photonique a été réalisé en 1991[3]. Les cristaux photoniques sont des matériaux artificiels dont l'indice de réfraction varie périodiquement dans les différentes directions de l'espace. Cette périodicité entraîne l'apparition de gammes de longueurs d'onde, appelées bandes interdites photoniques (BIP), dans lesquelles aucun mode électromagnétique ne peut se propager dans le cristal. La continuité de cette bande sera brisée en introduisant un défaut ponctuel ou linéaire dans ces structures, ce qui entraîne la localisation de la lumière propagée dans la région du défaut.

Ainsi, le but de ce travail s'appuie sur l'influence des paramètres géométriques sur les filtres à extraction (CDF, channel drop filter) à base de cristaux photoniques bidimensionnels, et en particulier à base de résonateurs en anneaux à cristaux photoniques.

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 verrons l'analogie qui existe entre les électrons et les photons qui vont nous faire comprendre l'origine de la bande interdite photonique. Nous énumérons les différents types de ces cristaux, nous détaillerons le cas des cristaux bidimensionnels. Nous présenterons quelques exemples d'applications utilisant ces structures. Nous parlerons enfin des méthodes numériques qui sont actuellement utilisés pour la modélisation des cristaux photoniques.

Dans le deuxième chapitre, nous nous intéressons aux filtres à base de résonateurs en anneaux à cristaux photoniques (PCRRs). Pour cela, nous allons décrire dans un premier temps les PCRRs et présenter leurs propriétés générales. Nous présenterons le principe de couplage entre un guide d'onde et un résonateur. Par la suite, nous détaillerons quelques configurations des CDFs à base de différents résonateurs et dévoilerons les paramètres

affectant leurs caractéristiques. Nous terminerons ce chapitre par la présentation de quelques dispositifs à base de CDFs.

Le troisième chapitre est composé de deux parties. La première partie sera consacrée à la présentation de l'outil de simulation et de son environnement de travail, tandis que la deuxième sera dédiée à la présentation des résultats de simulation pour un filtre à extraction en fonction de la variation de plusieurs paramètres géométriques dans la structure.

Ce modeste manuscrit se termine par une conclusion générale.

### **Référence:**

- [1] K. S. Yee, «Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media», IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol.74, no. 3, pp. 302-307, (1966).
- [2] S. John. «Strong Localization of Photons in Certain Disordered Dielectric Super lattices», Phys. Review. Letters ,vol. vol.58, p.2486, (1987).
- [3] E. Yablonovitch. «Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics», Phys. Rev. Lett.vol.58, p.2059, (1987).

# Généralité sur les cristaux photonique

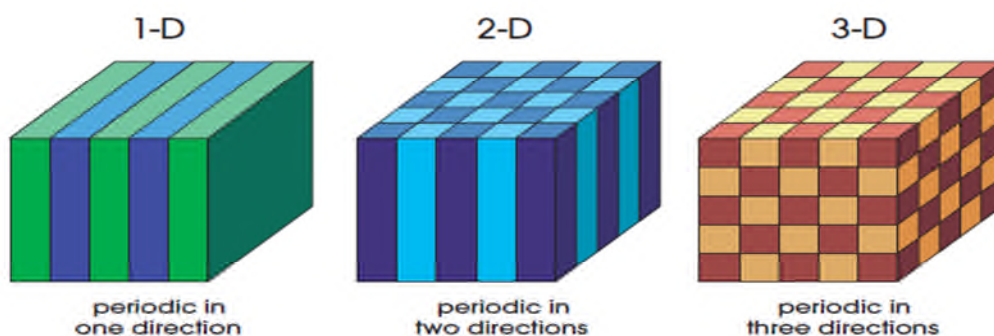
### I.1. Introduction :

Le premier cristal photonique a été proposé pour la première fois en 1987 grâce aux travaux de Yablonovitch et John [1,2], dans le but de contrôler l'émission spontanée de la lumière. La réalisation du premier cristal photonique a été en 1991[3].

L'objectif de ce chapitre est de présenter les concepts de base liés aux cristaux photoniques. Nous verrons d'abord l'analogie qui existe entre les électrons et les photons. Nous présenterons les différents types des cristaux photoniques, nous porterons une attention particulière à décrire les cristaux photoniques à deux dimensions et leurs défauts. Nous terminerons par une présentation des méthodes numériques les plus utilisées pour déterminer les caractéristiques des cristaux photoniques.

### I.2. Définition des cristaux photoniques :

Les cristaux photoniques (CPs) sont des matériaux diélectriques dont l'indice de réfraction varie périodiquement à l'échelle de la longueur d'onde. Selon que la périodicité existe le long d'un, de deux ou de trois axes, on qualifie le cristal d'unidimensionnel, de bidimensionnel et de tridimensionnel, comme le montre la figure I.1. Cette périodicité provoque une interdiction de la propagation des photons, dans une certaine gamme spectrale, que l'on nomme bande interdite photonique (BIP) [4].



**Figure I.1** : Représentation schématique des différents types de cristaux photoniques : unidimensionnel (1D), bidimensionnel (2D) et tridimensionnel (3D) [5].

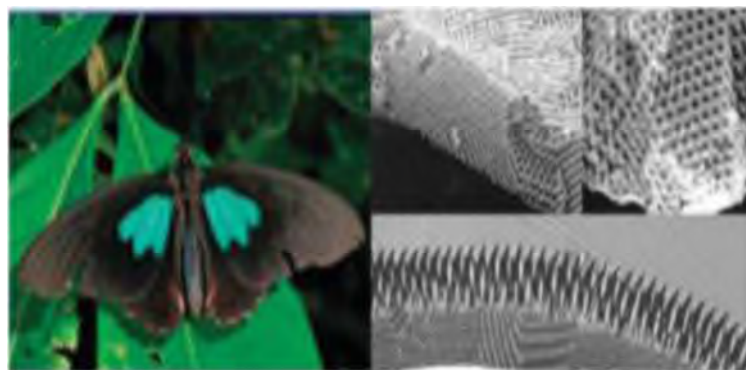
Les cristaux photoniques artificiels ont été inspirés de la nature. Certaines structures naturelles peuvent avoir les mêmes propriétés que les cristaux photoniques artificiels. En effet les colorations vives de certaines espèces sont parfois dues à la présence de structures très complexes, à caractère périodique [6].

Les Papillons sont parmi les insectes les plus colorés que nous offre la nature Figure I.2. Ils sont en fait très largement tributaires de la lumière et ont développé un arsenal impressionnant pour gérer cette interaction avec les ondes électromagnétiques au mieux de leur intérêt.



**Figure I.2** : La figure de droite présente l'agrandissement d'une aile de papillon. On voit un arrangement périodique des écailles [7].

Nous pouvons citer aussi la structure d'opale inverse qui a été découverte dans les ailes de certaines espèces de papillons, comme le montre la figure I.3 [8].



**Figure I.3** : Exemples de cristaux photoniques naturels : Structure opale inverse 3D apparaissant dans la couleur verte de Paridés Sésostris [8].



## I.3. Analogie électron-photon :

L'analogie entre les équations de propagation de l'électromagnétisme et l'équation fondamentale de la mécanique quantique [9] rend aisée son étude dans le domaine optique ou dans celui des ondes millimétriques [5]. Cette analogie permet de comprendre les diverses propriétés optiques des matériaux et notamment les cristaux photoniques à différentes dimensions.

Dans le cas d'un milieu diélectrique, linéaire, homogène, isotrope, non magnétique, de permittivité relative  $\epsilon(r)$ , et en l'absence de charges et de courants, les évolutions temporelles et spatiales du champ électrique et magnétique sont données par :

- Relation de Faraday :

$$\text{Rot}[E(r, t)] = -\mu_0 \frac{\partial}{\partial t} H(r, t) \quad (1.1)$$

- Relation d'Ampère :

$$\text{Rot}[H(r, t)] = \epsilon_0 \epsilon(r) \frac{\partial}{\partial t} E(r, t) \quad (1.2)$$

- Relation de Gauss :

$$\text{Div}[\epsilon(r)E(t, r)] = 0 \quad (1.3)$$

- Relation de conservation de flux magnétique :

$$\text{div}[H(t, r)] = 0 \quad (1.4)$$

Où

$E$  : champ électrique.

$H$  : champ magnétique.

$(\epsilon_0)$  et  $(\mu_0)$  représentent la permittivité diélectrique et la perméabilité magnétique du vide.

$(\epsilon)$  : constante diélectrique.

$(r)$  et  $(t)$  représentent les dépendances spatiales et temporelles.

On applique  $(\frac{\partial}{\partial t})$  à l'équation (1.1), on aura :

$$\nabla \times \left( \frac{\partial E(r, t)}{\partial t} \right) = -\mu_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} H(r, t) \quad (1.5)$$

De l'équation (1.2) on a :

$$\frac{\partial E(r, t)}{\partial t} = \nabla \times \frac{H(r, t)}{\epsilon_0 \epsilon(r)} \quad (1.6)$$

En remplaçant l'équation (1.6) dans l'équation (1.5) on trouve :

$$\nabla \times \left( \frac{\nabla \times H(r, t)}{\epsilon(r)} \right) = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 H(r, t)}{\partial t^2} \quad (1.7)$$

La recherche de solutions harmoniques  $E(r, t) = E(r)e^{j\omega t}$  et  $H(r, t) = H(r)e^{j\omega t}$  aboutit :

$$\nabla \times (\nabla \times H(r)) = \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon(r) H(r) \quad (1.8)$$

On sait que :

$$\nabla \times (\nabla \times H(r)) = \nabla (\nabla \cdot H(r)) - \Delta(H(r)) \quad (1.9)$$

$$\nabla \cdot H(r) = 0 \Rightarrow \nabla (\nabla \cdot H(r)) = 0$$

On a aussi :

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

On aura donc l'équation de propagation (équation de Helmholtz) pour le champ électrique :

$$\nabla^2 H(r) = (-\omega^2/c^2) \epsilon(r) H(r) \quad (1.10)$$

Où  $C = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$  : la vitesse de la lumière dans le vide, et  $\omega$  : Pulsation.

L'équation de Schrödinger pour la fonction d'onde  $\psi$  d'un électron dans un potentiel  $V$  s'écrit :

$$\nabla^2 \Psi(r) = -\frac{2m}{\hbar^2} (U - V(r)) \Psi(r) \quad (1.11)$$

Avec :

$U$  : l'énergie de l'électron.

$V(r)$  : potentiel atomique.

$\hbar$  : constante de Planck divisée par  $2\pi$ .

$m$  : masse de l'électron.

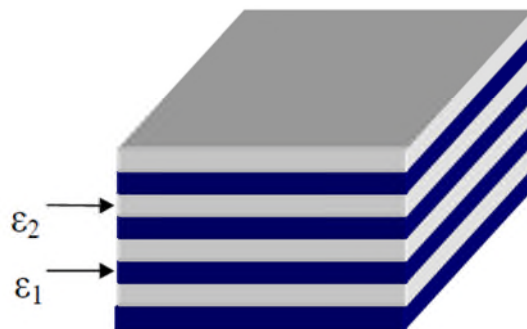
Il existe une analogie formelle entre l'équation de Schrödinger (1.11) pour l'électron et l'équation d'Helmholtz (1.10) pour le photon. Par conséquent, de la même manière que la périodicité du potentiel cristallin d'un semi-conducteur entraîne l'apparition de bandes interdites en énergie pour les électrons, 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.

**I.4. Types des cristaux photoniques :**

Les cristaux photoniques sont classés selon leur dimensionnalité en trois types : unidimensionnel (1D), bidimensionnel (2D), tridimensionnel (3D).

**I.4.1. Les cristaux photoniques unidimensionnels (CPs-1D) :**

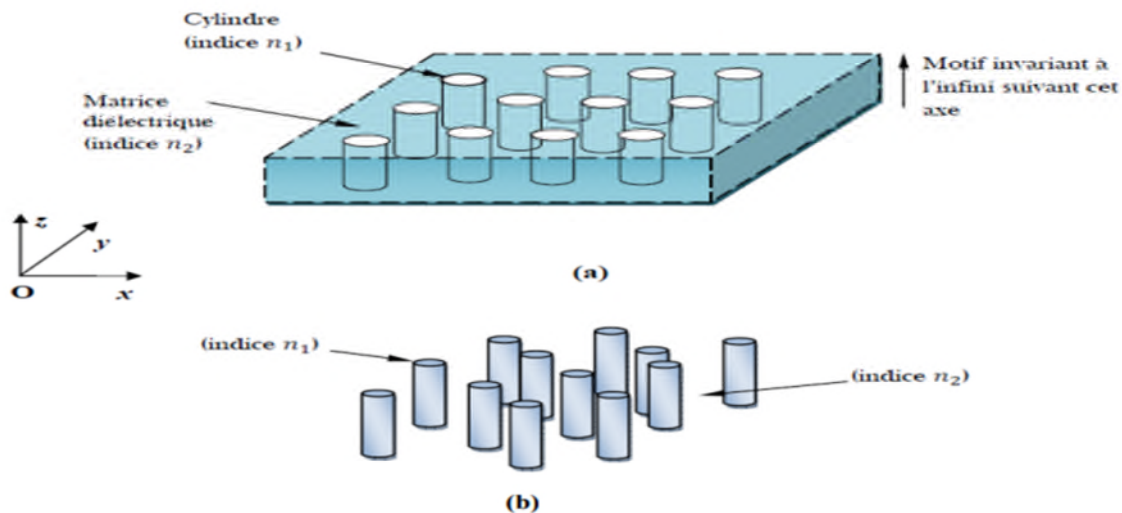
Ces structures sont souvent connues sous le nom de miroir de Bragg (figure I.4). Elles sont constituées par un empilement périodique de couche diélectrique d'indice de réfraction différent.



**Figure I.4:** Schéma d'un cristal photonique 1D : miroir de Bragg

**I.4.2. Cristaux photoniques bidimensionnels :**

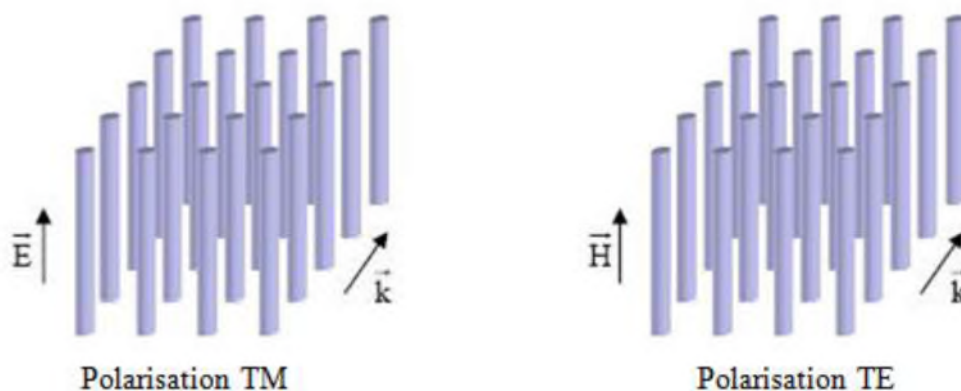
Un cristal photonique bidimensionnel est une structure qui présente une modulation périodique de la permittivité diélectrique suivant deux directions de l'espace, et homogène dans la troisième. Les cristaux photoniques à deux dimensions sont composés d'un réseau périodique de trous d'air percés dans un diélectrique (structure connectée) ou de piliers de diélectrique dans l'air (structure déconnectée), comme il est illustré sur la figure I.5 [11].



**Figure I.5 :** Structures bidimensionnelles : (a) connectée, (b) déconnectée [11].

Les propriétés optiques des structures bidimensionnelles sont fortement dépendantes de la polarisation de l'onde électromagnétique :

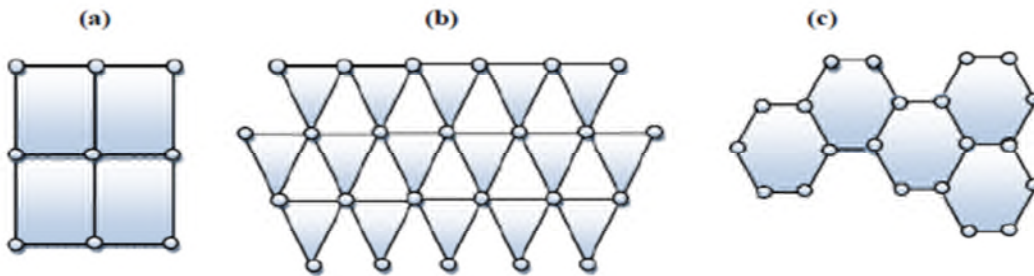
- La polarisation TE (Transverse Electric) : lorsque le champ magnétique est parallèle à l'axe des tiges, comme le montre la figure I.6.b.
- La polarisation TM (Transverse Magnétique) : lorsque le champ électrique est parallèle à l'axe des tiges, comme il est schématisé sur la figure I.6.a.



**Figure 1.6 :** Polarisations possibles dans une structure à bande interdite photonique bidimensionnelle.

Les cristaux photoniques à deux dimensions sont généralement constitués d'un réseau périodique de piliers de diélectrique dans l'air ou de trous d'air percés dans une matrice

diélectrique. Les réseaux les plus courants pour l'organisation des piliers (ou des trous) sont le réseau carré, le réseau triangulaire et le réseau hexagonal, comme c'est montré sur la figure 1.7.



**Figure 1.7** : Structure 2D : (a) réseau carré, (b) réseau triangulaire, (c) le réseau hexagonal [12].

**I.4.2.1. Diagrammes de bandes :**

Pour une structure périodique 2D, la définition du diagramme de bandes consistera à reporter les courbes de dispersion  $\omega_n(k)$  représentant la variation de la fréquence des modes en fonction du module du vecteur  $k$  qui parcourt le périmètre du triangle de la zone de Brillouin irréductible. Le calcul du diagramme de bandes nous renseigne sur les propriétés (la position et la largeur) des bandes interdites photoniques pour chaque polarisation.

Beaucoup de propriétés des cristaux photoniques (CPs) sont directement compréhensibles par l'étude de leur diagramme de bandes. Pour les étudier, on utilise les notions de réseau réciproque et de zones de Brillouin, que nous allons définir dans la section suivante.

**I.4.2.1.1. Réseau réciproque :**

Le réseau réciproque d'un CP 2D est défini à partir du réseau réel par la relation suivante :

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

Où  $\vec{a}_i$  et  $\vec{b}_j$  : vecteurs des réseaux réels et réciproques.

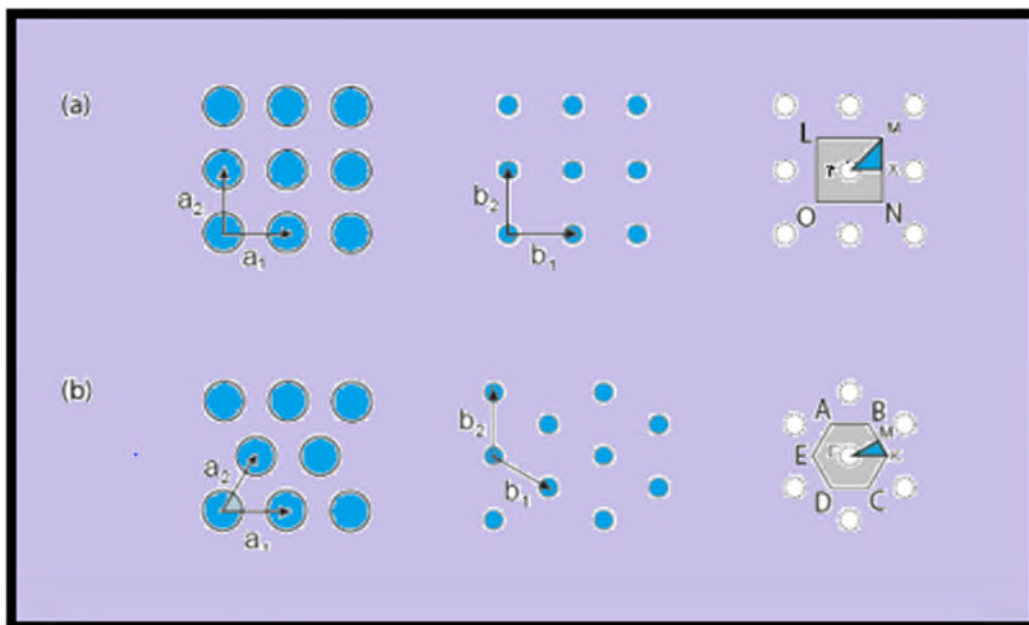
$\delta_{ij}$  : symbole de Kronecker.

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 0 & i \neq j \\ 1 & i = j \end{cases}$$

**I.4.2.1.2. Zones de Brillouin (ZB) :**

La zone de Brillouin (ZB) est la région qui subdivise l'espace de réseau réciproque associé au cristal. Ceux-ci sont infinis et peuvent être définis à l'aide du plan de Bragg, qui est le plan de médiation de l'ensemble des vecteurs formés par la combinaison linéaire des vecteurs de réseaux réciproques.

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.



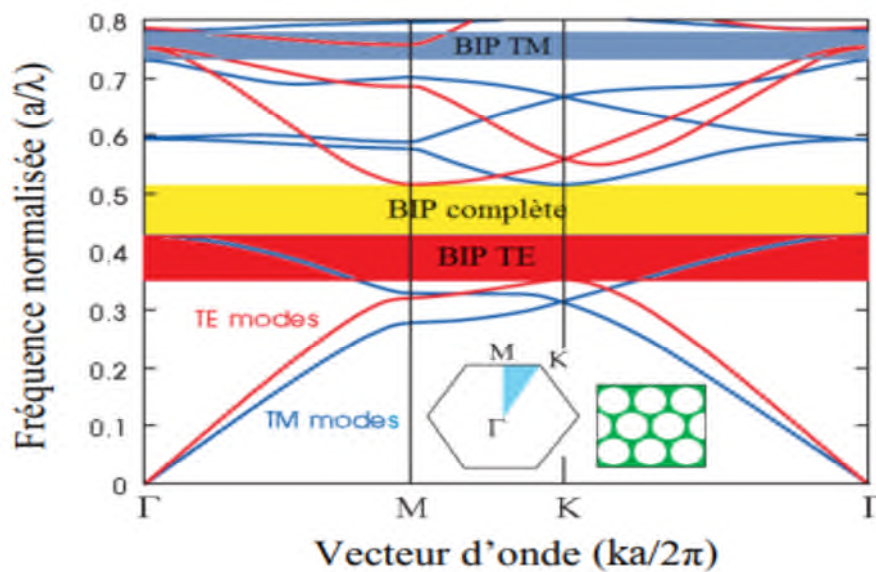
**Figure I.8 :** Réseau réel, réciproque, première zone de Brillouin et zone de Brillouin irréductible pour les réseaux 2D (a) carré et (b) triangulaire [14].

La figure 1.9 représente le diagramme de bandes calculé pour un réseau triangulaire pour les deux polarisations. Les polarisations TE et TM se distinguent par des traits de couleurs différentes. La structure correspond à une matrice bidimensionnelle de trous d'air ( $\epsilon=1$ ) dans un matériau de permittivité  $\epsilon = 13$ , où le diamètre des trous est égal à  $0.48 \cdot a$  ( 'a' est le pas du réseau) .

Le diagramme de la figure I.9 représente :

- En abscisse, le parcours fait par le vecteur d'onde lorsqu'il décrit le contour formé par les points de haute symétrie  $\Gamma$ ,  $M$ ,  $K$  de la première zone de Brillouin.

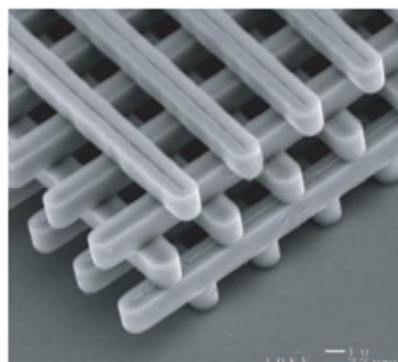
- En ordonnée, les fréquences des modes calculés.



**Figure I.9:** Diagramme de bandes d'une structure bidimensionnelle pour les polarisations TE (en rouge) et TM (en bleu) [13].

#### I.4.3. Cristaux photoniques tridimensionnels (CPs-3D) :

Les cristaux photoniques tridimensionnels sont des structures dont la permittivité diélectrique est structurée périodiquement dans les trois directions. Les cristaux photoniques à trois dimensions posent de nombreux problèmes de fabrication. Pour cette raison, nous nous sommes intéressés qu'aux cristaux photoniques à deux dimensions qui peuvent être fabriqués facilement. Un exemple d'un cristal 3D est donné sur la figure 1.10.



**Figure 1.10 :** Structure tas de bois.

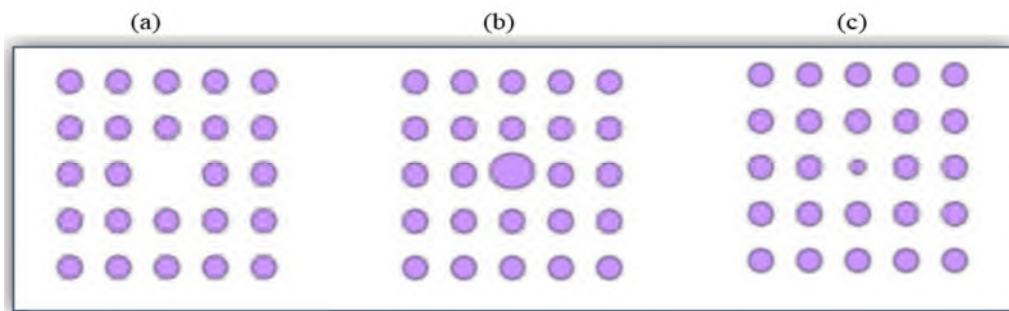
### I.5. Défauts dans les cristaux photoniques :

Dans les cristaux photoniques à deux dimensions, deux types de défauts sont réalisables. On peut considérer les défauts ponctuels et les défauts linéaires.

#### I.5.1. Défauts ponctuels :

La création de ces défauts s'effectue, soit, par une modification locale de l'indice de réfraction ou un changement de taille d'un motif du cristal (défaut de substitution), soit par le retrait d'un motif, ce qui permet de créer une lacune dans le cristal (défaut lacunaire). Quelques exemples sont illustrés sur la figure I.11.

Un défaut ponctuel dans un cristal photonique peut servir de cavité résonante puisqu'il piège la lumière dans une bande de fréquence très étroite.

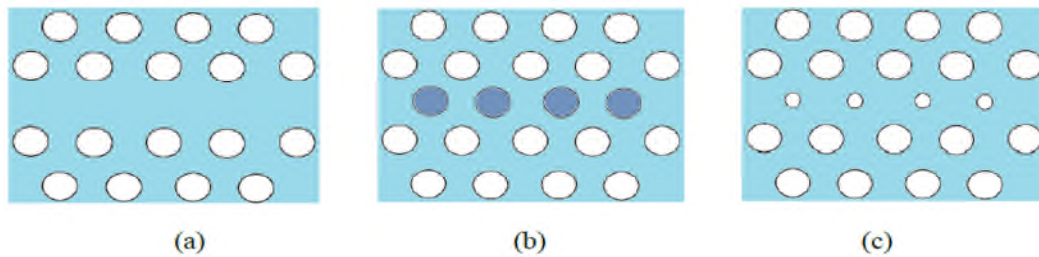


**Figure I.11:** Défaut ponctuel : (a) défaut lacunaire, (b) et (c) défaut de substitution.

#### I.5.2. Défauts linéaires :

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, comme le montre la figure I.12. 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.

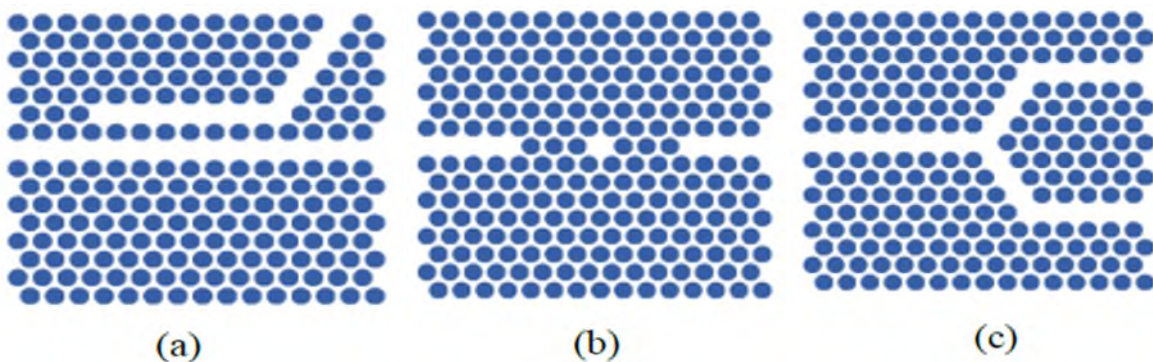


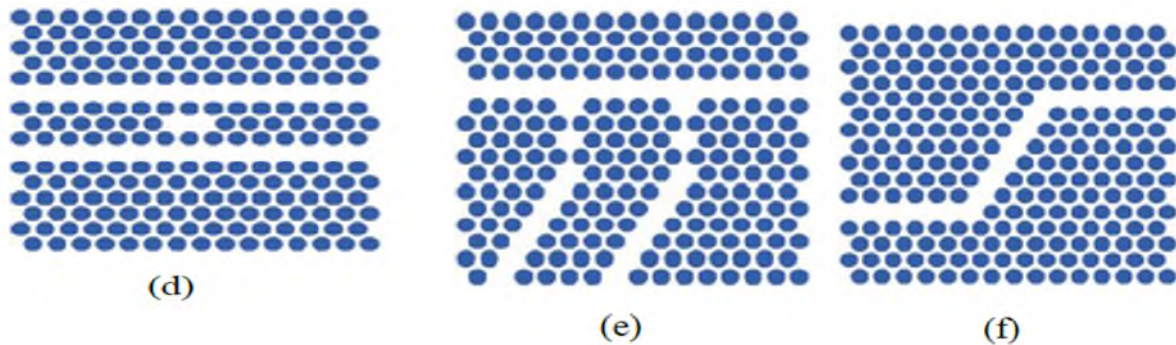


**Figure I.12 :** Exemples de défauts linéaires dans un cristal photonique 2D créés (a) en omettant une seule rangée de motifs, (b) en modifiant l'indice de réfraction d'une seule rangée de motifs, (c) en variant le rayon d'une seule rangée de motifs de la structure [9].

### I.6. Application des cristaux photonique :

Dans cette partie, nous allons décrire les différentes applications possibles des matériaux à bandes interdites photoniques. Nous nous limiterons au cas des cristaux photoniques bidimensionnels qui sont ceux qui offrent, pour l'instant plusieurs applications telles que les coupleurs directionnels [15], les capteurs et biocapteurs [16], les diviseurs de puissance [17], les filtres [18], les démultiplexeurs [19], les doubles virages [20]. Ces nouveaux dispositifs reproduisent les principes opérationnels des différents composants d'un circuit intégré, en utilisant les photons comme porteur de l'information à la place des électrons. Quelques exemples de ces dispositifs sont montrés sur la Figure 1.13.





**Figure I.13** : Quelques exemples de dispositifs à base de cristaux photoniques bidimensionnels : (a) coupleur directionnel, (b) biocapteur, (c) diviseur de puissance, (d) filtre, (e) démultiplexeur et (f) double virage [14].

### I.7. Techniques de modélisations :

On peut trouver dans la littérature plusieurs méthodes pour l'étude des cristaux photoniques [21] : méthode des ondes planes (PWE), méthode des différences finies dans les domaines temporelles (FDTD), méthode des matrices de transfert (MMT), méthode des matrices de diffraction (MMD). Parmi toutes ces méthodes, les plus répandues pour la modélisation des cristaux photoniques sont la méthode des ondes planes et la méthode FDTD.

#### I.7.1. Méthode des ondes planes (PWE) :

La méthode des ondes planes (Plane Wave Expansion ou PWE) est une technique numérique répandue pour résoudre des problèmes électromagnétiques périodiques. Cette technique est basée sur la décomposition des champs électromagnétiques en une superposition d'ondes planes [22]. Les équations de Maxwell sont représentées dans le domaine fréquentiel et transformées en un problème aux valeurs propre. Les champs électromagnétiques et les fréquences correspondant à chaque onde plane sont obtenues.

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 super-cellule) dans le cas de structures non périodiques comme les guides d'onde ou les cavités [14].

**I.7.2. Méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD) :**

C'est une méthode de résolution directe des équations de Maxwell dans le domaine temporel, elle utilise l'outil numérique des différences finies. Cette méthode permet non seulement de calculer les diagrammes de bandes mais aussi de simuler l'évolution temporelle du champ électromagnétique se propageant dans les structures à cristaux photoniques, ce qui permet d'avoir des informations sur de nombreuses autres grandeurs comme le vecteur de Poynting ou l'énergie électromagnétique stockée. Par contre, elle exige une résolution rigoureuse qui nécessite des moyens de calcul et des mémoires informatiques importants, ce qui oblige à réduire la taille de l'espace de travail [25].

**I.8. Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les concepts généraux sur les cristaux photoniques. Ces matériaux, dont la constante diélectrique varie périodiquement sur une ou plusieurs directions de l'espace. Nous avons commencé par la définition des cristaux photoniques, nous avons montré l'analogie entre l'équation de Schrödinger et l'équation de propagation des ondes électromagnétiques, après nous avons énuméré les différents types de cristaux photonique, en s'intéressant plus particulièrement aux cristaux bidimensionnels. Par la suite, nous avons cité quelques exemples d'applications des cristaux photoniques et les principaux défauts qui existent aux niveaux de ces cristaux. Enfin, nous avons présenté les techniques de modélisation les plus utilisées pour l'étude des cristaux photoniques.

**Référence du chapitre I:**

- [1] E. Yablonovitch, «Inhibited spontaneous emission on solid-state physics and electronics », Phys. Review. Letters., vol. 58, pp. 2059–2062, (1987).
- [2] S. John, «Strong localization of photons in certain disordered dielectric super lattices», Phys. Rev. Lett., vol. 58, pp. 2486–2489, (1987).
- [3] E. Yablonovitch, T. J. Gmitter et K.M. Leung, «Photonic band structure: The Face centered cubic case employing non-spherical atoms”, Physical Review Letters, Vol.67, n°17, pp. 2295- 2298, (1991).
- [4] D. Rani, « design and analysis of all optical logic gates based on 2-d photonic crystals», Masters of engineering in electronics and communication engineering roll no, pp. 8013-61006.
- [5] J.D. Joannopoulos, R. D. Meade, J. N. Winn, « Photonic Crystals- Molding the Flow of Light», Princeton University Press, Princeton, NJ, 2008.
- [5] J.D. Joannopoulos, R. D. Meade, J. N. Winn, Photonic Crystals- Molding the Flow of Light. Princeton University Press, Princeton, NJ, 2008.
- [6] F. BENAÏSSA, « Etude et Simulation des Ondes Electromagnétiques dans les guides d’Ondes à Cristaux Photoniques-Application aux Fibres Optiques », thèse de doctorat, université Abou-bekr belkaid\_tlmcen, 2013.
- [7] Graydon, Nature’s nanostructures color wings and stones, Opto Lser Europe», vol. 51, pp.31-36, (1998).
- [8] B. E. Little, S. T. Chu, H. A. Haus, J. Foresi, J. P. Laine, « Microring resonator channel dropping filters», Journal of Lightwave Technology, vol. 15, pp. 998–1005, (1997).
- [9] Cohen-Tannoudji 73 C. Cohen-Tannoudji, B. Diu, F. Laloë, « Mécanique quantique », Tome I, Hermann, Paris, (1973).
- [11] B. Lombardet, « Etude Et Réalisation De Cristaux Photoniques Pour L’optique intégrée », Thèse De Doctorat, École Polytechnique Fédérale De Lausann, 2005.
- [12] Abri Badaoui Hadjira, « Etude et conception des microcomposants a base des cristaux photoniques bidimensionnels », Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, décembre 2012.
- [13] R. Zengerle, « Light Propagation in Singly and Doubly Periodic Planar Waveguides, Journal of Modern Optics», vol. 34, pp. 1589-1617, (1987).

- [4] BENDJELLOUL Rahima, Etude et caractérisation de circuits photoniques à base de cristaux photoniques de micro piliers : Application aux filtres à base de résonateurs, Thés de Doctorat, Université de Constantine, juillet 2017.
- [15] 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.
- [16] Y. Zheng, S. Li, and J. Kang. « Two dimensional photonic crystal channel filter based on ring resonator», in *IEEE Conference on Photonics and Optoelectronics*, Wahun, China, pp. 1–3, (2009).
- [17] C. Manolatou, M. J. Khan, S. Fan, Pierre R. Villeneuve, H. A. Haus, J. D. Joannopoulos. «Coupling of Modes Analysis of Resonant Channel Add–Drop Filters. *IEEE Journal of Quantum Electronics*», vol. 35, pp. 1322–1331. (1999).
- [18] 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).
- [19] 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. (2015).
- [20] L. Wu, « M. Wang. 1x2 type photonic crystal power splitter with ring resonators *Optik*», vol. 126, pp. 3613–361.
- [21] C. Yu, H. Chang, «Applications of the finite difference mode solution method to photonic crystal structures. *Optical and Quantum Electronics* », Vol. 36, n° 1, pp. 145-163, 2004.
- [22] L. BOUKERZAZA, « Influence des paramètres physiques sur la bande interdite Photonique d’un cristal photonique bidimensionnel à réseau hexagonal », Thés de magister, Université de Constantine, 2008.
- [23] Y. Benachour, « Optimisation de cristaux photoniques pour l’optique non linéaire », Thèse de Magister, Université de Paris Sud, vol 11, 2008.



Filtres optiques  
à base de  
résonateurs en  
anneaux à  
cristaux  
photoniques

## II.1. Introduction

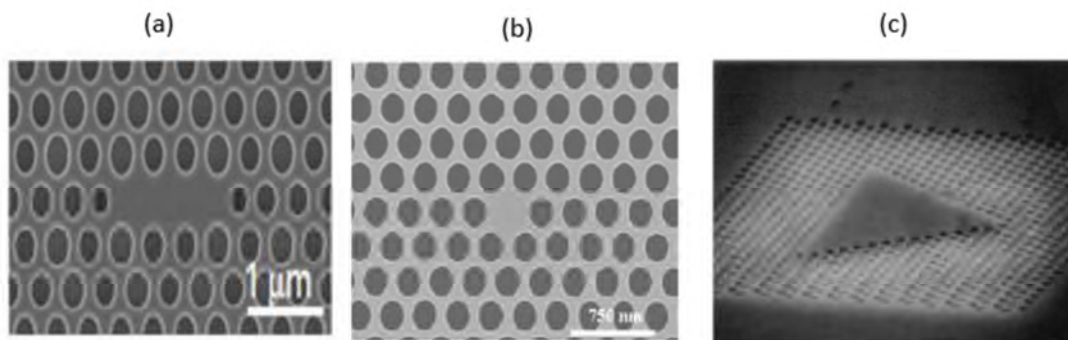
Le présent chapitre a pour objectif d'introduire les bases théoriques nécessaires à la compréhension du filtre Channel drop (CDFs) à base de résonateurs en anneaux à cristaux photoniques (PCRRs). Dans un premier temps nous allons décrire les PCRRs et présenter leurs propriétés générales. Nous parlerons ensuite du couplage entre le guide et le résonateur. Par la suite, nous détaillerons quelques travaux réalisés sur les CDFs à base de différentes formes de résonateurs.

## II.2. Filtrage dans les cristaux photoniques

Le filtrage est un mécanisme essentiel qui permet d'éliminer une fréquence ou une bande de fréquence, ou inversement, à favoriser une fréquence ou une bande de fréquences. Dans le cas des filtres à base de CPs, la conception est basée sur le couplage entre des défauts linéaires (guide d'onde) et des défauts ponctuels (cavités).

### II.2.1. Filtre à base de cavité résonante :

Dans un cristal photonique, la cavité résonante peut être créée en omettant un ou plusieurs motifs du cristal photonique. Il est aussi possible de modifier le rayon des motifs, ou encore de déplacer certains motifs d'une ou de plusieurs rangées. Les cavités dans les cristaux photoniques, qui ont habituellement de très hauts facteurs de qualité, ont l'avantage d'être très compactes et ne peuvent supporter que peu de modes. Cet effet trouve de nombreuses applications dans les systèmes de communication optique [1].

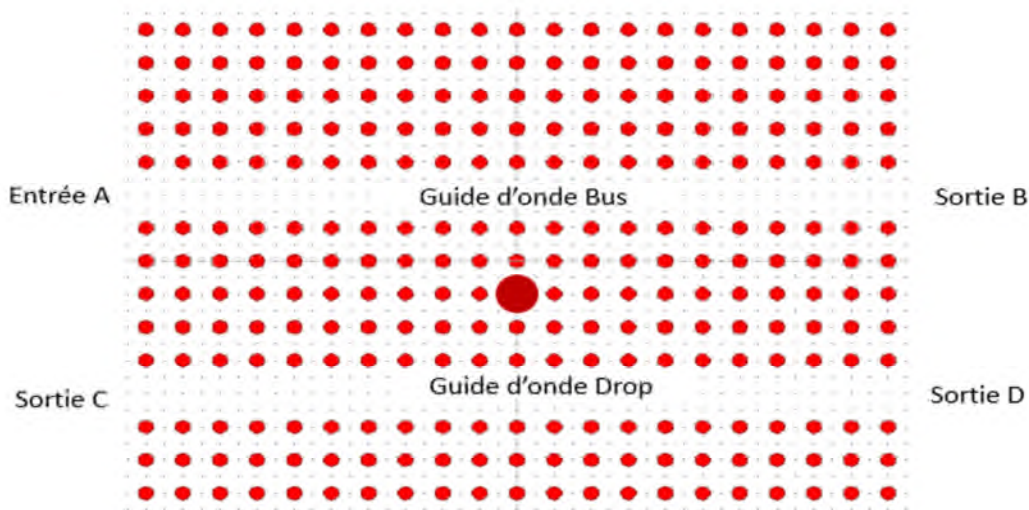


**Figure II.1** : Exemples de cavités : (a) cavité linéique, (b) Cavité hexagonale, (c) Cavité triangulaire.



IL existe plusieurs types de cavités : elles dépendent de la forme du réseau ; triangulaire ou carré, ou du nombre de défauts ; omission d'une ou plusieurs tiges où de la variation du rayon ou de l'indice du défaut. Parmi ces cavités nous citons les cavités hexagonales, linéiques, Carrées et triangulaires. Quelques exemples sont présentés sur la figure II.1.

La première proposition théorique d'un filtre à extraction à base de cavités résonantes a été donnée par Fan et al. [2]. Leur filtre consiste en un système à quatre ports constitué d'une seule cavité résonante placée entre deux guides d'onde parallèles (figure II.2). Il apparaît qu'un transfert maximal du signal d'entrée du guide bus au guide drop est possible par l'intermédiaire d'une cavité créée par la modification du rayon d'un seul motif dans la structure photonique.



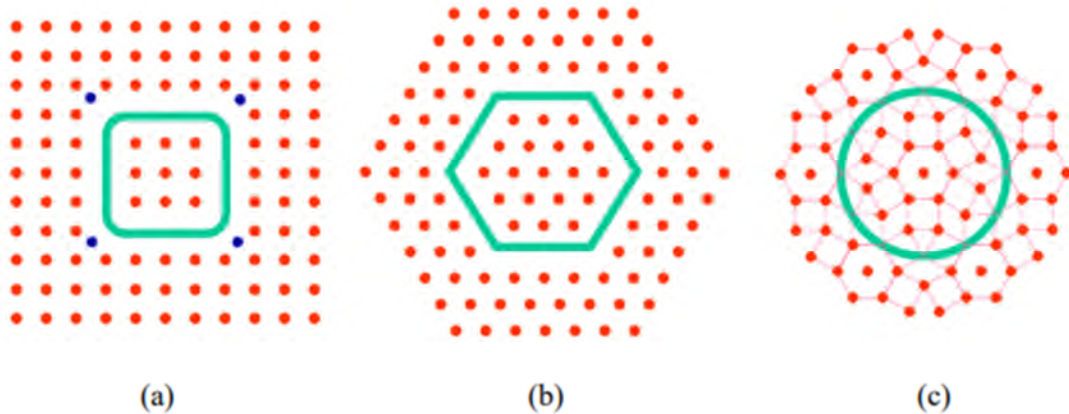
**Figure II.2 :** Filtre channel drop à base de cavité résonante.

## II .2.2. Filtre à base de résonateur en anneau à cristaux photoniques

Le concept du PCRR a été introduit pour la première fois par Kim et al. [28], dans lequel ils ont proposés et démontrés un laser à cristal photonique bidimensionnel (CP-2D) basé sur un résonateur en anneau hexagonal. Plus tard, Kumar et al. [3] ont étudié les caractéristiques spectrales d'un résonateur en anneau de forme rectangulaire couplé à des guides d'ondes dans un CP-2D de réseau carrée, et ont discuté les effets des dimensions de l'anneau et des paramètres de la structure sur les propriétés de résonance du résonateur.

### II.2.2.1 Résonateurs en anneaux à cristaux photoniques :

Les résonateurs en anneaux permettent un confinement important de la lumière dans un petit volume. Ces structures offrent une sélectivité spectrale élevée, un large intervalle spectral libre (ISL, l'écart entre deux longueurs d'ondes résonantes consécutives ou Free Spectral Range, FSR). Elles sont réalisées en omettant quelques motifs (trous ou tiges) du cristal photonique afin d'avoir une forme en anneau. La figure II.3 montre quelques exemples du PCRR.



**Figure II.3** : Résonateurs en anneaux à cristaux photoniques (photonic crystals 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 [6].

### II.2.2.2. Caractéristiques des Résonateurs en anneaux

Lorsque nous parlerons des résonateurs en anneaux, nous mentionnons souvent plusieurs grandeurs qui décrivent des propriétés spécifiques de ces derniers. Dans cette partie, nous allons définir deux caractéristiques importantes des résonateurs : le facteur de qualité  $Q$  et la finesse  $F$ .

#### II.2.2.2.1. Facteur de qualité ( $Q$ ) :

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  $\tau$  à l'intérieur du résonateur et peut être défini en fonction de celle-ci par la relation [4] :

$$Q = \omega_r \tau \quad (2.1)$$

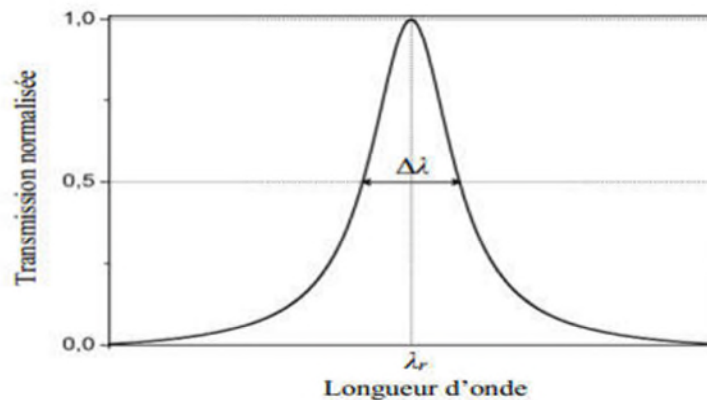
avec  $\omega_r$ : Pulsation.

On peut définir également le facteur de qualité  $Q$  comme étant le rapport entre la longueur d'onde de résonance  $\lambda_r$  et de sa largeur à mi-hauteur  $\Delta\lambda$  (full width at half 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 II.4.

Elle s'exprime comme suit [4] :

$$Q = \frac{\lambda_r}{\Delta\lambda} \quad (2.2)$$



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

#### II.2.2.2.2 Finesse

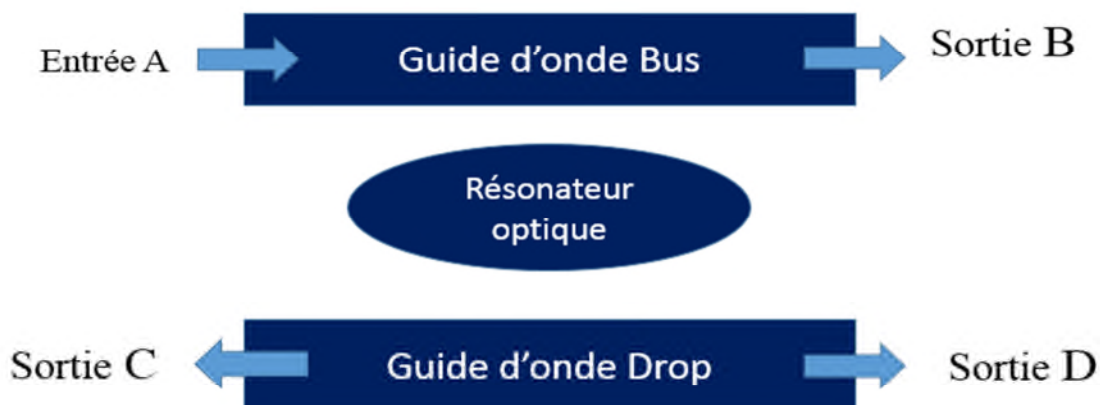
En plus du facteur de qualité, une autre mesure communément utilisée est la finesse ( $F$ ) du résonateur. Elle est définie comme le rapport entre l'intervalle spectral libre (**ISL**, la distance entre deux pics) et la largeur à mi-hauteur ( $\Delta\lambda$ ) d'une résonance :

$$F = \frac{ISL}{\Delta\lambda} \quad (2.3)$$

La finesse est d'autant plus grande que les pics sont étroits. Une finesse élevée est un atout important pour ce type de résonateurs, ce qui fait d'eux de bons candidats pour les applications de filtrage.

### II.2.2.2.3. Couplage entre guide d'onde et résonateur à CPs :

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 [5]. 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. La structure schématique du filtre à extraction à base de résonateur en anneaux est illustrée sur la Figure II.5.



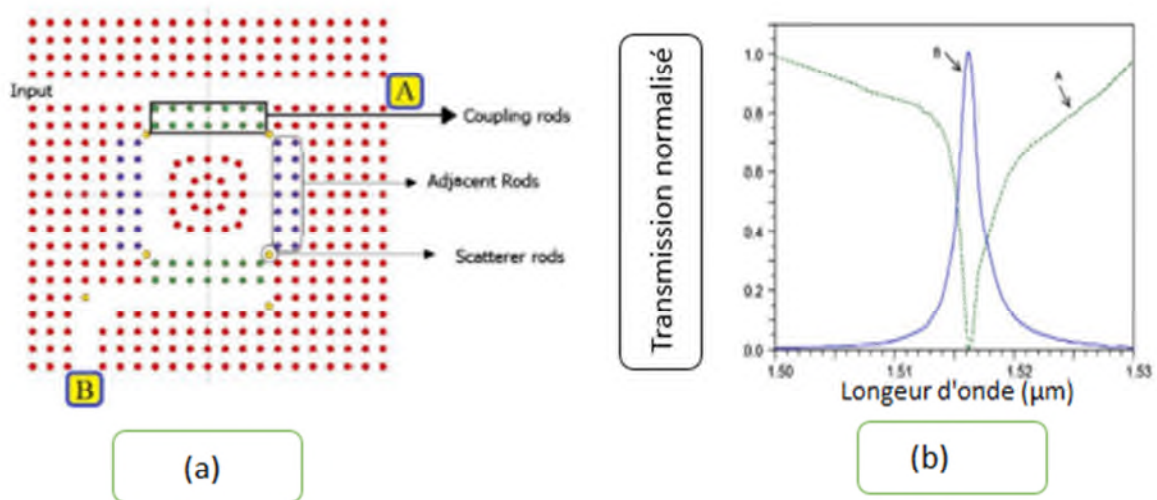
**Figure II.5 :** Représentation schématique d'un filtre channel drop.

### II.3. Travaux réalisés sur les CDFs :

Plusieurs groupes de recherche ont étudié les différents types de filtres channels drop, à base de cristaux photoniques bidimensionnels afin d'améliorer leurs caractéristiques de transmission. Dans la suite, nous allons citer quelques-uns :

#### II.3.1. Filtre channel drop à base de PCRR quasi-circulaire :

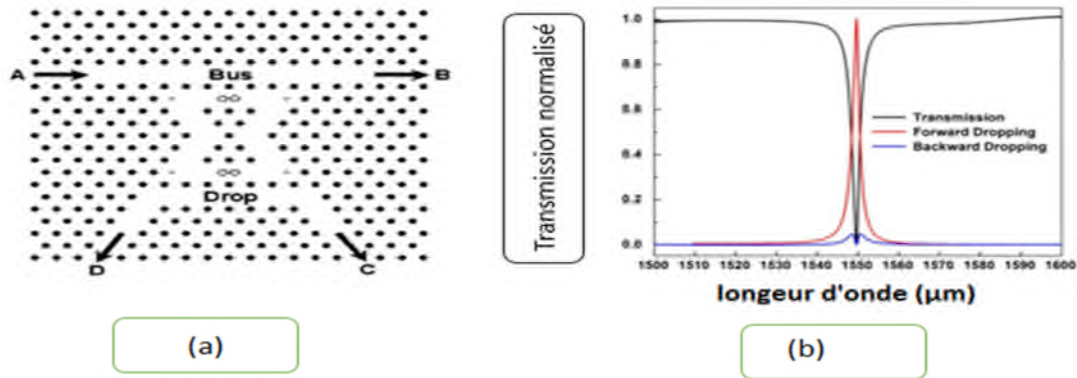
Les auteurs de la référence [6] ont proposé un filtre à extraction à trois ports à base d'un résonateur en anneau de forme quasi-circulaire. Ce dernier a été créé dans un réseau carré de piliers diélectriques de section circulaire, en déplaçant quelques motifs du cristal vers le centre du résonateur, comme il est représenté sur la figure II.6. Afin d'améliorer les performances de leurs filtres, les auteurs ont fait varier le rayon des tiges de couplage et les tiges adjacentes. Le résultat de leur simulation indique une efficacité d'extraction proche de 100 % avec un facteur de qualité de 842.



**Figure II.6:** (a) Structure schématique du CDF à base du PCRR en forme quasi-circulaire et (b) son spectre de transmission [6].

### II.3.2. Filtre channel drop à base de PCRR de forme X :

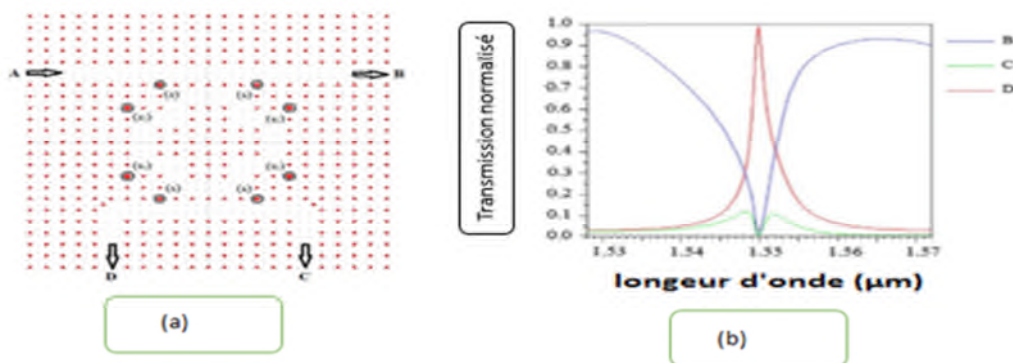
Dans la référence [7], le filtre à extraction est constitué par deux guide d'onde et un seul PCRR en forme de X pris en sandwich entre eux, comme le montre la Figure II.7. La technique d'optimisation utilisée dans cette étude consiste à introduire deux motifs dans les parties supérieure et inférieure du résonateur. Le résultat de leur simulation indique un facteur de qualité de plus de 1000 atteint à la longueur d'onde de fonctionnement de 1.55 μm, avec une efficacité d'extraction de 100 %.



**Figure II.7 :** (a) Structure schématique du CDF à base du PCRR en forme de X et (b) son spectre de transmission [7].

### II.3.3. Filtre channel drop à base de PCRR de forme plus :

En 2016, les auteurs de la référence [8] ont proposé un nouveau CDF à base de CPs bidimensionnels. La structure proposée consiste en un PCRR en forme de plus, positionné entre deux guides d'ondes avec une distance de couplage égale à une seule ligne de tiges, comme le montre la Figure II.8.b. Cette structure a été simulée en utilisant la méthode des différences finies dans le domaine temporel. Les résultats de simulation montrent que, jusqu'à 100 % d'efficacité d'extraction avec un facteur de qualité de 1011 sont réalisables à la longueur d'onde  $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ . comme le montre la Figure II.8.a.



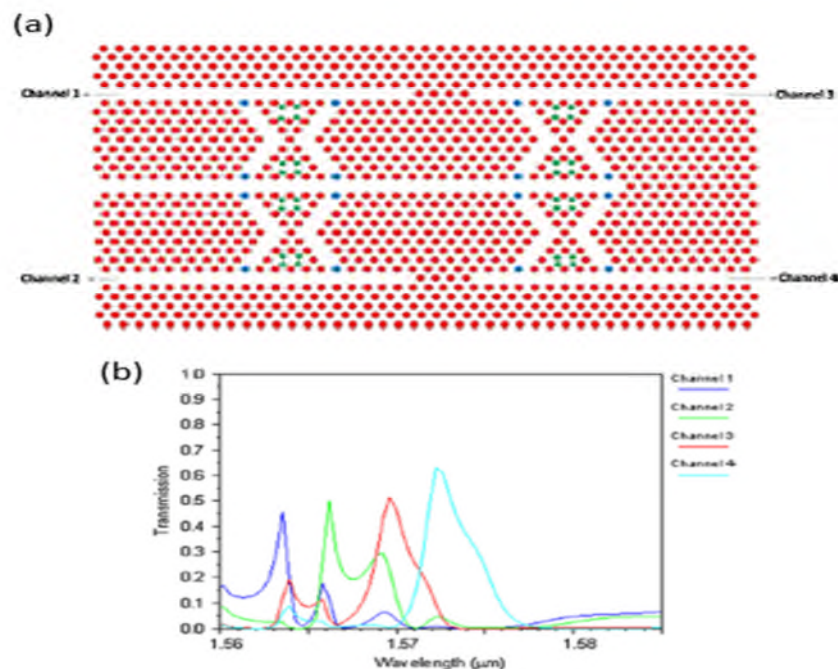
**Figure II.8 :** (a) Structure schématique du CDF à base du PCRR en forme de plus et (b) son spectre de transmission [8].

#### II.4. Application des filtres à base de résonateurs en anneaux

L'étude des filtres à extraction se fondant sur la résonance optique est un domaine de recherche d'actualité. Récemment, des CDFs à base de cristaux photonique bidimensionnels ont été validés. Le principe de "Channel drop filter" joue un rôle très important dans l'intégration des circuits photoniques, il est largement employé dans les systèmes des communications optiques.

##### II.4.1. Démultiplexeur à base de PCRRs :

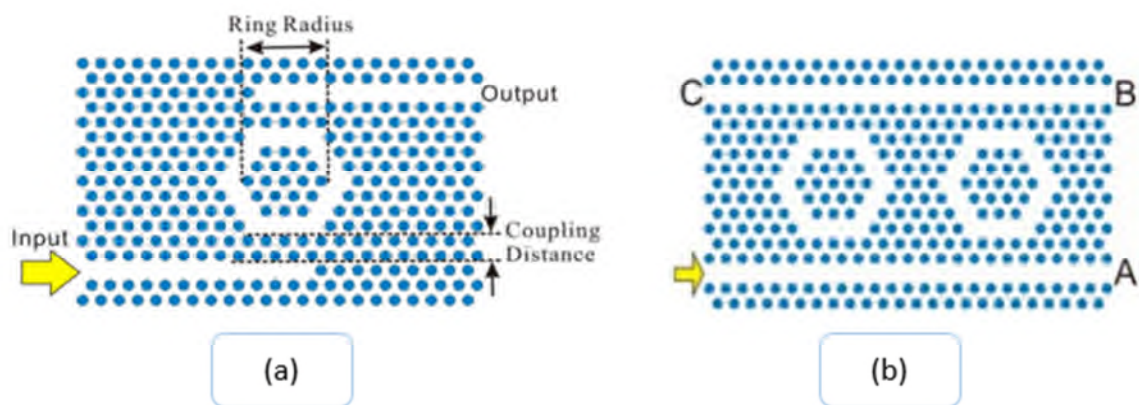
La structure du démultiplexeur à quatre ports proposée dans la référence [9] comporte : un guide d'onde horizontal situé au milieu de la structure, quatre guides d'onde de sortie et quatre résonateurs en anneau en forme de X, où chaque résonateur est placé entre le guide d'entrée et chaque guide de sortie (figure II.9). La sélection des quatre longueurs d'onde à la sortie de chaque canal se fait en introduisant quatre tiges de rayons différents à l'entrée et à la sortie de chaque résonateur. Les résultats de la simulation ont montré que cette structure possède de bonnes performances et ont révélé une puissance transmise entre 45 et 63 %. La valeur inférieure et supérieure de la diaphonie entre les canaux de sortie dans la structure est d'environ -7.5 et -23.7 dB, respectivement.



**Figure II.9 :** (a) Structure schématique du démultiplexeur proposé et (b) son spectre de transmission [13]

### II.4.2. Capteur :

La première proposition d'un capteur chimique à base d'un filtre à extraction a été faite par Hsiao et al. [10]. Sa structure schématique est représentée sur la figure II.10.a. La structure du capteur est créée dans une membrane de Silicium dans un cristal photonique bidimensionnel. Ce capteur permet la détection de biomolécules en se basant sur la variation du rayon du résonateur et de la distance de couplage. En 2011, les mêmes auteurs ont proposé une nouvelle architecture capable de détecter deux types de molécules d'ADN [11], comme le montre la figure II.10.b. L'avantage de cette structure était de pouvoir mesurer en même temps un nombre varié de biomolécules sur les mêmes ports d'entrée par l'utilisation de trous de détection appropriés.



**Figure II.10 :** Capteurs biochimiques à base de : a) résonateur en anneau [10] et b) résonateur en anneau en cascade [11].

### II.5. Conclusion

Dans ce deuxième chapitre nous avons présenté les concepts de base liés aux filtres à extraction à base de résonateurs en anneaux à cristaux photoniques. Pour ce faire, Nous avons présenté les principales caractéristiques des résonateurs en anneaux, ensuite, nous avons cité quelques travaux réalisés sur les CDFs. Enfin, nous avons présenté quelques applications des filtres à extraction à base de résonateurs en anneaux.



**Référence du chapitre 2:**

- [1] A. Chutinanet, S. Noda, «Effects of Structural Fluctuations on the Photonic Bandgap During Fabrication of a Photonic Crystal: A Study of a Photonic Crystal with a Finite Number of Periods», *J. Opt. Soc. Am. B*, vol.16, n°9, pp. 1398–1402 (septembre 1999).
- [2] S. Fan, P. R. Villeneuve, and J. D. Joannopoulos, « Theoretical investigation of fabrication-related disorder on the properties of photonic crystals», *J. Appl. Phys.* Vol.78, (1995).
- [3] V.D. Kumar, T. Srinivas, A. Selvarajan, « Investigation of ring resonators in photonic crystal circuits», *Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications*, vol. 2, pp. 199–206, (2004).
- [4] L. Ghisa, « Couplage de micro résonateurs. Applications aux fonctions optiques de traitement du signal », Thèse de Doctorat, Université de Rennes I, Rennes, (2008).
- [5] 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).
- [6] M. Reza Rakhshani, M. Mansouri-Birjandi, « Realization of tunable optical filter by photonic crystal ring resonators», *Optik*, vol.124, pp.5377-5380, (2013).
- [7] M. Yousef Mahmoud, G. Bassou, F. de Fornel, A. Taalbi, « Channel drop filter for CWDM systems, optics communication», vol.306, pp.197-148, (2013).
- [8] R. Bendjelloul, T.a Bouchemat, M. Bouchemat, «An optical channel drop filter based on 2D photonic Crystal ring resonators», *journal of electromagnetic waves and applications*, pp.1569-3937,2016).
- [9] M.Y. Mahmoud, G. Bassou, A. Taalbi, Z.M. Chekroun, « Optical channel drop filter based on photonic crystal ring resonators», *Opt. Commun*, vol. 285, pp. 368–372, (2012)
- [10] F. L. Hsiao, C. Lee, « Computational study of photonic crystals nano-ring resonator for biochemical sensing», *IEEE Sensors Journal*, vol.10, p. 1185 - 1191, (2010).
- [11] M. Plihal, A. A. Maradudin, «Photonic Band-Structure of 2-Dimensional Systems – the Triangular Lattice», *Phys. Rev. B*, vol. 44, pp. 8565–8571, (1991).

[12]F. L. Hsiao, C. Lee, « Nano photonic biosensors using hexagonal nano ring resonators: computational study», Journal of Micro-Nanolithography MEMS and MOEMS, vol.10, n°1, pp. 013001, (2011)

[13] H. alipour-banae, F. Mehdizadeh, S. Seraj mohammadi, « a nouval 4-channel demultiplexer based on photonic crystal ring resonatrors», optic, vol.124, pp.5964-5967,(2013).

# **Résultats et interprétations**

### III 1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous nous sommes inspirés des travaux de la référence [1], afin de concevoir un filtre à extraction à base d'un résonateur en anneau à cristal photonique bidimensionnel. Ce filtre est conçu dans le but d'extraire la longueur d'onde  $1.55 \mu\text{m}$  en utilisant le simulateur Fullwave basé sur la méthode 2D-FDTD. Afin d'améliorer les caractéristiques de notre filtre, Une partie de ce chapitre sera consacrée à l'analyse de l'effet de la variation de quelques paramètres structurels sur les caractéristiques du filtre.

### III.2. Présentation de l'outil de simulation :

Les logiciels que nous allons exploiter pour modéliser les structures à bandes interdites photoniques sont nommés BandSOLVE et Fullwave développés par Rsoft Design. La fenêtre du programme Rsoft CAD, qui est le programme de base de RSoft, comporte une barre de menus située en haut de la fenêtre, une barre d'outils qui comporte plusieurs icônes, et la barre d'état, comme le montre la figure III.1.

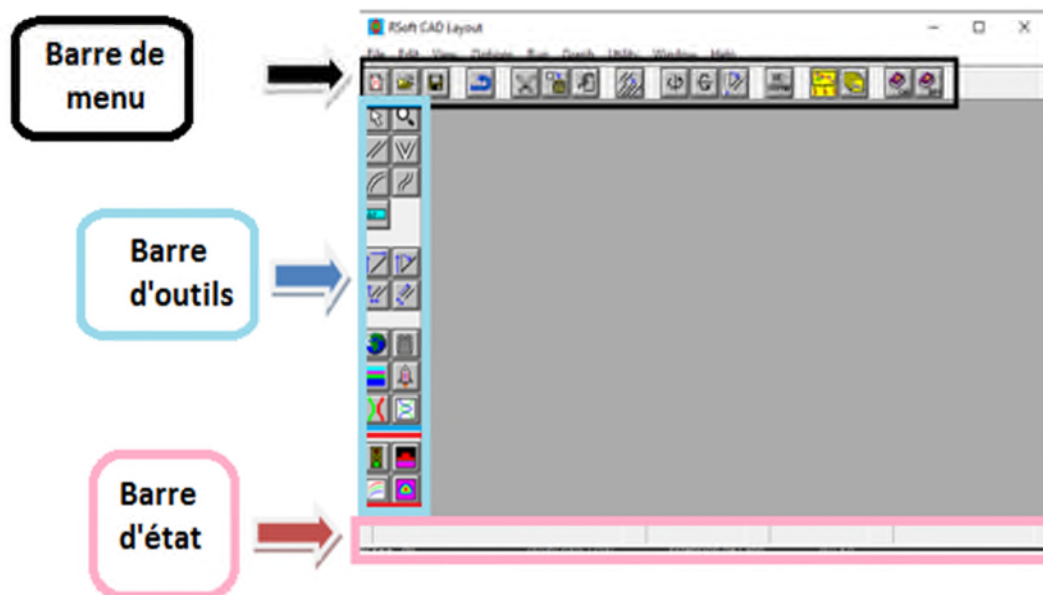
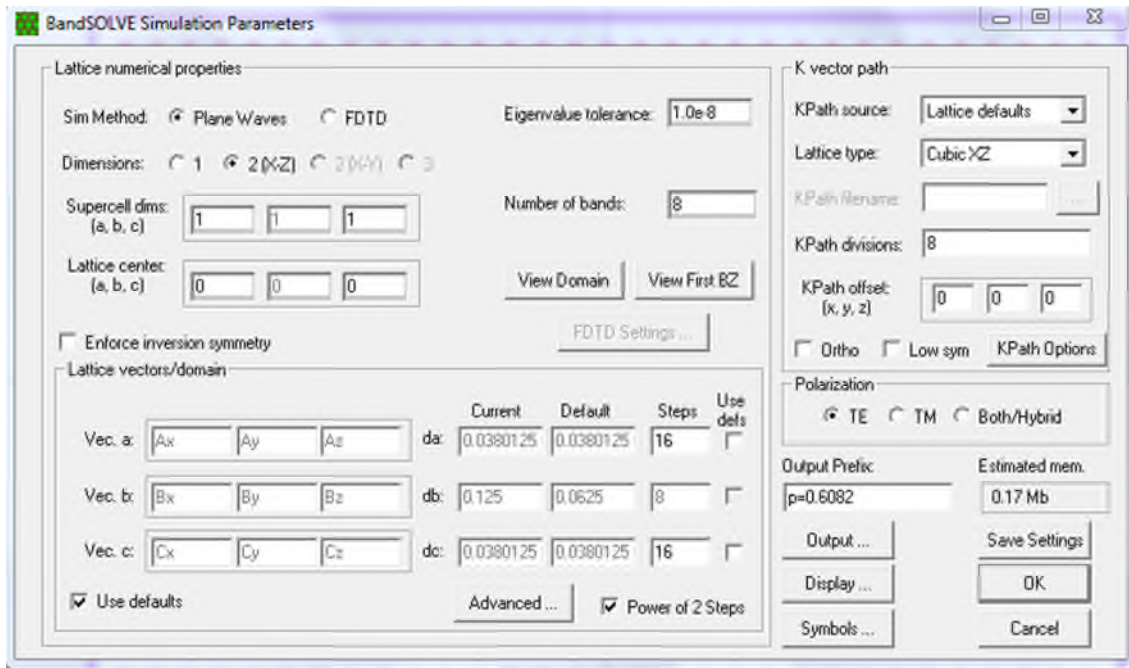


Figure III.1 : fenêtre du programme RSoft CAD.

### III.2.1. Simulateur « BandSOLVE » :

BandSOLVE est un module de simulation pour la génération et l'analyse des structures à bandes interdites photoniques que nous utiliserons pour décrire les propriétés générales de nos cristaux photoniques 2D. Ce module de simulation utilise la méthode des ondes planes (PWE) pour calculer les bandes interdites des structures périodiques. La figure III.2 représente la fenêtre principale des paramètres de simulation de BandSOLVE.



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

### III.2.2. Simulateur « FullWAVE » :

Le moteur de simulation FullWAVE est une partie de Rsoft photonique, Il est basé sur la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD). Il calcule le champ électromagnétique en fonction du temps et de l'espace dans une structure d'indice donné en réponse à une excitation électromagnétique donnée. Le FullWAVE est idéal pour étudier la propagation de la lumière dans une grande variété de structures photoniques. La figure III.3 représente la Fenêtre principale des paramètres de simulation de FullWAVE.

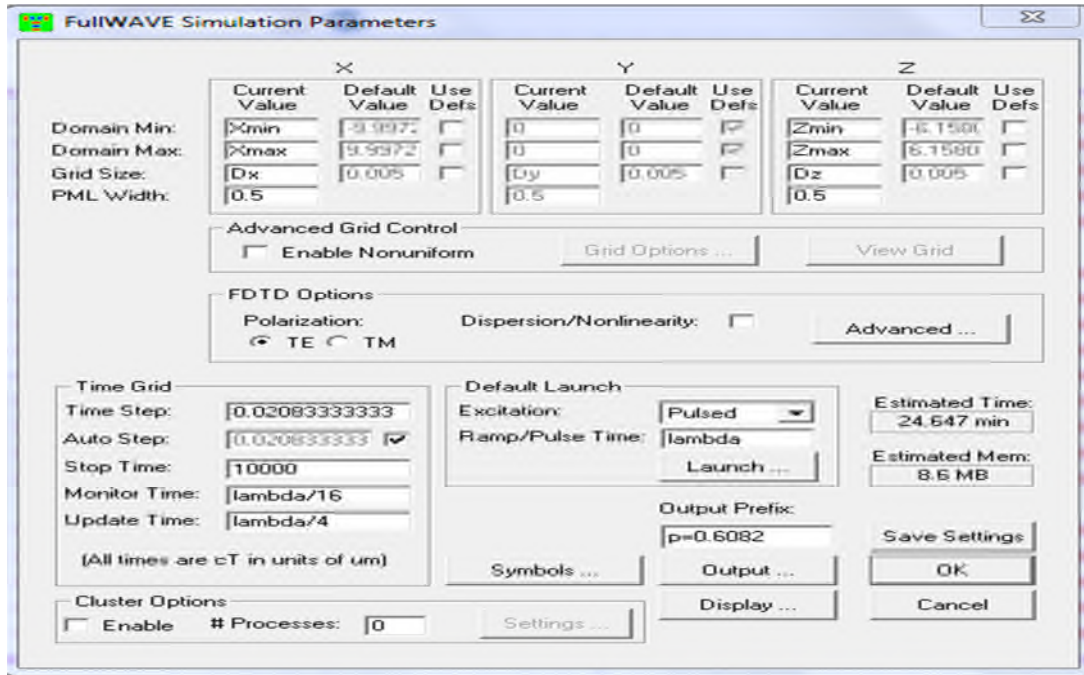


Figure III.3 : Fenêtre principale des paramètres de simulation de FullWAVE.

### III.3. Structure proposée :

Dans notre étude nous optons pour un cristal photonique bidimensionnel formé par des piliers en Silicium (Si) réparties selon un réseau carré de période  $a=0.6082\mu\text{m}$  ( $a$  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 égal à  $r=0.11\mu\text{m}$  et leur indice de réfraction est  $n = 3.56$ .

Le nombre de tiges qui compose notre structure de base est de 31 tiges suivant l'axe x et de 21 suivant l'axe z. Le schéma de la structure est reporté sur la figure III.4.

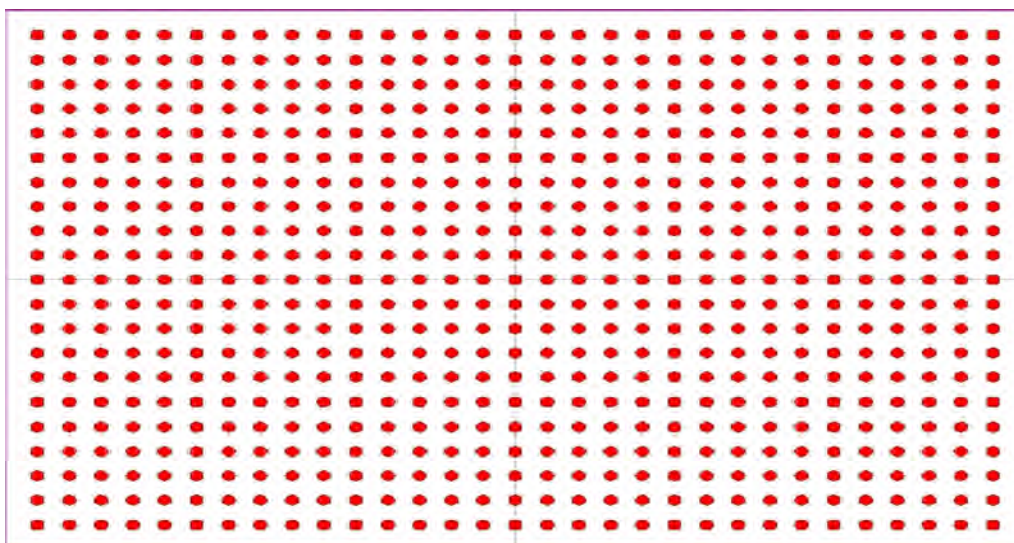
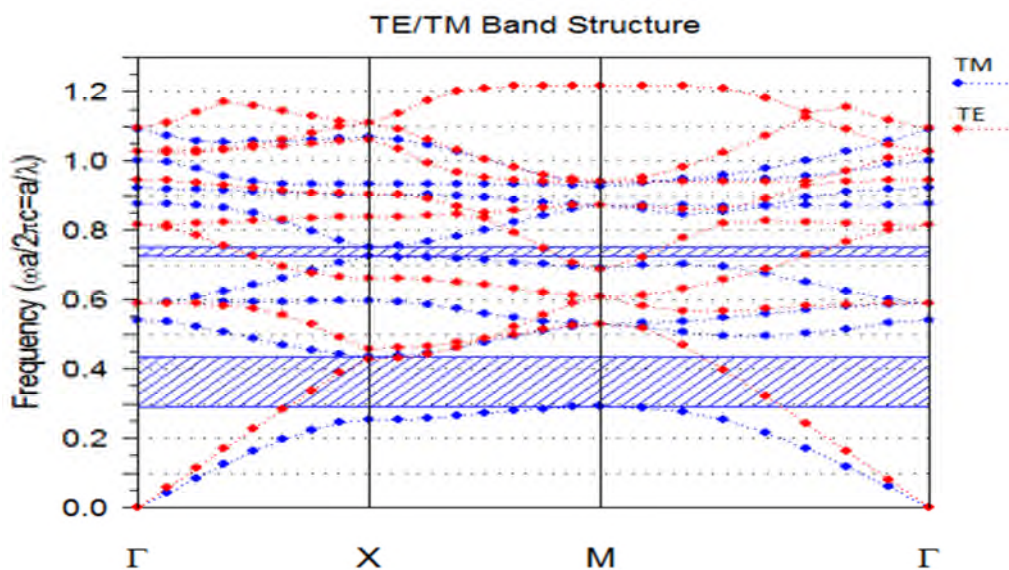


Figure III.4 : Structure sans défauts

Un cristal photonique est généralement caractérisé par son diagramme de bandes. Pour le calculer, nous avons utilisé la méthode PWE dans le but d'extraire la bande interdite photonique. Le résultat est illustré sur la figure III.4. D'après cette figure, la structure présente une bande interdite photonique pour la polarisation TM mais aucune bande interdite n'apparaît pour la polarisation TE. La bande interdite TM s'ouvre pour des fréquences normalisées entre  $0.29 \leq \frac{a}{\lambda} \leq 0.43$  correspondant aux longueurs d'onde  $1.41\mu\text{m} \leq \lambda \leq 2.09\mu\text{m}$ . Une onde électromagnétique incidente dans le plan perpendiculaire au réseau des tiges sera donc réfléchiée si sa fréquence est comprise dans l'intervalle spectral précédent.



**Figure III.5 :** Diagramme de bandes d'un CP-2D constitué par un réseau carré de pas  $a=0.6082\mu\text{m}$  de piliers d'indice de réfraction  $n = 3.56$  plongés dans l'air.

### III.4. Filtre à base de résonateur en anneau à cristal photonique

#### III.4.1. Structure non optimisée :

Dans ce travail, nous allons étudier un filtre à base de résonateur en anneau. La figure III.5 représente la représentation schématique de ce filtre. Il est constitué par deux guides d'onde entre lesquels a été disposée un résonateur en anneau en forme carrée. Les deux guides d'onde sont créés par l'omission d'une rangée de tiges du cristal photonique dans la direction horizontale. Le guide d'onde supérieur est appelé guide d'onde bus et le guide inférieure est appelé guide d'onde drop. La forme carrée du PCRR est créée en omettant 20 tiges du CP. Les tiges situées à l'intérieur du PCRR sont appelées tiges intérieures ( $R_i$ ), tandis que les tiges

de couplage ( $R_c$ ) sont celles placées entre le PCRR et les guides d'ondes. La distance qui sépare le résonateur et chaque guide d'onde est désignée par la distance de couplage ( $D_c$ ), elle est d'une seule rangée de piliers. Le port d'entrée et les ports de sortie sont marqués respectivement par A, B, C et D.

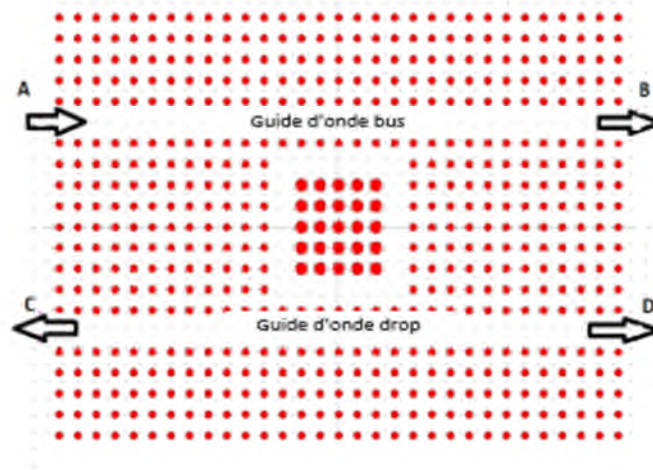


Figure III.6 : Représentation schématique du filtre proposé

Afin d'ajuster la longueur d'onde de sortie du filtre aux alentours de  $\lambda = 1.55 \mu m$ , nous avons varié le rayon des tiges internes ( $R_i$ ) dans l'intervalle  $[0.181-0.184]\mu m$ . Le tableau suivant indique le changement obtenu :

Rayon des tiges intérieures $R_i$ ( $\mu m$ )	Longueur d'onde $\lambda$ ( $\mu m$ )
0.181	1.548
0.182	1.555
0.183	1.5586
0.184	1.5623

Tableau III.1 : Modification de la longueur d'onde en fonction du rayon des tiges internes.

D'après ce tableau, on remarque que lorsqu'on augmente le rayon des tiges à l'intérieure du résonateur, la longueur d'onde se déplace vers les grandes longueurs d'onde. La longueur d'onde  $\lambda=1.555 \mu m$  est obtenue pour  $R_i= 0.182 \mu m$ .



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).

La figure III.7 montre le résultat obtenu. Selon cette figure, Nous constatons l'existence d'un mode de propagation à la longueur d'onde  $\lambda=1.555 \mu\text{m}$ . Il est caractérisé par un faible taux de transmission de seulement de 25 % et un facteur de qualité  $Q = 34.55$ . Ce résultat pourrait être attribué aux pertes par courbure des coins du résonateur. De plus, avec ce type de filtre, nous souhaitons extraire la longueur d'onde  $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ , très utilisée dans les systèmes de télécommunications optiques.

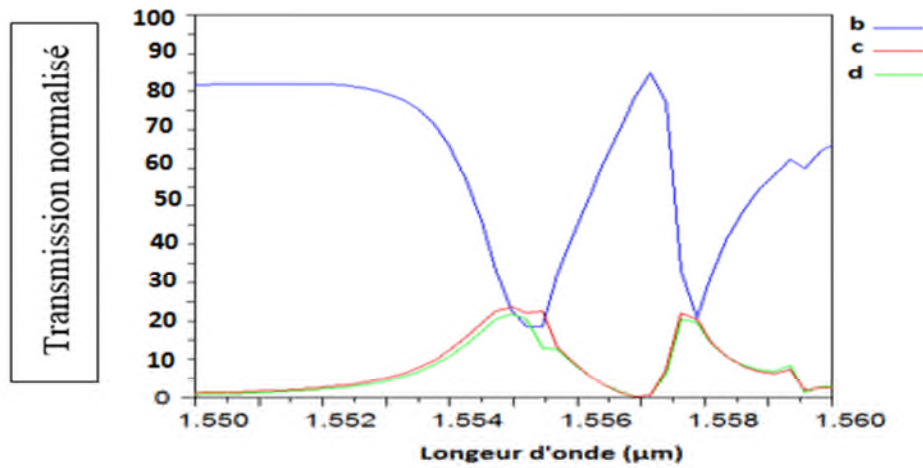


Figure III.7 : La réponse spectrale du filtre optique.

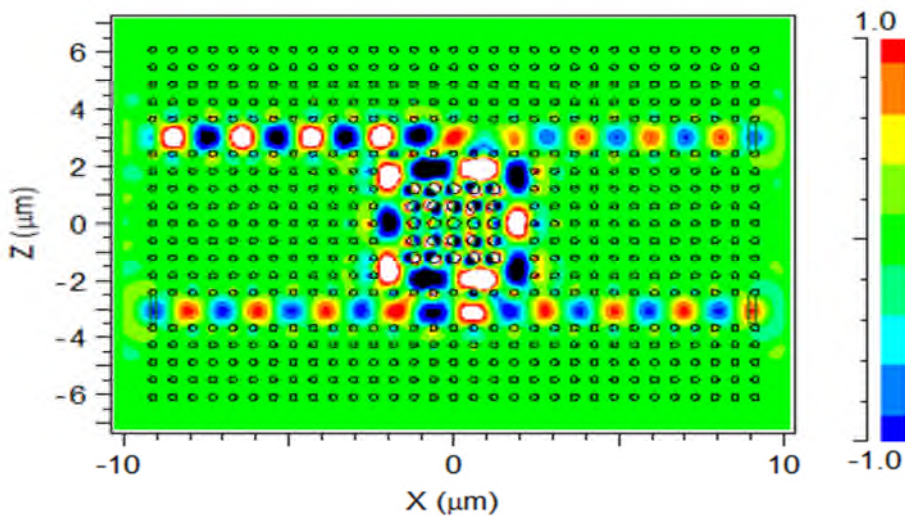


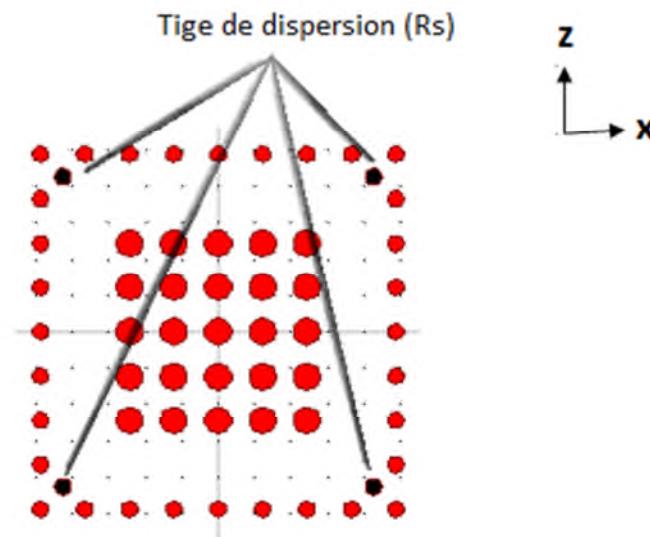
Figure III.8 : Répartition du champ dans le CDF en polarisation *TM* à la longueur d'onde 1.555 ( $\mu\text{m}$ ).

### III.4.2. Structure optimisée :

Afin d'améliorer les caractéristiques du filtre optique proposé à la longueur d'onde désirée ( $\lambda=1.55\mu\text{m}$ ), nous considérons quatre cas de structures modifiées :

#### III.4.2.1. Premiers Cas : insertion des tiges de dispersion

Afin d'améliorer l'efficacité d'extraction et la sélectivité spectrale, quatre tiges appelées tiges de dispersion (Rs) sont placées dans les quatre coins du résonateur. L'introduction des tiges localisées élimine les modes de contre-propagation dus aux coins tranchants du résonateur. En choisissant soigneusement leurs paramètres (le rayon et la position) on peut améliorer les caractéristiques du CDF.



**Figure III.9 :** insertion des tiges de dispersion Rs dans le résonateur

Afin de déterminer les paramètres optimaux des tiges de dispersion, nous allons suivre la procédure suivante : Nous allons d'abord optimiser la position de ces tiges dans chaque coin du résonateur, ensuite, la transmission sera améliorée en optimisant le rayon de chaque tige. La position optimale de celle-ci est obtenue, en la déplaçant suivant l'axe X et Z à partir de chaque coin et en mesurant la transmission obtenue. Quatre tiges de rayon  $R_s=R$  ont été initialement placées dans le résonateur pour scanner les positions pour lesquelles la transmission sera maximale. Une transmission maximale de 95.45% avec un facteur  $Q$  égal à 1192.23 est obtenue à la position  $P_2$ , comme le montre la figure III.10. Un récapitulatif des positions des tiges de dispersion est donné dans le tableau III.2.

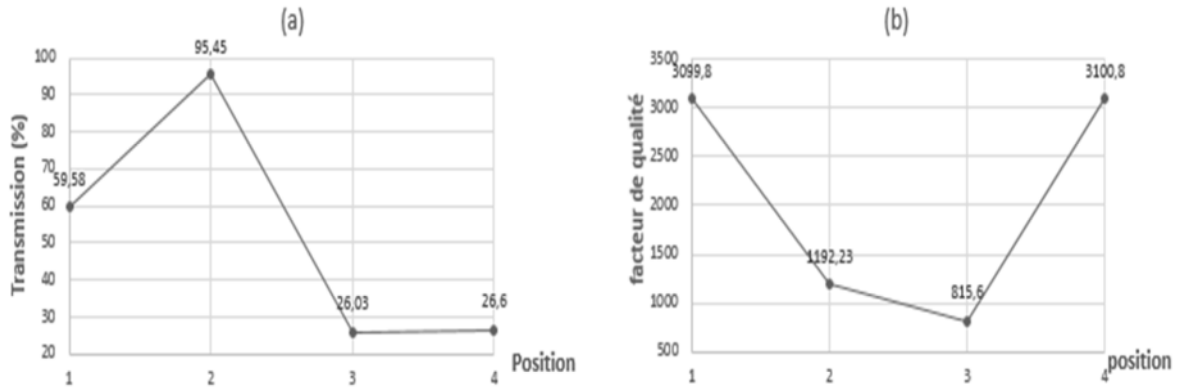


Figure III.10 : (a) Transmission et (b) facteur de qualité du CDF en fonction de la position des tiges de dispersion.

Paramètre	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>
	Position			
$X/a$	0.25	0.5	0.75	1
$Z/a$	0.25	0.5	0.75	1

Tableau III.2 : Récapitulatif des positions des tiges de dispersion.

La deuxième étape est l'optimisation des rayons de ces tiges après les avoir placées aux positions obtenues précédemment (la position P<sub>2</sub>). On procède de la manière suivante : On fixe chaque tige à la position P<sub>2</sub>, ensuite, on modifie le rayon de chaque tige en observant la variation de la transmission. Sur la figure III.11, on reporte la transmission en fonction du rayon des tiges de dispersion placées à la position P<sub>2</sub>. On relève un taux de transmission maximal de 95.45%, et un facteur de qualité égale à 1192.23. Il est obtenu pour le rayon  $R_s=R = 0.11\mu m$ .

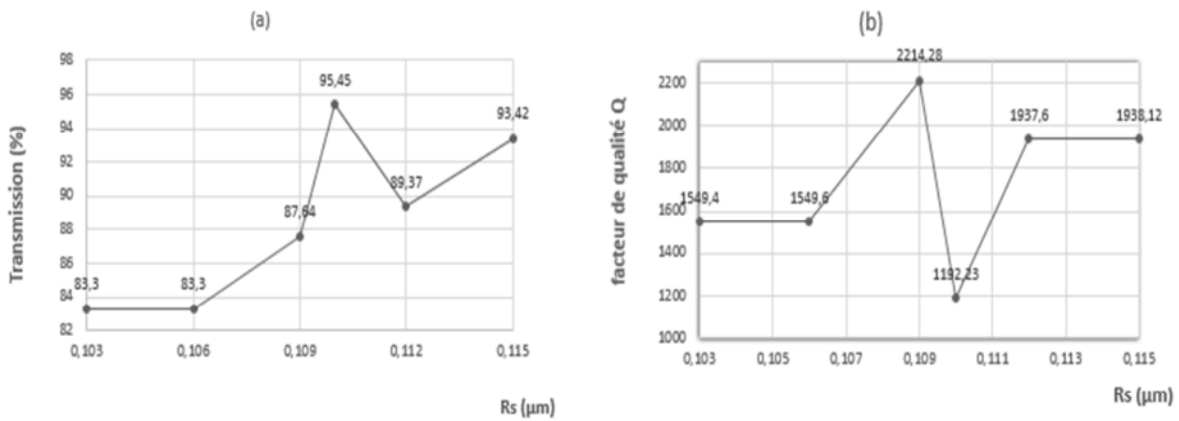


Figure III.11: (a) Transmission et (b) facteur de qualité du CDF en fonction du rayon ( $R_s$ ).

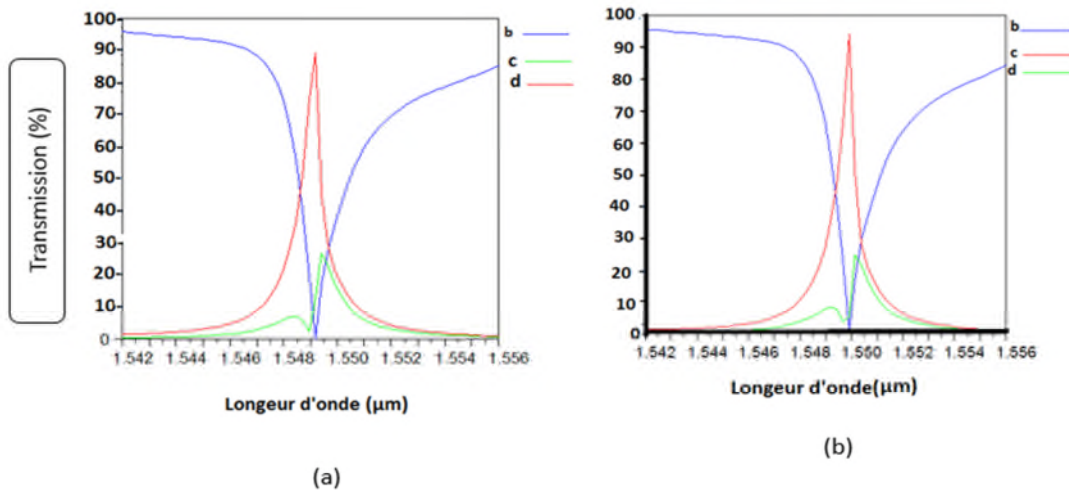


Figure III.12 : Spectres de transmission du CDF pour (a)  $R_s=0.109 \mu\text{m}$  et (b)  $R_s= 0.11\mu\text{m}$ .

### III.4.2.2. Deuxième cas : Modification des tiges de couplage

Dans cette partie, nous allons modifier les rayons des tiges de couplage ( $R_c$ ) situées entre les guides d'onde et le résonateur. Pour ce faire, nous avons simulé en variant le rayon dans l'intervalle  $[0.103-0.115] \mu\text{m}$ . sur la figure III.13.a, nous pouvons noter qu'une efficacité d'extraction maximale de 95.45 % est observée pour  $R_c=0.110 \mu\text{m}$ . Le facteur de qualité, quant à lui, est représenté sur la figure III.13.b. Le facteur Q maximum que nous avons calculé  $Q = 3876.75$  apparaît à  $R_c = 0.115 \mu\text{m}$  avec une faible transmission 84.46 %.

Donc, on pourrait choisir l'efficacité d'extraction de 95.45 % et le facteur Q de 1192.43 du mode résonant situé à  $\lambda = 1.55\mu\text{m}$  obtenu pour le rayon  $R_c = 0.110 \mu\text{m}$  comme résultat optimal en raison de son facteur Q et sa transmission relativement élevés.

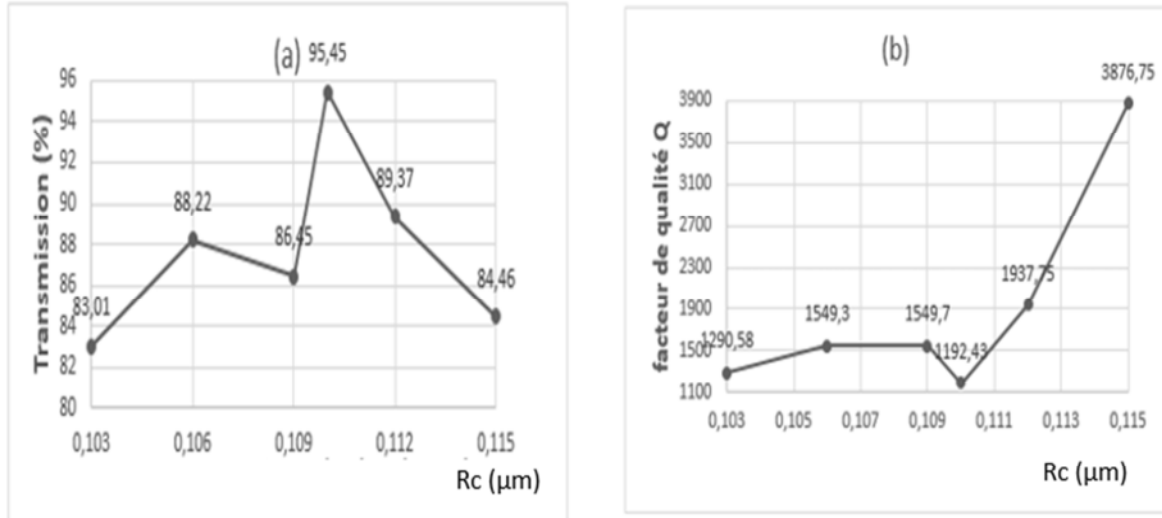


Figure III.13 : (a) transmission et (b)facteur de qualité du CDF en fonction de  $R_c$

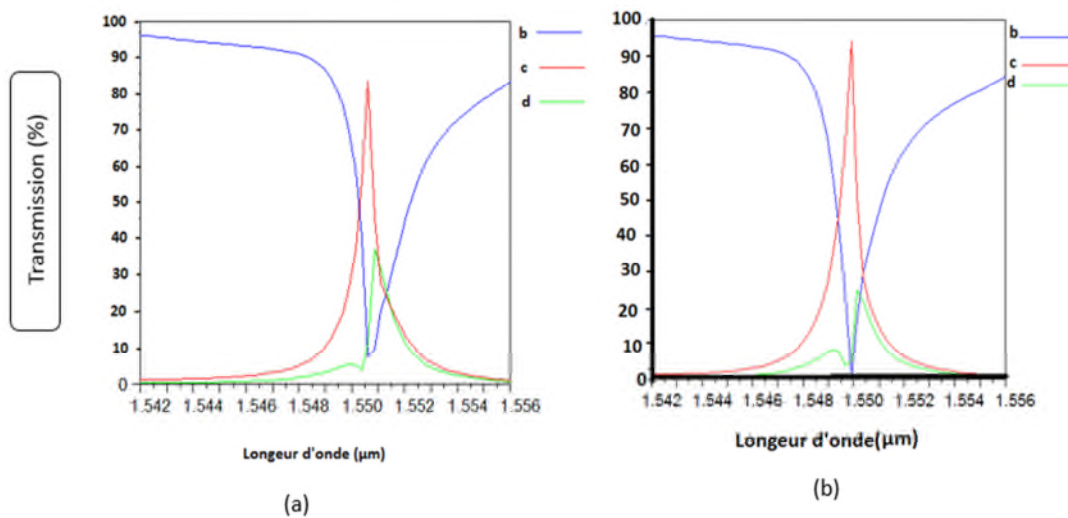


Figure III.14 : Spectres de transmission du CDF pour (a)  $R_c=0.115 \mu\text{m}$  et (b)  $R_c= 0.11\mu\text{m}$ .

### III.4.2.3. Troisième cas : modification des tiges adjacentes

Dans ce paragraphe, nous allons étudier l'effet de la modification du rayon des tiges adjacentes ( $R_a$ ) dans l'intervalle  $[0.103-0.115] \mu\text{m}$ . La figure III.15 présente le résultat d'une simulation évaluant le taux de transmission et le facteur de qualité pour différentes valeurs du rayon  $R_a$ . A partir de ce résultat, la valeur du rayon retenue est  $R_a = 0.110\mu\text{m}$ .

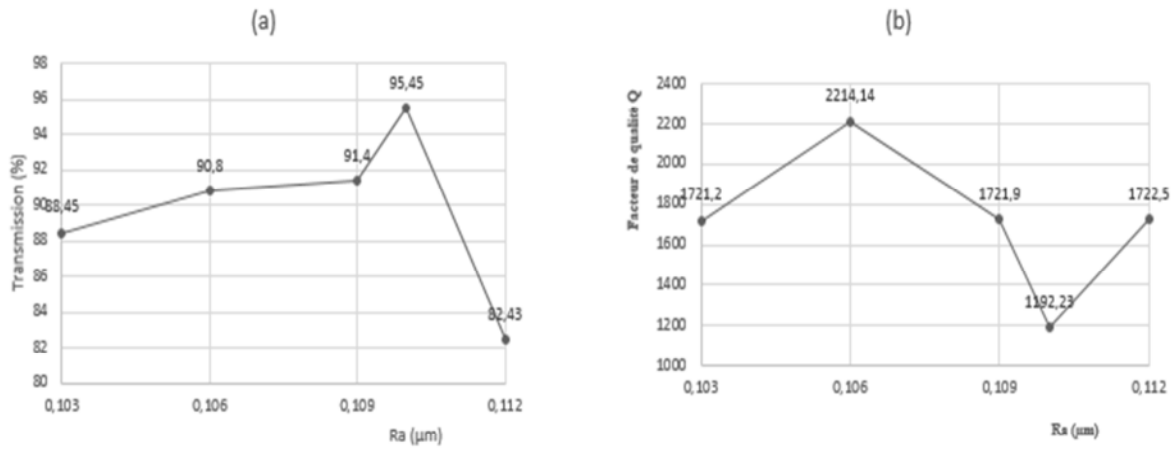


Figure III.15 : (a) transmission et (b) facteur de qualité du CDF en fonction de Ra

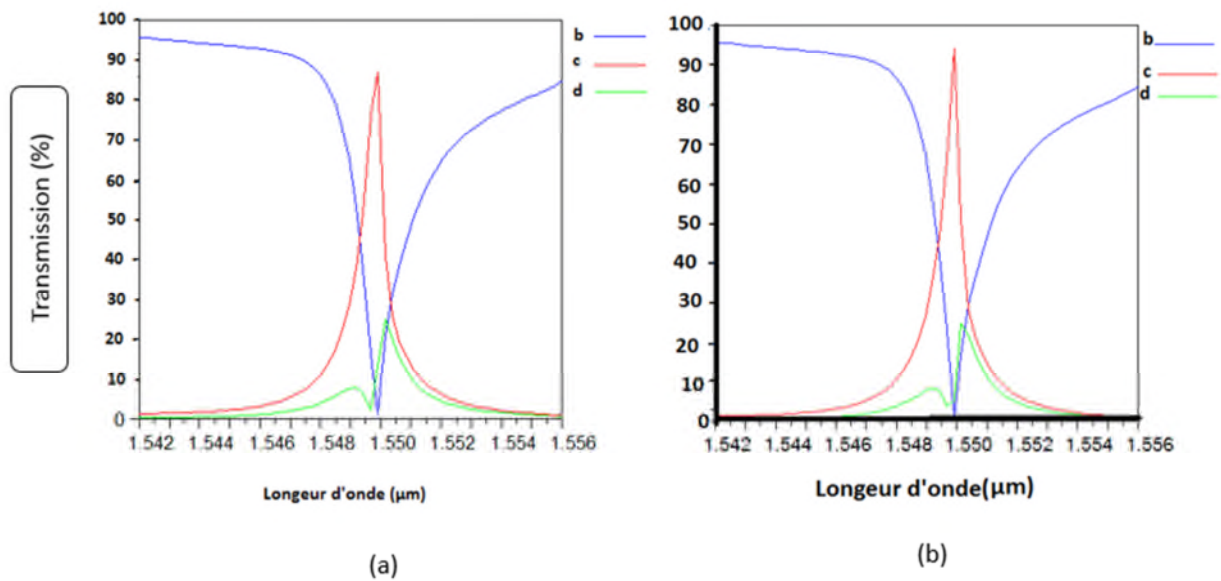


Figure III.16. Spectres de transmission du CDF pour (a) Ra=0.106 μm et (b) Rc= 0.11 μm.

III.4.2.4. Quatrième cas : Influence de la distance de couplage

En couplant un guide d’onde à un résonateur en anneau de facteur de qualité Q, la valeur de ce dernier est alors réduite par les pertes dues au couplage entre le guide et le résonateur. La diminution du facteur Q est principalement dû au faible confinement dans les sections de couplage entre les deux guides d’onde et le PCRR. Afin d’acquérir un facteur de qualité Q du filtre le plus élevé possible, la distance de couplage (Dc) entre les guides et le résonateur doit être ajustée de façon à réaliser un bon confinement dans les sections de couplage. Les figures

III.17, III.18 et III.19 montrent les résultats de simulation obtenus en fonction de la variation de la distance de couplage.

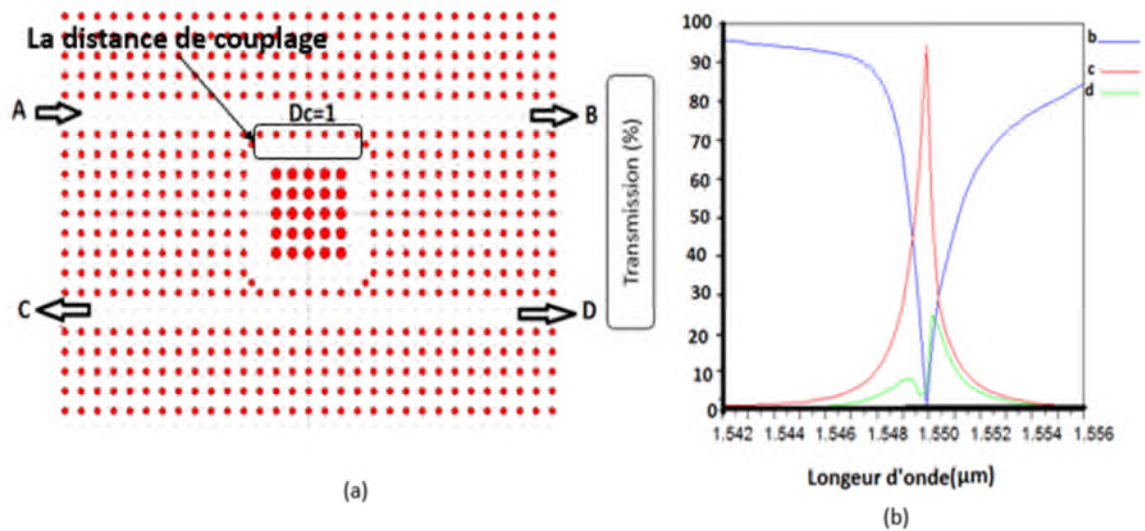


Figure III.17 : (a) Schéma du CDF pour  $D_c = 1$  et (b) son spectre de transmission

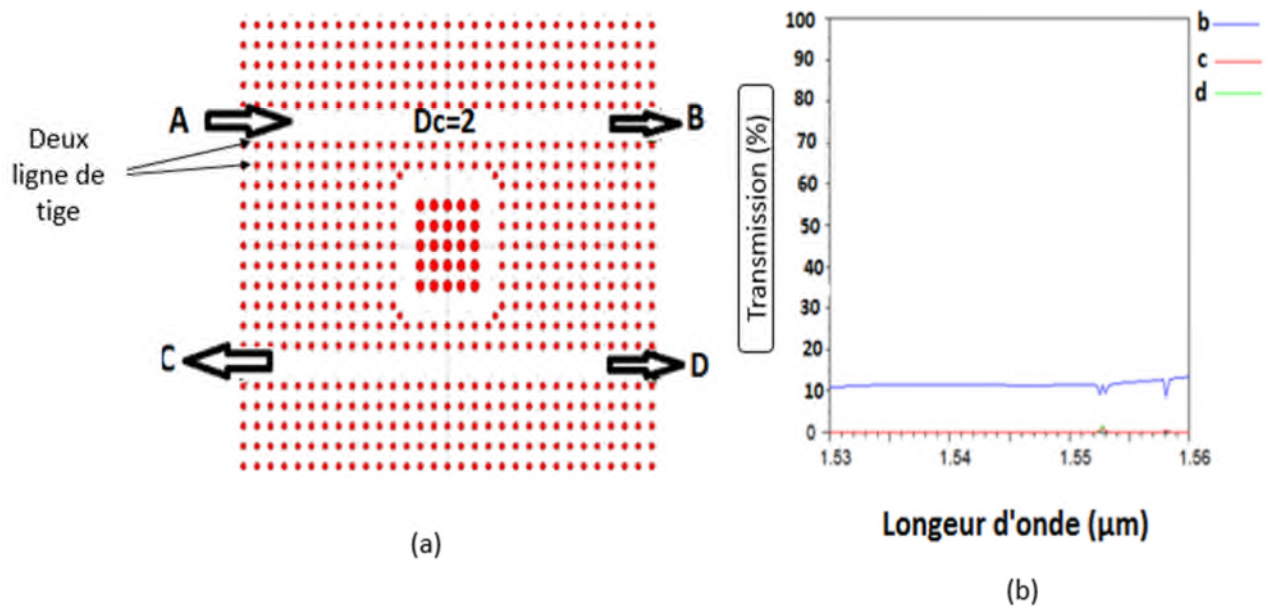
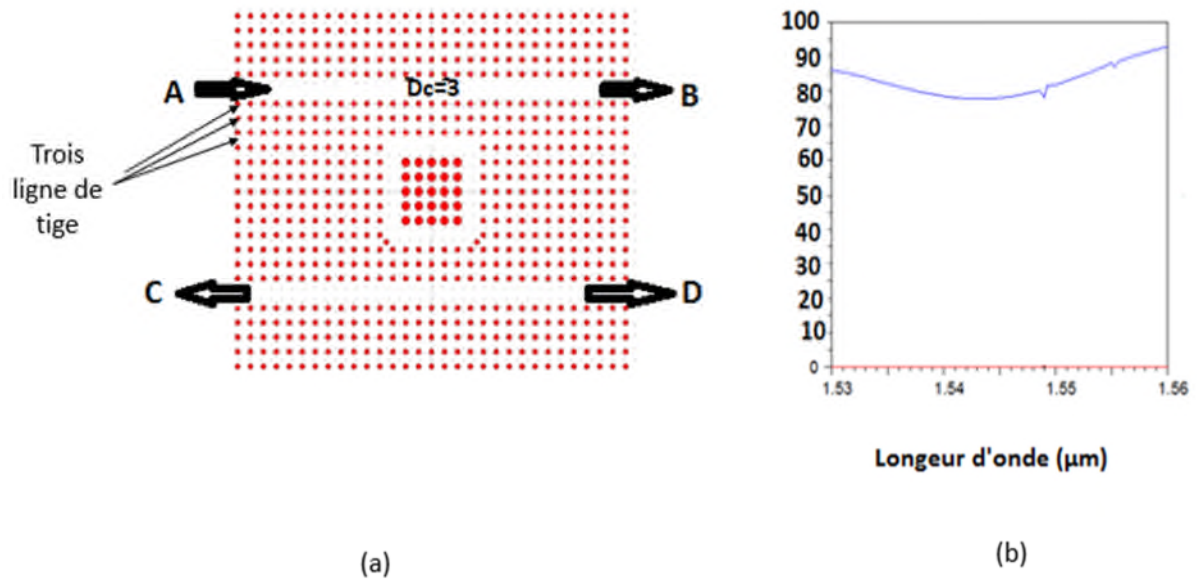


Figure III.18 : (a) Schéma du CDF pour  $D_c = 2$  et (b) son spectre de transmission.



**Figure III.19:** (a) Schéma du CDF pour  $D_c = 1a$  et (b) son spectre de transmission

Les résultats obtenus précédemment nous permettent de déterminer précisément la distance de couplage optimale : pour  $D_c = 1$ , la puissance extraite atteint son maximum (95.45%) au mode résonant  $\lambda = 1.55 \mu m$  avec un facteur de qualité de 1192.43.

### III.5. Structure finale :

En se basant sur les résultats précédents, nous avons conçu la structure finale de notre filtre à extraction, qui est illustrée sur la figure III.20. Elle est composée de deux guides d'onde couplés par l'intermédiaire d'un résonateur en anneau à cristal photonique de forme carrée. Le rayon des tiges intérieures est  $R_i=0.182\mu m$ , et le rayon des tiges de dispersion est égal à  $R_s = R=0.110 \mu m$ . La distance de couplage est égale à une seule rangée de tiges.



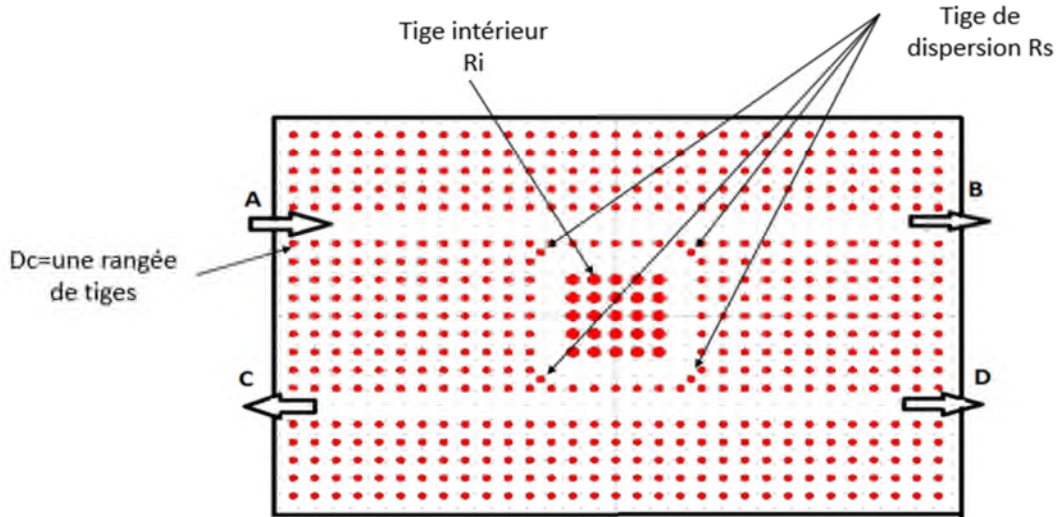


Figure III.20 : Structure optimisée du filtre

Les spectres de transmission à la sorties des ports B, C et D de la structure optimisée du CDF calculés à partir des simulations 2D-FDTD sont illustrés sur la figure III.21. 95.45 % de la lumière du guide d’onde bus est effectivement transférée dans le guide d’onde drop au mode résonant situé à  $\lambda = 1.55 \mu m$ , avec un facteur de qualité  $Q$  égal à 1192.23.

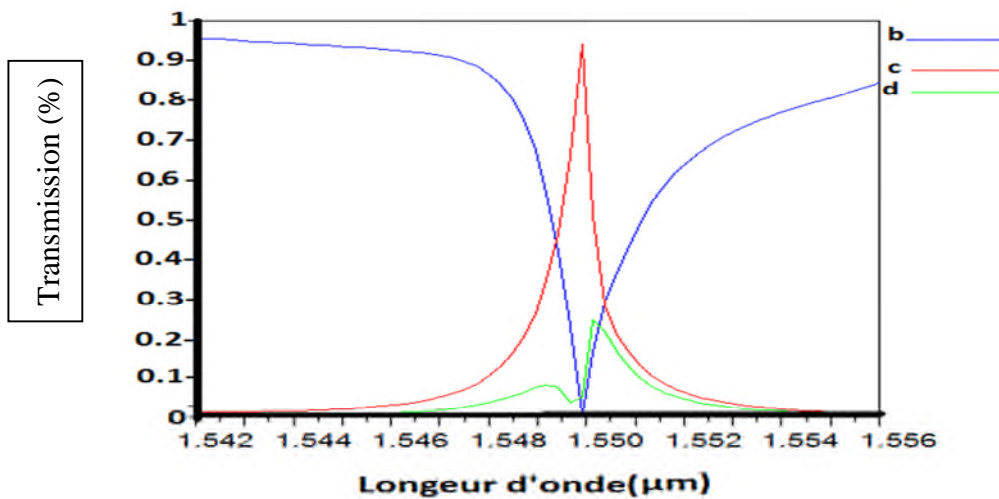
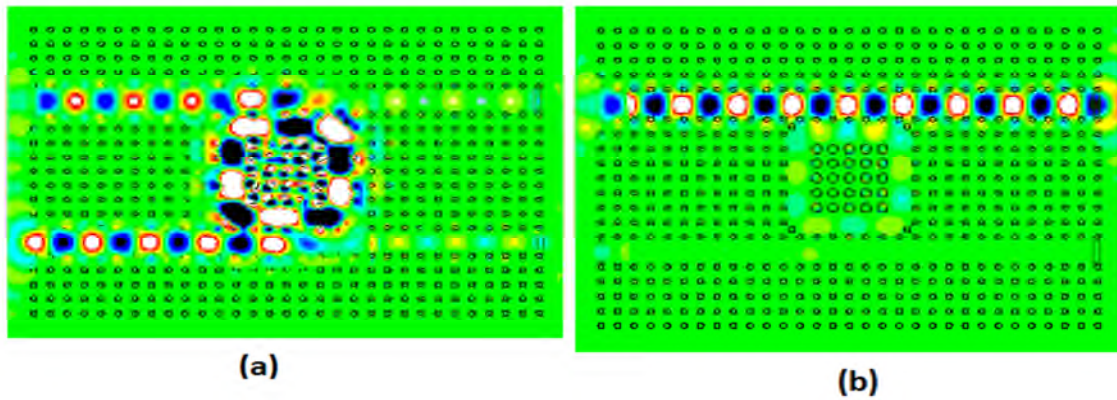


Figure III.21 : Réponse spectrale du CDF optimisé.

Afin de démontrer la performance du CDF, la distribution du champ en polarisation TM dans le composant, pour deux longueurs d’onde  $\lambda = 1.55 \mu m$ , à la résonance, et à  $\lambda = 1.544 \mu m$ , hors résonance, est donnée dans la figure III.22. A la résonance, la lumière extraite du guide d’onde bus est transmise, par l’intermédiaire du résonateur, dans le guide d’onde drop.

Hors résonance, le signal ne se couple pas au résonateur et continue de se propager dans le guide bus.



**Figure III.22** : Répartition du champ dans le CDF en polarisation *TM* aux longueurs d’onde :  
 (a)  $1.55 \mu m$  (à la résonance) et (b)  $1.544 \mu m$  (hors résonance).

### III.6. Paramètres affectant les caractéristiques du filtre

En plus de l’importance d’obtenir une efficacité d’extraction élevée et un bon facteur de qualité, l’accordabilité est également grandement souhaitée dans la conception des CDFs. L’accordabilité de la longueur d’onde résonnante du filtre proposé est possible en modifiant différents paramètres tels que le pas du réseau, et le rayon des tiges de la structure.

Le premier paramètre que nous avons étudié est la variation de la constante du réseau de la structure. Le tableau III.3 résume le résultat obtenu pour différentes valeurs de la constante du réseau. D’après le tableau, la longueur d’onde de sortie de la structure se déplace vers des longueurs d’onde plus élevées avec l’augmentation de la constante du réseau.

Période ( $\mu m$ )	$\lambda(\mu m)$	Efficacité d’extraction (%)	Q
0.600	<b>1.5385</b>	<b>95</b>	<b>2367</b>
0.603	<b>1.543</b>	<b>92</b>	<b>2374</b>
0.606	<b>1.5465</b>	<b>92.5</b>	<b>2811.8</b>
0.6082	<b>1.55</b>	<b>95.45</b>	<b>1192.23</b>
0.612	<b>1.5553</b>	<b>91</b>	<b>3110.6</b>

**Tableau III.3** : Spécifications du CDF proposé pour différentes valeurs de *a*.

Ensuite, nous avons modifié le rayon des tiges de toutes la structure. Le résultat est reporté sur le tableau III.4. On remarque que la longueur d'onde de résonance se déplace vers les longueurs d'onde supérieures avec l'augmentation de R. L'efficacité d'extraction et le facteur de qualité sont aussi affectés par cette variation.

<b>R(<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b><math>\lambda</math> (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Efficacité d'extraction (%)</b>	<b>Q</b>
0.103	<b>1.5457</b>	<b>91.68</b>	<b>1188.8</b>
0.106	<b>1.54755</b>	<b>91.68</b>	<b>1406.8</b>
0.109	<b>1.54945</b>	<b>90.82</b>	<b>1721.5</b>
0.112	<b>1.55115</b>	<b>86.19</b>	<b>2585.3</b>
0.115	<b>1.55255</b>	<b>81.27</b>	<b>3881.5</b>

**Tableau III.4** : Spécifications du CDF proposé pour différentes valeurs de R.

Enfinement, en faisant varier le rayon ( $R_i$ ) de toutes les tiges de la structure. Les résultats sont donnés sur le tableau III.5. D'après ce tableau, le spectre de sortie de la structure se déplace vers des longueurs d'onde plus élevées avec l'augmentation du rayon des tiges internes. On note également une modification dans les valeurs de la transmission et le facteur de qualité.

<b><math>R_i</math>(<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b><math>\lambda</math> (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Efficacité d'extraction (%)</b>	<b>Q</b>
0.181	<b>1.5436</b>	<b>81.27</b>	<b>1715.11</b>
0.182	<b>1.5499</b>	<b>95.45</b>	<b>1192.23</b>
0.183	<b>1.5534</b>	<b>85.90</b>	<b>1294.52</b>
0.184	<b>1.5572</b>	<b>90.8</b>	<b>1112.28</b>

**Tableau III.5** : Spécifications du CDF proposé pour différentes valeurs de  $R_i$ .

En analysant l'effet de différents paramètres sur les caractéristiques et la longueur d'onde de sortie du filtre proposé, nous confirmons la faisabilité d'un CDF accordable utilisant un résonateur en anneau à cristal photonique.

**III.7. Conclusion**

L'idée de ce chapitre était d'explorer de nouveaux types de filtres à extraction à cristaux photoniques qui s'appuient sur le couplage entre des résonateurs en anneaux et des guides d'onde. Les propriétés de ces filtres ont été étudiées par simulations en utilisant le logiciel commercial Fullwave qui utilise la méthode des différences finies dans le domaine temporel à deux dimensions. Nous avons proposé un filtre qui contient quatre ports, un port d'entrée et trois ports, dans lequel un PCRR est situé entre deux guides d'ondes parallèles.

Nous avons consacré une partie de ce chapitre à l'analyse de la variation de quelques paramètres structurels sur les caractéristiques du filtre. A partir du résultat obtenu, nous avons pu démontré la dépendance de la variation de ses paramètres avec la longueur d'ondes de fonctionnement du filtre. Cette propriété permet l'utilisation du filtre proposé dans les systèmes de télécommunication pour la conception de plusieurs composants.

### Référence de chapitre 3:

[1] V. Fallahi, M. Seifouri, «Design of a High-Quality Optical Filter Based on 2D Photonic Crystal Ring Resonator for WDM Systems», DE GRUYTER, (2018).

# Conclusion générale

### 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.

Dans ce travail, nous nous sommes focalisés sur l'étude d'un filtre à extraction à cristaux photoniques bidimensionnels. Ce filtre est basé sur le couplage entre des guides d'onde et un résonateur en anneaux à cristaux photoniques (PCRR) de forme carrée. Ce filtre contient quatre ports, un port d'entrée et trois ports de sortie. 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 efficacités d'extraction et les facteurs de qualité les plus optimaux possible.

Une partie de ce mémoire a été consacrée à l'analyse de la variation de quelques paramètres structurels sur les caractéristiques du filtre. A partir du résultat obtenu, nous avons pu démontré la dépendance de la variation de ses paramètres avec la longueur d'ondes de fonctionnement du filtre. Cette propriété permet l'utilisation du filtre proposé dans les systèmes de télécommunication pour la conception de plusieurs composants.

## Résumé

Les cristaux photoniques sont des structures diélectriques dont l'indice de réfraction 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, quel que soit sa polarisation et sa direction de propagation.

Dans ce travail, nous nous sommes focalisés sur l'étude des filtres à extraction basés sur le couplage entre les guides d'onde et les résonateurs en anneaux à cristaux photoniques (PCRRs). Nous avons proposé un filtre qui contient un PCRR situé entre deux guides d'ondes parallèles. Les propriétés de ce filtre sont 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 des paramètres géométriques de la structure.

**Mots-clé :** cristaux photoniques, bande interdite photonique, PCRR, CDF.

## Abstract

Photonic crystals are dielectric structures whose refractive index varies periodically along one or more directions in space. This periodic variation of the optical index leads to the appearance of photonic band gaps: frequency ranges for which light cannot propagate in the structure, whatever its polarization and direction of propagation.

In this work, we have focused on the study of channel drop filter based on the coupling between the waveguide and the photonic crystal ring resonator (PCRR). we have proposed a filter containing a PCRR located between two parallel waveguides. The properties of this filter are studied using the two dimensional finite difference time domain method (2D-FDTD). The improvement of the performance of this component relies on the adjustment of the geometrical parameters of the structure.

**Key-words:** photonic crystals, photonic band gap, PCRR, CDF