

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'études

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Télécommunications

Spécialité : Systèmes Et Réseaux Des Télécommunications

### Thème

## Conception Et Optimisation D'un Filtre Optique A Cristaux Photoniques Bidimensionnels

Préparé par :

Meliouh Lisa

Roumila Saliha

Zidani Massinissa

Dirigé par :

*Mme. Bendjelloul Rahima*

Examiné par :

*Mme. Bouncer Samira*

*Mme. Hamzaoui Dahbia*

Année universitaire : 2020/2021

## **Remerciements**

Ce travail n'aurait pu être achevé sans la bénédiction divine à chaque instant qui nous a donné la santé, la force et le courage. Rendons grâce à DIEU. Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes de près ou de loin, qui ont contribué à l'accomplissement de notre travail.

Nos remerciements et notre haute considération s'adressent particulièrement à : Madame BENDJELLOUL RAHIMA notre promotrice pour son aide précieuse et ces conseils judicieux. Nous lui assurons le témoignage de notre profonde reconnaissance. Nous tenant fortement à remercier Madame HAMZAOUI Dahbia et Madame BOUNCER Samira pour avoir bien voulu examiner et juger ce modeste travail.

On adresse nos sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à l'élaboration de ce travail, qu'ils trouvent ici notre profonde reconnaissance.

## **Dédicaces**

Je dédie ce travail à mes chers parents pour leur soutien, leur patience, leur encouragement  
durant mon parcours universitaire.

A mes chers frères ainsi qu'à toute ma famille, mes collègues et mes amis proches.

A toutes les personnes présentes dans ma vie.

Massinissa

## **Dédicaces**

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

À mes trois chers frères Yles, Amine et Yacine qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail. Ils m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours.

À la mémoire de ma grand-mère qui nous a quitté. J'espère que du monde qui est sien maintenant elle apprécie cet humble geste comme preuve de reconnaissance de la part de sa petite fille qui a toujours prié pour le salut de son âme. Puisse Dieu le Tout-Puissant l'avoir en sa sainte miséricorde.

Pour toutes mes sœurs Myléne, Amira, Hania et Sabine et ma chère cousine Mounia qui ont toujours été là pour moi.

A tous mes amis et mes proches.

Je vous aime

Lisa

## Dédicaces

Je dédie le fruit de mes 25 bougies d'étude aux plus précieux des trésors : A ma tendre mère, la source de tendresse. Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que tu mérites pour tous les sacrifices que tu n'as cessé de me donner, et ton encouragement qui m'a approchée l'envie d'aller plus loin, même et surtout lorsque la situation semblait objectivement désespérée.

A mon cher père, aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour toi, rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être et pour avoir cru en moi tout au long de ce fastidieux parcours.

A mes frères et sœurs et leurs mari(e)s, surtout mes belles sœurs Nihal, Souad et Nadia, Vous êtes mon trésor qui éclaire mon présent, un repère afin de construire mon avenir. Que Dieu vous préserve du mal, et que du bonheur dans votre vie.

A mes adorables nièces Nesrine, Asma, Nihel, Roumaissa. Je vous souhaite d'avoir une vie joyeuse et un avenir brillant et de réaliser vos rêves.

Without forgetting the most precious person of my life : Uzair, thank you for being there with me, thank you for the support, the prayers, the trust and energy you gave me to realize this work.

Que Dieu vous garde pour moi

Saliha



## Liste des abréviations

**1D** : Unidimensionnel.

**2D** : Bidimensionnel.

**3D** : Tridimensionnels

**CPs** : Cristaux photoniques

**BIP** : Bande Interdite Photonique

**TE** : Transverse Electrique, polarisation TE

**TM** : Transverse Magnétique, polarisation TM

$\lambda$  : Longueur d'onde

$\lambda_r$  : Longueur d'onde de résonance.

$\tau$  : Durée de vie des photons

$\epsilon$  : Permittivité diélectrique.

**Q** :Facteur de qualité

$\Delta\nu, \Delta\lambda$  : La largeur spectrale de la résonance

**a** : Période du cristal photonique.

**r** : Rayon du cristal photonique.

**CDF** : Channel Drop Filter, filtre à extraction

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

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

**DWDM** : Dense Wavelength Division Multiplexing, systèmes à multiplexage en longueur d'onde dense

**PICs** : Photonic Integrated Circuits, circuits photoniques intégrés

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

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

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

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

## Liste des Figures

## Chapitre I

**Figure I.1 :** Exemples de représentations schématiques de cristaux photoniques Unidimensionnels (1D), bidimensionnels (2D) et tridimensionnels (3D)

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

**Figure I.3 :** (a) élytres de coléoptères, (b) plumes d'oiseaux, (c) écailles de poissons

**Figure I.4.** Structure photonique 1D

**Figure I.5 :** Définition des polarisations pour les cristaux photoniques 2D.

**Figure I.6 :** Structures 2D : a) Structure carrée, (b) triangulaire et (c) hexagonale.

**Figure I.7 :** Réseau réel, réciproque, première zone de Brillouin et zone de Brillouin irréductible pour les réseaux 2D(a) carré et (b) triangulaire.

**Figure I.8 :** Diagrammes de bandes d'une structure bidimensionnelle pour les polarisations TE (en rouge) et TM (en bleu)

**Figure I. 9 :** Structure « La Yablonovite ».

**Figure I.10 :** Exemples des structures artificiels 3D : structure cubique (1), tas de bois (2), structure spirale (3), quasi-diamant (4).

**Figure I.11 :** Défauts ponctuels : a) Modification de la permittivité d'une tige b) Absence de la tige centrale

**Figure I.12:** Résonance d'une cavité engendrée par la suppression d'une tige dans un réseau carré d'un CP-2D

**Figure I.13 :** Exemples de défauts linéaires dans un cristal photoniques 2D créés : (a) défauts de distance entre motifs élémentaires, (b) défauts sur la permittivité relative, (c) élimination de motifs élémentaires, (d) défauts de dimension élémentaire

**Figure I.14 :** Distribution du champ autour d'un défaut linéaire créé dans un réseau carré de trous d'air.

**Figure I.15 :** structure d'un diviseur de puissance avec : (a) et (b) une jonction en Y et (c) et (d) une jonction en T [14].

## CHAPITRE II

**Figure II.1 :** Représentation schématique d'un filtre channel drop

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

**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

**Figure II.4 :** Mode résonant de largeur spectrale  $\Delta\nu$ , Centré autour de la fréquence  $\nu$

**Figure II.5 :** Principe de fonctionnement d'un CDF comportant un résonateur qui supporte deux modes de même symétrie

**Figure II.6 :** Principe de fonctionnement d'un CDF comportant un résonateur qui supporte deux modes de symétrie opposée.

**Figure II.7 :**(a) Structure schématique et (b) spectres de transmission normalisée du CDF à base de PCRR en forme de carré

**Figure II.8 :**(a) Structure schématique et (b) spectres de transmission normalisée du CDF à base de PCRR en forme de circulaire

**Figure II.9 :**(a) Structure schématique et (b) spectres de transmission normalisée du CDF à base de PCRR en forme de 'plus'

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

**Figure II.11 :** Représentation schématique du démultiplexeur proposé par la référence

## Chapitre III

**Figure III.1 :** La fenêtre de programme de RSoft CAD

**Figure III.2 :** Fenêtre du module BandSOLVE

**Figure III.3 :** Fenêtre du simulateur FullWAVE.

**Figure III.4 :** Structure sans défauts

**Figure III.5 :** Diagramme de bandes d'un CP-2D

**Figure III.6 :** La structure de base du filtre à extraction (channel drop filter)

**Figure III.7 :** La réponse spectrale du filtre CDF a l'état Brut

**Figure III.8 :** La dépendance entre la longueur d'onde de sortie et la taille des tiges intérieures

**Figure III.9 :** Structure avec Modification du rayon des tiges intérieures

**Figure III.10 :** La réponse spectrale du filtre CDF dans la structure modifiée

**Figure III.11 :** Résonateur avec Modification du rayon des tiges 's'

**Figure III.12 :** (a) La dépendance entre le rayon des tiges 's' et le taux de transmission, (b) La dépendance entre le rayon des tiges 's' et le facteur de qualité Q.

**Figure III.13 :** Structure finale

**Figure III.14 :** La réponse spectrale du filtre CDF dans la structure finale

**Figure III.15:** Répartition du champ dans le CDF en polarisation *TM* aux longueurs d'onde : (a)  $1.55 \mu m$  (à la résonance) et (b)  $1.54 \mu m$  (hors résonance).

## Tables matières

<b>Remerciements.....</b>	<b>i</b>
<b>Dédicaces.....</b>	<b>ii</b>
<b>Liste des abréviations.....</b>	<b>iii</b>
<b>Liste des figures.....</b>	<b>iv</b>
<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>

## **Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques**

<b>I.1 Introduction.....</b>	<b>3</b>
<b>I.2 Définition des cristaux photoniques.....</b>	<b>3</b>
<b>I.3 Analogie electron-photon.....</b>	<b>5</b>
<b>I.4. Types des cristaux photoniques.....</b>	<b>8</b>
I.4.1. Cristaux photoniques unidimensionnels.....	9
I.4.2. Cristaux photoniques bidimensionnels.....	9
I.4.2.1. Diagrammes de bandes.....	10
I.4.2.1.1. Réseau réciproque.....	10
I.4.1.2. Zone de Brillouin (ZB).....	10
I.4.3. Cristaux photoniques tridimensionnel.....	13
<b>I.5. Défauts dans les cristaux photoniques.....</b>	<b>13</b>
I.5.1. Défauts ponctuels.....	14
I.5.2. Défauts linéaires.....	15
<b>I.6. Application des cristaux photoniques.....</b>	<b>16</b>
I.6.1. Le diviseur de puissance à cristaux photoniques.....	16
I.6.2. Capteurs à cristaux photoniques.....	17
<b>I.7. Techniques de modélisation.....</b>	<b>18</b>
I.7.1. Méthode des ondes planes (PWE).....	18

1.7.2. Méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD).....	18
<b>I.8. Conclusion .....</b>	<b>19</b>

## **Chapitre II : Filtrage dans les cristaux photoniques**

<b>II.1. Introduction.....</b>	<b>21</b>
<b>II.2. Filtrage dans les cristaux photoniques.....</b>	<b>21</b>
II.2.1. Filtre channel drop.....	21
II.2.1.1. Filtre channel drop à base de cavité résonante.....	23
II.2.1.2. Filtre channel drop à base de résonateur en anneau à cristal photonique....	24
<b>II.3. Résonateurs en anneaux à cristaux photoniques.....</b>	<b>24</b>
<b>II.4. Caractéristiques des Résonateurs en anneaux.....</b>	<b>25</b>
II.4.1. Le facteur de qualité (Q).....	25
II.4.2. Finesse.....	26
<b>II.5. Principe de fonctionnement du CDF.....</b>	<b>27</b>
<b>II.6. Quelques topologies.....</b>	<b>29</b>
II.6.1. Filtre channel drop à base de PCRR carré.....	29
II.6.2. Filtre channel drop à base de PCRR en forme circulaire.....	30
II.6.3. Filtre channel drop à base de PCRR en forme de ‘plus’.....	31
<b>II.7. Application des filtres à extraction.....</b>	<b>32</b>
II.7.1. Capteur.....	32
II.7.2. Démultiplexeur.....	33
<b>II.8. Conclusion.....</b>	<b>34</b>

## **Chapitre III : Résultats et interprétations**

<b>III.1. Introduction.....</b>	<b>34</b>
<b>III.2. Présentation du logiciel Rsoft.....</b>	<b>34</b>

III.2.1. Simulateur BandeSolve.....	35
III.2.2. Le simulateur FullWave.....	35
<b>III.3. Structure sans défauts.....</b>	<b>36</b>
<b>III.4. Filtre Channel-drop à base de résonateur en anneau à cristal photonique.....</b>	<b>37</b>
<b>III.4.1. Structure de base.....</b>	<b>37</b>
<b>III.4.2. Structure modifiée.....</b>	<b>39</b>
III.4.2.1. Premier cas : Modification du rayon des tiges intérieures.....	39
III.4.2.2. Deuxième cas : Modification du rayon des tiges 's'.....	41
<b>III.5. Structure finale.....</b>	<b>43</b>
<b>III.6. Paramètres affectant les caractéristiques du filtre.....</b>	<b>45</b>
<b>III.7. Conclusion.....</b>	<b>47</b>
<b>Conclusion Générale.....</b>	<b>48</b>
<b>Références.....</b>	<b>49</b>
<b>Résumé.....</b>	<b>50</b>

# **Introduction générale**

## **Introduction générale**

On considère souvent que le domaine des cristaux photoniques a démarré en 1987, quand E. Yablonovitch [1] a introduit le concept de matériaux à bandes interdites photoniques dans le but de contrôler la propagation de la lumière. Depuis, un grand nombre d'études sont menées sur la conception, la fabrication et les applications des cristaux photoniques.

Les cristaux photoniques (CPs) sont des matériaux artificiels ou naturels dont l'indice de réfraction varie périodiquement dans une, deux ou trois directions de l'espace. Cependant, Les recherches ont été portées principalement sur les CPs-2D grâce à leur fabrication facile et leur faible coût par rapport aux structures 3D.

Les CPs sont appelés également matériaux à bandes interdites photoniques (BIPs) dans lesquels aucun mode électromagnétique ne peut se propager, c'est le concept de base de cette technologie. 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.

L'objectif de ce manuscrit est de concevoir et d'optimiser un filtre optique à cristaux photoniques bidimensionnels et en particulier un filtre à extraction à base de résonateurs en anneaux. Il est organisé en trois chapitres comme suit :

Le premier chapitre portera sur des généralités liées aux cristaux photoniques. Une étude bibliographique et une synthèse des différentes structures des CPs unidimensionnels, bidimensionnels et tridimensionnels seront faites. La possibilité d'introduire des différents défauts ponctuels ou linéaires seront enchainés. Ce chapitre se terminera par la présentation de quelques méthodes de simulation des cristaux photoniques.

Le second chapitre sera consacré à la description du filtre channel drop (CDFs) à base de résonateurs en anneaux à cristaux photoniques (PCRRs). De ce fait, une présentation des PCRRs et de leurs propriétés générales sera soulignée. Enfin, quelques configurations des CDFs à base de différents résonateurs ainsi que les paramètres affectant leurs caractéristiques seront détaillés.

Le dernier chapitre sera dédié à la description du simulateur Rsoft et de son environnement de travail dans un premier temps. Ensuite, notre filtre à extraction réalisé en utilisant la méthode des différences finies dans le domaine temporel à deux dimensions (FDTD-2D) sera exposé en détail et les résultats obtenus seront discutés.

Enfin, nous achèverons ce manuscrit par une conclusion générale.

# **Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques**

## **Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques**

# Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques

## I.1. Introduction :

La notion de cristaux photoniques ou matériaux à bandes interdites photoniques a été proposée pour la première fois en 1987[1]. Le premier cristal photonique a été réalisé en 1991[2]. Les cristaux photoniques offrent la possibilité de contrôler la propagation de la lumière à l'échelle de la longueur d'onde. C'est notamment cette propriété qui les rends intéressants pour de nombreuses applications.

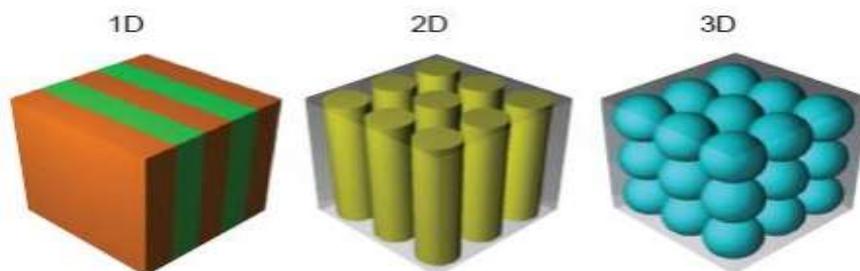
Dans ce premier chapitre, on introduit les notions de base des cristaux photoniques. Nous verrons d'abord l'analogie qui existe entre les électrons et les photons. Nous présenterons ensuite les différents types de cristaux, nous détaillerons le cas des cristaux bidimensionnels et leurs défauts. Nous rappellerons enfin les différentes méthodes numériques permettant la simulation des propriétés de ces cristaux.

## I.2. Définition des cristaux photoniques :

Les cristaux photoniques (CPs) [3,4] sont des matériaux diélectriques, dont l'indice de réfraction varie suivant différentes directions de manière périodique à l'échelle de la longueur d'onde, ce qui entraîne l'apparition de gammes de fréquences pour lesquelles la lumière ne peut pas se propager dans une ou plusieurs directions. Selon le nombre de directions, ces structures sont désignées par l'appellation de cristaux unidimensionnels, bidimensionnels, ou tridimensionnels (Figure I.1).

L'analogie entre la propagation d'une onde électromagnétique dans ces milieux et la propagation des électrons dans un cristal atomique, a mené à l'appellation de ces gammes de fréquences « bandes interdites photoniques ». Une bande interdite photonique (BIP) correspond à un intervalle de fréquence où la propagation de la lumière est interdite dans certaines directions du cristal photonique [5].

## Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques



**Figure I.1.** Exemples de représentations schématiques de cristaux photoniques unidimensionnels (1D), bidimensionnels (2D) et tridimensionnels (3D) [6].

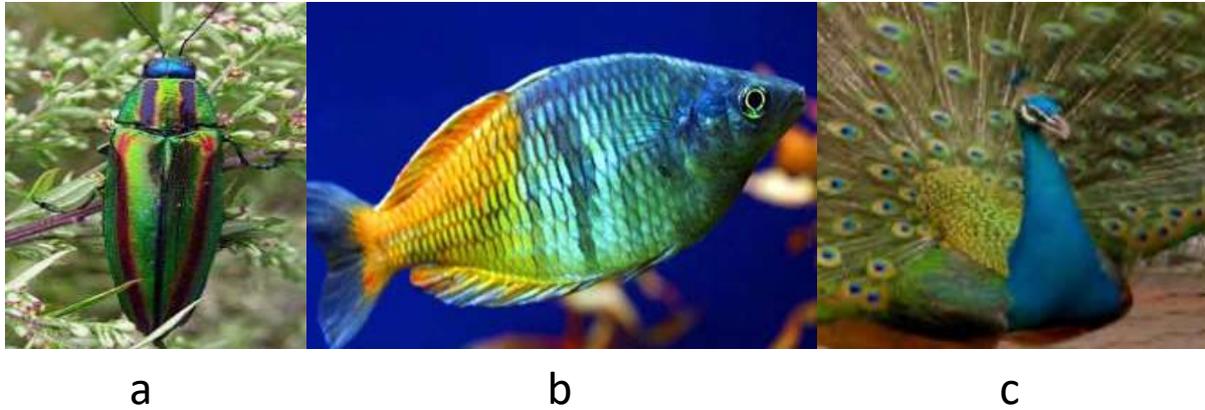
Les cristaux photoniques sont aussi présents à l'état naturel sous plusieurs formes par exemple, Les Papillons sont parmi les insectes les plus colorés que nous offre la nature. Ils sont en fait très largement tributaires de la lumière et ont développé un arsenal impressionnant pour gérer cette interaction avec les ondes électromagnétiques au mieux de leur intérêt [7]. La figure I.2 montre la structure microscopique de l'aile d'un papillon, cette structure a un comportement identique à celui des structures à bandes interdites photoniques.



**Figure I.2 :** La figure de droite présente l'agrandissement d'une aile de papillon [7].

# Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques

Nous pouvons citer aussi les élytres de coléoptères, plumes d'oiseaux, écailles de poissons (voir Figure 1.3). Ils peuvent contrôler la propagation de la lumière.



**Figure I.3 :** (a)élytres de coléoptères, (b) écailles de poissons, (c) plumes d'oiseaux.

## I.3 Analogie electron-photon

La théorie des cristaux photoniques s'inspire des similitudes entre un photon se propageant dans un cristal photonique et un électron dans un semi-conducteur. Par conséquent, l'équation de Schrödinger, qui contrôle le mouvement des électrons dans des matériaux caractérisés par leur potentiels périodiques est similaire à l'équation de propagation, dérivée des équations de Maxwell, utilisée pour décrire la propagation des ondes électromagnétiques dans des matériaux caractérisés par leurs constante diélectrique périodique  $\epsilon$ .

Si nous considérons un matériau non magnétique ( $\mu_r=1$ ) sans charges ( $\rho=0$ ) ni courants, et de constante réelle  $\epsilon(r)$  (le matériau est non adsorbant), les équations de Maxwell s'écrivent comme suit:

$$\nabla \cdot (\epsilon(r) E(r,t)) = 0 \dots\dots\dots(1.1)$$

$$\nabla \cdot H(r,t) = 0 \dots\dots\dots(1.2)$$

# Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques

$$\nabla \times E(r,t) = -\mu_0 \frac{\partial}{\partial t} H(r,t) \dots\dots\dots(1.3)$$

$$\nabla \times H(r,t) = \epsilon_0 \epsilon(r) \frac{\partial}{\partial t} E(r,t) \dots\dots\dots(1.4)$$

Où E et H désignent respectivement les champs électrique et magnétique

$\epsilon$  : est la permittivité relative appelée aussi la constante diélectrique

$\epsilon_0$  et  $\mu_0$  représentent la permittivité diélectrique et la perméabilité magnétique du vide,

r et t représentent les dépendances spatiales et temporelles

On applique  $(\frac{\partial}{\partial t})$  à (1.3), on aura :

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

De 1.4 on a :

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

En remplaçant l'expression de  $\frac{\partial E(r,t)}{\partial t}$  dans (1.5) on trouve :

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

Où  $c = (\mu_0 \epsilon_0)^{-1/2}$  est la vitesse de la lumière dans le vide

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\epsilon(r)} \nabla \times H(r,t) \right) = -\frac{\partial^2}{c^2 \partial t^2} H(r,t) \dots\dots\dots(1.8)$$

Si l'on cherche des solutions à cette équation sous la forme d'ondes harmoniques

$H(r,t) = H(r)e^{-i\omega t}$  on peut écrire l'équation suivante :

# Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\epsilon(r)} \nabla \times H(r) \right) = \frac{\omega^2}{c^2} H(r) \dots \dots \dots (1.9)$$

$$\nabla \times (\nabla \times H(r)) = \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon(r) H(r) \dots \dots \dots (1.10)$$

On sait que

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

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

On a aussi :  $\Delta(H(r)) = \nabla^2 H(r)$

On aura donc :

$$\nabla^2 H(r) = (-\omega^2/c^2) \epsilon(r) H(r) \dots \dots \dots (1.11)$$

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

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon}}$$

$\omega$  : Pulsation.

L'équation de Schrödinger en régime stationnaire pour la fonction d'onde  $\Psi$  d'un électron dans un potentiel  $V$  s'écrit sous la forme suivante :

$$\nabla^2 \Psi(r) = -\frac{2m}{\hbar^2} (E - V) \Psi(r) \dots \dots \dots (1.12)$$

Où :

$E$  est l'énergie de l'électron,  $m$  sa masse.  $\hbar$  est la constante de Planck réduite.

L'équation (I.9) est l'analogue formel de l'équation de Schrödinger (I.12) décrivant le mouvement des électrons dont le potentiel est périodique d'un cristal,  $H(r)$  étant l'analogue électromagnétique de la fonction d'onde électronique,  $\Psi(r)$  et  $\epsilon(r)$  étant l'analogue du potentiel atomique  $V(r)$  [8].

# Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques

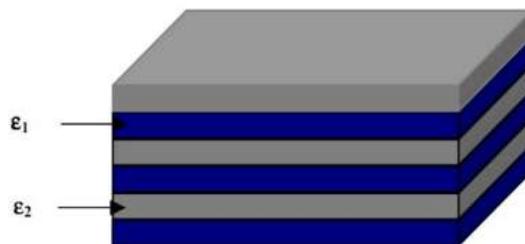
Ainsi, de la même manière que la périodicité du potentiel cristallin d'un semi-conducteur entraîne l'apparition de bandes interdites en énergie pour les électrons, la périodicité de la constante diélectrique d'un cristal photonique est à l'origine de domaines de fréquences pour lesquelles le cristal ne supporte pas de mode électromagnétique, autrement dit pour lesquelles 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 : les structures unidimensionnelles (1D), bidimensionnelles (2D) et tridimensionnelles (3D)

### I.4.1. Cristaux photoniques unidimensionnels :

Les matériaux à bandes interdites photoniques unidimensionnels (1D) possèdent une permittivité électrique périodique dans une direction et uniforme dans les deux autres directions. La figure I.4 montre qu'ils consistent en un empilement de deux couches alternées de matériaux homogènes ayant des constantes diélectriques  $\varepsilon$  différentes. Ces structures sont couramment connues sous le nom de miroir ou réseau de Bragg. Elles existent depuis longtemps et sont utilisées dans de nombreuses applications comme des filtres sélectifs ou des cavités lasers.

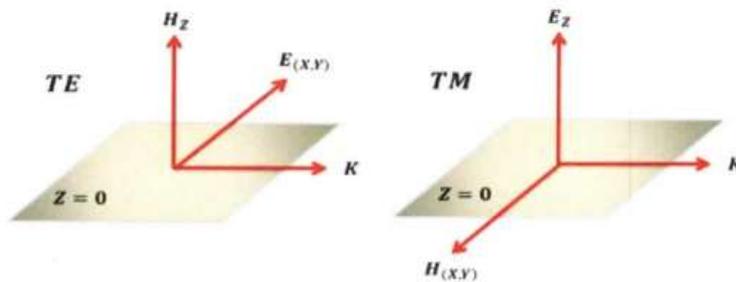


**Figure I.4.** Structure unidimensionnelle.

# Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques

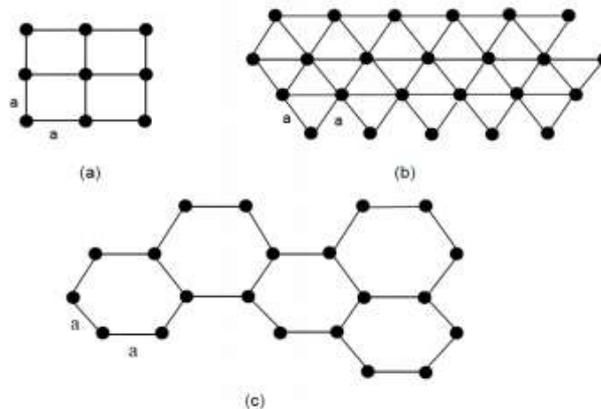
## I.4.2. Cristaux photoniques bidimensionnels :

Un cristal photonique bidimensionnel (CP- 2D) 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 : la polarisation TE (Transverse Electrique, champ E dans le plan de la périodicité) et la polarisation TM (Transverse Magnétique, champ H dans le plan de périodicité) comme le montre la figure I.5.



**Figure I.5 :** Définition des polarisations pour les cristaux photoniques 2D.

Il existe plusieurs façons de réaliser ces structures bidimensionnelles. Par exemple, on peut placer des tiges diélectriques dans l'air ou encore dans un autre diélectrique. Ces structures peuvent aussi être constituées d'un ensemble de trous percés dans un diélectrique. Les réseaux les plus courants pour l'organisation des piliers (ou des trous) sont les réseaux carrés, triangulaires et hexagonales comme il est illustré sur la figure I.6.



**Figure I.6 :** Structures 2D : (a) carré, (b) triangulaire et (c) hexagonale [6].

# Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques

Selon que l'on considère la polarisation TE ou TM, les bandes énergétiques permises ou interdites seront différentes. Il existe donc une bande interdite TE et une bande interdite TM. Lorsque les bandes interdites photoniques pour les polarisations TE et TM se recouvrent, on parle alors de bande interdite complète. Afin d'obtenir cette dernière il faut un contraste d'indice suffisamment grand (différence entre les indices du milieu et des tiges) [9].

L'intérêt d'un cristal photonique provient de sa capacité à interdire la propagation de la lumière. Il est donc préférable de travailler avec un cristal qui présente la bande interdite la plus complète possible.

## 1.4.2.1. 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 [8], 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 hautes symétries de cette zone qui fait partie du réseau réciproque.

Nous allons définir dans la section suivante le réseau réciproque et la zone de Brillouin.

### 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 :

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

Avec  $\vec{a}_i$  les vecteurs de base du réseau directe  $\vec{b}_j$  les vecteurs de base du réseau réciproque  $\delta_{ij}$  le symbole de Kronecker

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

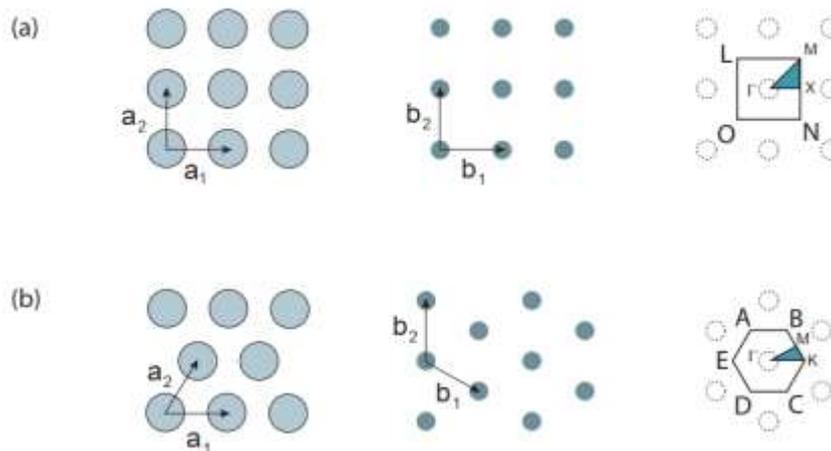
Les zones de Brillouin (ZB) sont des régions qui partitionnent l'espace réciproque associé au cristal. Il en existe une infinité et peuvent être définies à l'aide des plans de Bragg qui sont les plans médiateurs de l'ensemble des vecteurs formés par des combinaisons linéaires des vecteurs du réseau réciproque.

On appelle zone de Brillouin irréductible la plus petite surface qui permet de déduire la relation de dispersion dans tout l'espace réciproque [10].

# Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques

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  $M$ ,  $\Gamma$  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  $M$ ,  $\Gamma$  et  $K$ . Le vecteur d'onde parcourt ainsi les directions de plus haute symétrie :  $X\Gamma$ ,  $M\Gamma$  et  $MX$  pour le réseau carré, et :  $K\Gamma$ ,  $M\Gamma$  et  $MK$  pour un réseau triangulaire.

La figure I.7 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 I.7 pour les deux types de réseaux.



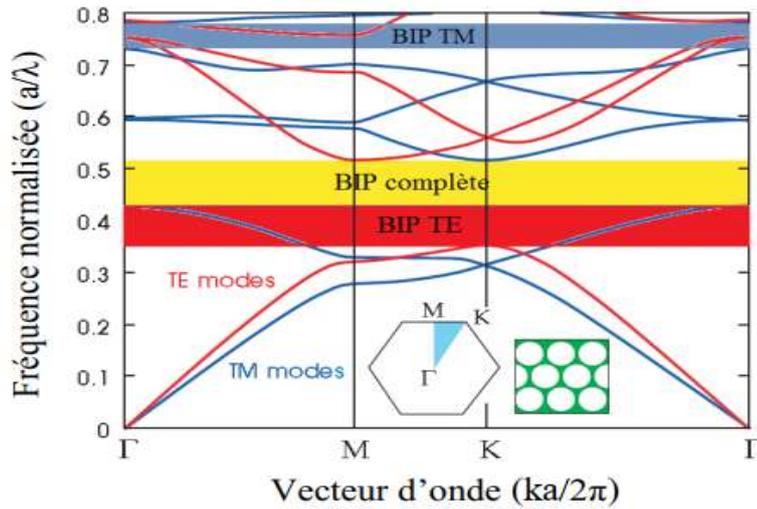
**Figure I.7 :** Réseau réel, réciproque, première zone de Brillouin et zone de Brillouin irréductible pour les réseaux 2D (a) carré et (b) triangulaire. [10]

Nous présentons sur la figure I.8 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 I.8 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.

# Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques



**Figure I.8 :** Diagrammes de bandes d'une structure bidimensionnelle pour les polarisations TE (en rouge) et TM (en bleu) [9].

L'un des principaux résultats de la figure I.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 [9,11]. Pour le réseau triangulaire, le recouvrement des deux bandes TE et TM donne naissance à une bande interdite complète.

# Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques

## I.4.3. Cristaux photoniques tridimensionnel :

Les structures périodiques tridimensionnelles (3D) ont une constante diélectrique périodique dans les trois directions. Après les miroirs de Bragg, elles ont été les deuxièmes à être réalisées par Yablonovitch (la Yablonovite) en 1991 [12], son but était d'obtenir une bande interdite pour toutes les directions de l'espace afin de freiner l'émission spontanée de la lumière.

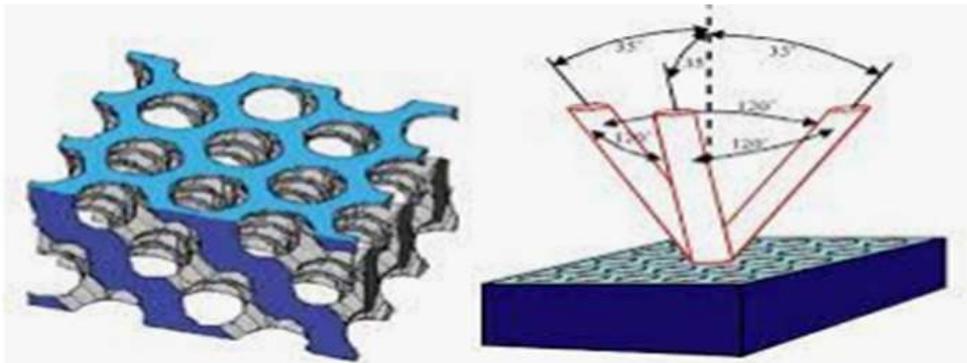


Figure I. 9 :« La Yablonovite ».

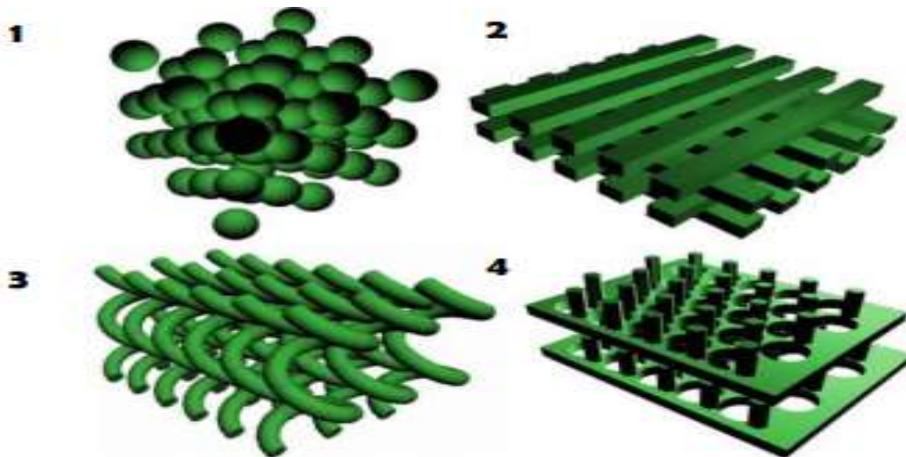


Figure I.10 : Exemples de structures artificielles 3D : structure cubique (1), tas de bois (2), structure spirale (3), quasi-diamant (4).

Les cristaux photoniques à trois dimensions posent encore de nombreux problèmes de fabrication. Pour cette raison, nous nous sommes intéressés aux cristaux photoniques à deux dimensions qui peuvent être fabriqués facilement.

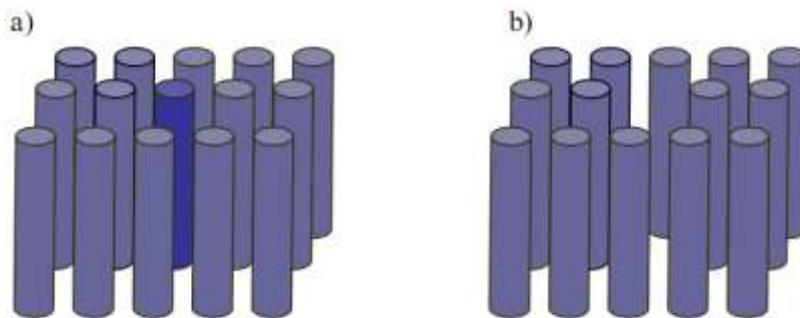
# Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques

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

Les cristaux photoniques ne permettront de réaliser de véritables fonctions optiques et de contrôler les flux de lumière que lorsqu'on introduit des défauts. Ces défauts sont obtenus en modifiant la périodicité du réseau en ajoutant ou enlevant localement un peu de matière diélectrique. Dans le cas d'un réseau de trous, le défaut consiste en l'omission d'un ou de plusieurs trous. On peut aussi créer des défauts en modifiant la taille et la forme de ces trous. En ce qui concerne les cristaux photoniques à deux dimensions qui nous intéressent plus particulièrement dans ce travail, on peut considérer deux types de défauts : les défauts ponctuels qui se comportent comme des microcavités, et les défauts linéaires qui permettent de réaliser des guides d'ondes.

### I.5.1. Défauts ponctuels :

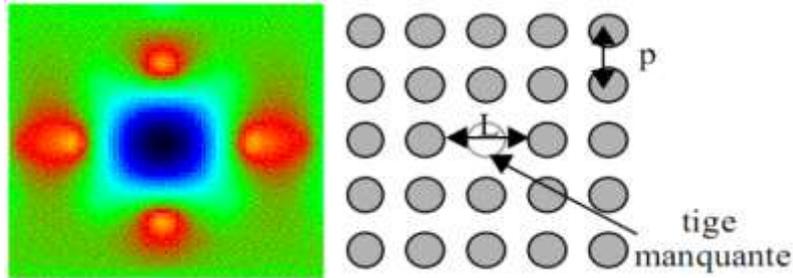
Les défauts ponctuels sont créés en modifiant les caractéristiques d'une cellule du réseau. Pour les cristaux photoniques composés de cylindres diélectriques, la constante diélectrique d'un cylindre peut être changée. Le cylindre peut être enlevé, ce qui crée une lacune dans le cristal. Cela correspond à une microcavité à l'intérieur du cristal photonique (figure I.11).



**Figure I.11** : Défauts ponctuels : a) Modification de la permittivité d'une tige, b) Absence de la tige centrale [13].

# Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques

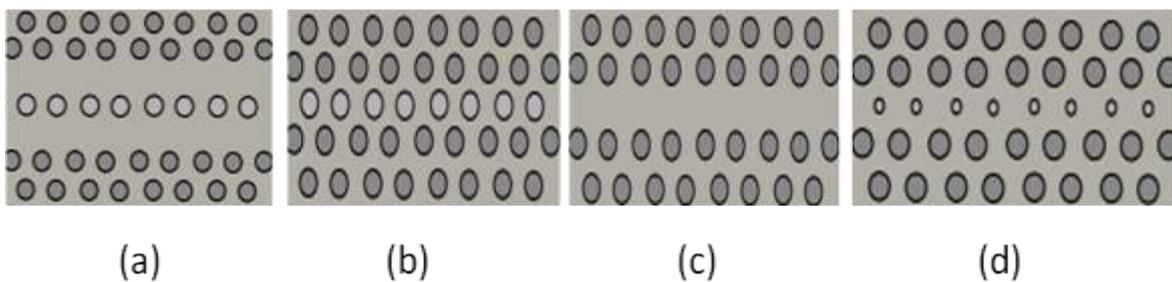
Les modes électromagnétiques introduits par le défaut sont appelés modes de défaut. C'est un mode dont la fréquence peut se situer dans la bande interdite et qui est localisé autour du site du défaut comme le montre la figure I.12.



**Figure I.12 :** Résonance d'une cavité engendrée par la suppression d'une tige dans un réseau carré d'un CP-2D [14].

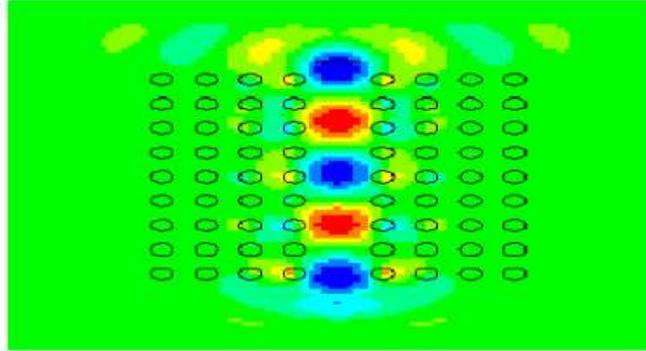
## I.5.2. Défauts linéaires :

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 I.13). L'introduction de ce défaut linéaire permet de guider la lumière selon une direction choisie. La lumière va se propager le long de ce guide avec une fréquence appartenant à la bande interdite photonique du cristal (figure I.14).



**Figure I.13 :** Exemples de défauts linéaires dans un cristal photoniques 2D créés par : (a) la modification de la distance entre motifs élémentaires, (b) la modification de l'indice de réfraction, (c) la suppression de motifs élémentaires, (d) la modification de la taille des motifs élémentaires.

# Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques



**Figure I.14** : Distribution du champ autour d'un défaut linéaire créé dans un réseau carré de trous d'air [13].

## I.6. Application des cristaux photoniques :

Les applications potentielles des matériaux à BIP-2D sont nombreuses : guides d'ondes rectilignes, à fort rayon de courbure, microcavités à grand facteur de qualité, filtres, démultiplexeur, capteurs et biocapteurs ect... Ces nouveaux dispositifs reproduisent les principes opérationnels des différents composants d'un circuit intégré, en utilisant les photons comme porteurs d'information à la place des électrons.

Nous allons donc exposer brièvement quelques exemples de composants à base de cristaux photoniques bidimensionnels.

### I.6.1. Le diviseur de puissance à cristaux photoniques :

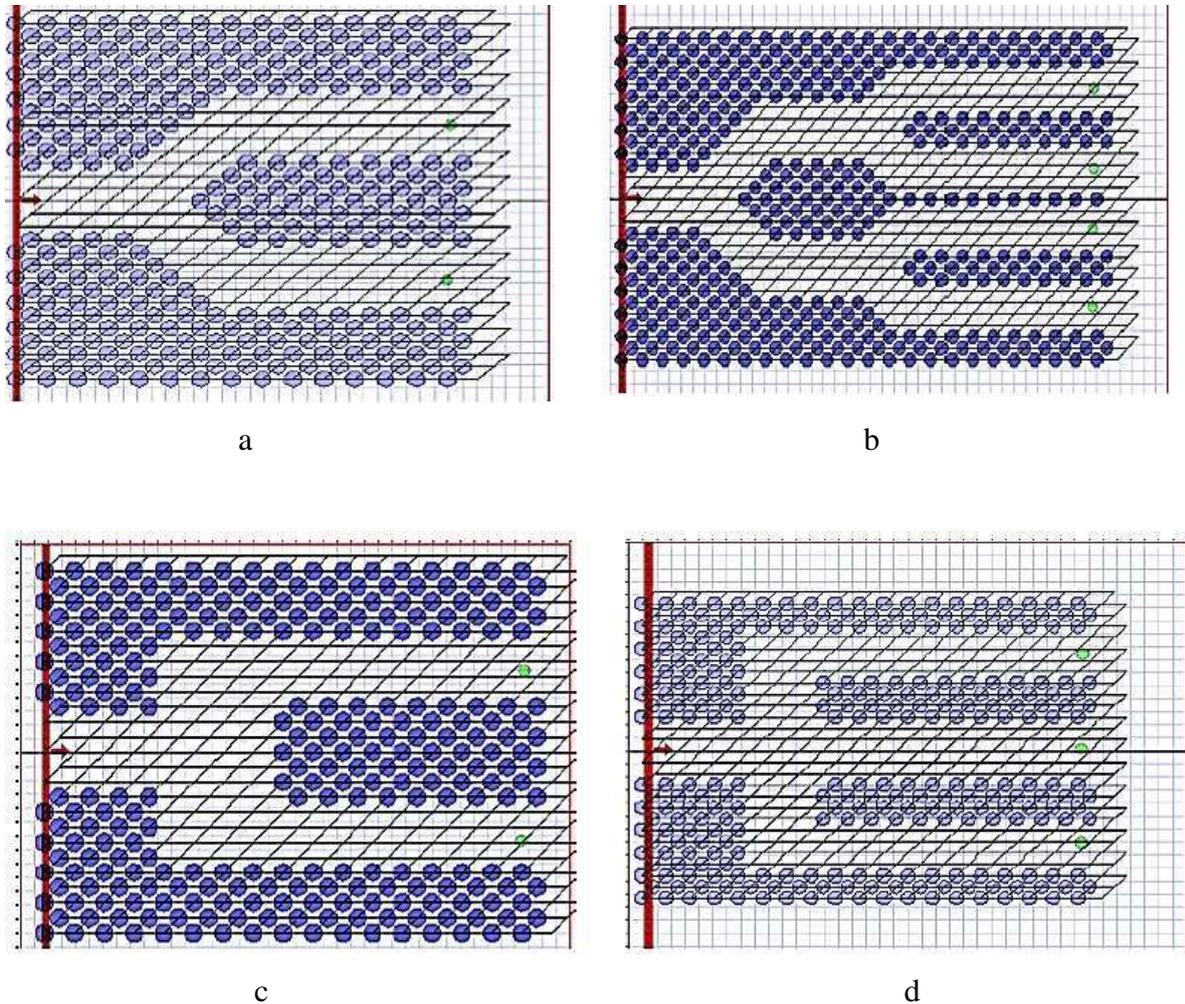
Le rôle d'un diviseur est de séparer la lumière dans les différentes parties de circuit optique, il existe 2 types :

\*le diviseur de type jonction Y : il contient une portion de jonction Y et deux ou quatre guides de sortie, ce type présente l'avantage d'offrir une réponse spectrale plate pour un intervalle de longueur d'onde très étendue.

\*le diviseur de type jonction T : il contient un guide d'onde d'entrée juxtaposé avec une portion de guide plus large et multimode.

# Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques

Selon la littérature, plusieurs topologies des diviseurs en cristaux photoniques ont été étudiées. Dans la référence [14], les auteurs ont étudié deux types de diviseurs en Y et deux types en T.



**Figure I.15** : Structure d'un diviseur de puissance avec : (a) et (b) une jonction en Y et (c) et (d) une jonction en T [14].

## I.6.2. 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 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.

# Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques

Dans la grande diversité des architectures proposées, les capteurs à CP basés 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.7. Techniques de modélisation

Depuis la première apparition des cristaux photoniques, plusieurs méthodes théoriques ont été élaborées. Les principales techniques utilisées sont la décomposition en ondes planes (PWE), la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD), les matrices de transfert ect....

Dans ce travail, nous nous restreignons à l'étude de deux méthodes numériques pour analyser les matériaux à bande interdite photonique : la méthode des différences finies temporelles et la méthode des ondes planes. Nous les présenterons ci-dessous.

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

La méthode des ondes planes (Wave Plane Expansion méthode, PWE) est couramment utilisée pour sa précision et fiabilité dans l'étude des cristaux photoniques. Elle donne les structures de bandes d'énergies et la distribution spatiale du champ associée des CPs. Cette méthode consiste à décomposer le champ électromagnétique sur une base d'ondes planes et elle est basée sur la résolution des équations de Maxwell dans le domaine fréquentiel.

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

La méthode FDTD (pour Finite Difference Time Domain) est une méthode générale de l'électromagnétisme utilisée pour résoudre les équations de Maxwell sur une structure de profil d'indice quelconque. Son originalité réside dans la résolution directe du système d'équation dans le domaine temporel et non dans le domaine fréquentiel, ce qui permet de visualiser la propagation d'une onde électromagnétique au sein des cristaux photoniques.

# Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques

La précision de cette méthode amène l'utilisateur à réaliser de véritables expériences numériques pour comprendre et schématiser les processus de propagation de la lumière et calculer les diagrammes de bande.

## **I.8. Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les notions de base liées aux cristaux photoniques. En premier lieu nous avons énuméré les différents types de ces cristaux, en s'intéressant plus particulièrement aux cristaux bidimensionnels. Nous avons cité par la suite quelques exemples d'applications des cristaux photoniques à partir de la littérature. Enfin, Pour étudier et comprendre la propagation des ondes électromagnétiques dans les cristaux photoniques, deux méthodes numériques (méthode des différences finies temporelles et méthode des ondes planes) parmi plusieurs ont été décrites. Ce sont ces deux méthodes numériques qui ont été exploitées dans ce mémoire.

## **Chapitre II : Filtrage dans les cristaux photoniques**

## **Chapitre II : Filtrage dans les cristaux photoniques**

### **II.1. Introduction :**

La création de défauts dans le cas des cristaux 2D constitue l'attrait majeur des structures à CPs. Les défauts peuvent avoir une infinité de géométries possibles qui passent par la modification de la taille ou de l'indice d'un seul motif du cristal jusqu'à la suppression de rangées entières de motifs (défauts linéiques). Ces défauts génèrent des modes dans la bande interdite du cristal parfait et contrôlent la propagation de la lumière au sein du cristal et à l'échelle de la longueur d'onde. Ces modes forment des supports pour le champ électromagnétique propagatif. L'utilisation de ces structures rend possible la miniaturisation des composants d'optique intégrée et améliore leurs performances.

Dans ce chapitre nous présentons les notions de base liées aux filtres à extraction à base de résonateur en anneaux à cristaux photoniques. Nous allons décrire dans un premier temps les PCRRs et présenter leurs propriétés générales. Nous parlerons ensuite du principe de fonctionnement d'un CDF. Une partie de ce chapitre sera consacrée à la description de quelques configurations des CDFs à base de différents résonateurs.

### **II.2. Filtrage dans les cristaux photoniques :**

Un filtre est un dispositif dont l'objectif est de sélectionner une ou plusieurs bandes de fréquences parmi le spectre électromagnétique et d'en éliminer d'autres. Dans le cas des filtres à base de cristaux photoniques, la conception est basée sur le couplage entre des défauts linéaires (guides d'onde) et des défauts ponctuels (cavités). Il existe deux types de filtres sélectifs à cristaux photoniques : les filtres Add/Drop dont la cavité est couplée de manière évanescente au guide d'onde porteur du signal [3, 4, 5, 6] et les filtres de type Fabry Péro dans lesquels la cavité est insérée directement dans le guide [7,8]. L'objectif est de réaliser des filtres avec une bonne sélectivité et possédant un minimum de pertes.

#### **Filtre channel drop :**

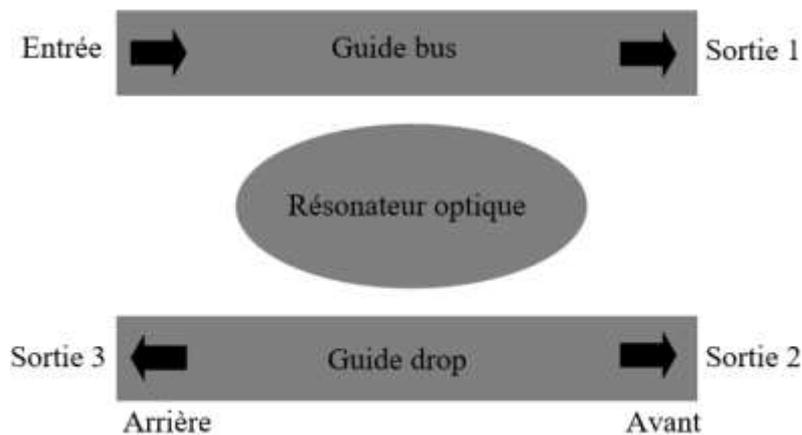
Le filtre optique à extraction (channel drop filter, CDF) est l'un des composants les plus importants et les plus essentiels des circuits photoniques intégrés (photonic integrated circuits PICs) et des systèmes de télécommunications optiques à multiplexage en longueur d'onde (Wavelength Division Multiplexing, WDM).

## Chapitre II : Filtrage dans les cristaux photoniques

Ce dispositif permet d'extraire une longueur d'onde bien précise d'un canal particulier, dans un flux de données, sans affecter les autres canaux. Actuellement, l'espacement entre les canaux devient de plus en plus dense pour exploiter pleinement la bande spectrale passante dans les systèmes à multiplexage en longueur d'onde dense (Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM). Un grand nombre de canaux contenant différentes longueurs d'onde nécessite un filtre submicronique. En utilisant les cristaux photoniques, on peut concevoir un filtre channel drop de très petite dimension [16,17].

Le schéma de principe d'un filtre à extraction est représenté sur la figure II.1. C'est un système à quatre ports, un port d'entrée et trois ports de sortie, où deux guides d'ondes, le bus et le drop, sont couplés par l'intermédiaire d'un résonateur optique.

Ce dispositif élémentaire de la technologie WDM permet le transfert sélectif et directif de la lumière entre deux guides d'ondes via une zone de couplage. Autrement dit, lorsqu'un signal multi-fréquences se présente à l'entrée du premier guide d'onde (bus), une seule fréquence sera sélectionnée et transférée ensuite dans la direction de propagation vers l'avant ou vers l'arrière dans le second guide d'onde (drop) [18].



**Figure II.1 :** Représentation schématique d'un filtre channel drop.

De nombreuses configurations du filtre channel drop, à base de cristaux photoniques, peuvent être trouvées dans la littérature. Une conception possible de cet élément utilise des résonateurs optiques pour sélectionner une seule fréquence spécifique qui correspond à la fréquence de résonance.

## Chapitre II : Filtrage dans les cristaux photoniques

Un résonateur est un dispositif qui permet de confiner l'énergie d'une onde électromagnétique à certaines fréquences. Tous les résonateurs optiques ont le même principe de base. La lumière est piégée à l'intérieur de la structure de manière à ce qu'elle repasse plusieurs fois sur le même chemin [19]. Dans les cristaux photoniques, il existe deux types de résonateurs : les cavités résonantes et les résonateurs en anneau (Photonic Crystal Ring Resonator, PCRR).

Dans ce travail on ne s'intéresse qu'aux filtres à extraction à base de résonateur en anneau à cristaux photonique.

### Filtre channel drop 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 plusieurs rangées. Les cavités à cristaux photoniques ont des applications variées dans les systèmes de télécommunication : elles permettent de réaliser des filtres [20-22].

Une première proposition théorique d'un filtre à extraction à base de cavités résonantes a été donnée par Fan et al. [23]. Leur filtre consiste en un système à quatre ports constitué d'une seule cavité résonante placée entre deux guides d'onde parallèles (voir figure II.2). Il apparaît qu'un transfert maximal du signal d'entrée du guide bus au guide drop parallèle aura lieu lorsque le résonateur entre les deux guides d'onde supportera deux modes de résonance dégénérés de symétries différentes.

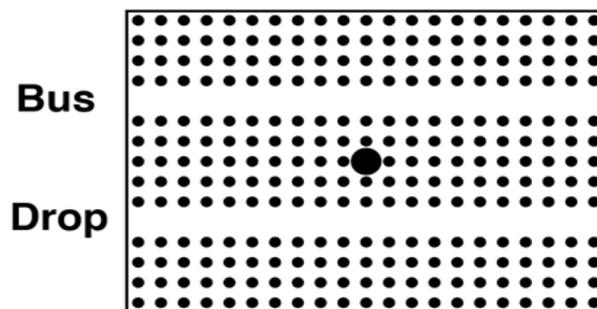


Figure II.2 : Filtre channel drop à base de cavité résonante [23].

## Chapitre II : Filtrage dans les cristaux photoniques

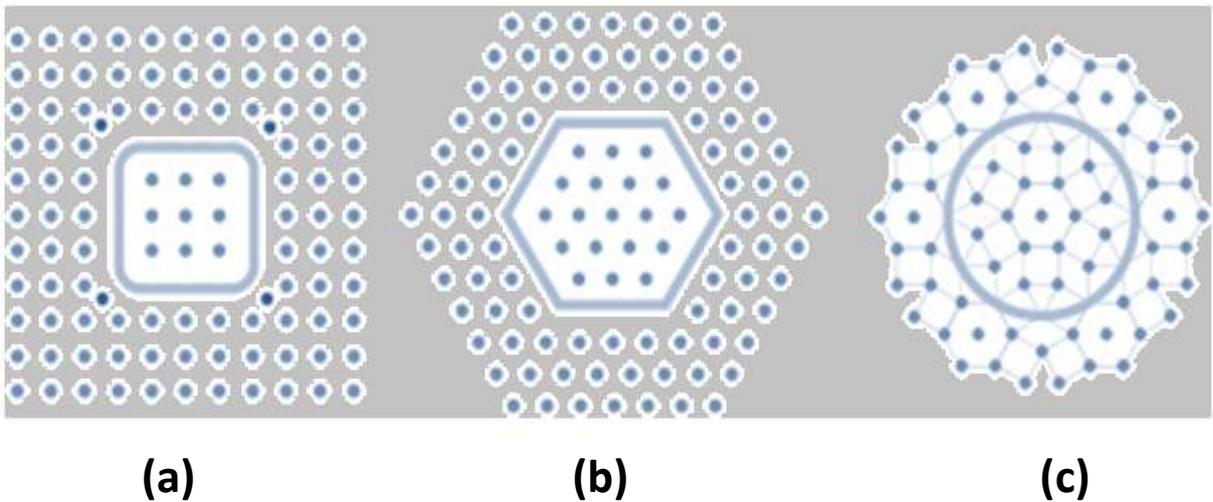
### Filtre channel drop à base de résonateur en anneau à cristal photonique :

Avant de nous intéresser au principe de fonctionnement de ce type de filtre, les résonateurs en anneaux à cristaux photoniques ainsi que leurs caractéristiques seront d'abord abordés.

### II.3. Résonateurs en anneaux 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 [19].

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.



**Figure II.3** : Différents types de 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.

## Chapitre II : Filtrage dans les cristaux photoniques

### II.4. Caractéristiques des Résonateurs en anneaux :

Lorsque nous parlons des résonateurs en anneaux, nous mentionnons souvent plusieurs grandeurs qui décrivent des propriétés spécifiques de ces derniers. Dans ce qui suit, nous présenterons leurs principales caractéristiques.

#### II.4.1. Facteur de qualité (Q) :

La durée de vie des photons  $\tau$  à l'intérieur du résonateur est liée à la notion de facteur de qualité  $Q$  par la relation :

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

Avec :

$\omega$  : la pulsation

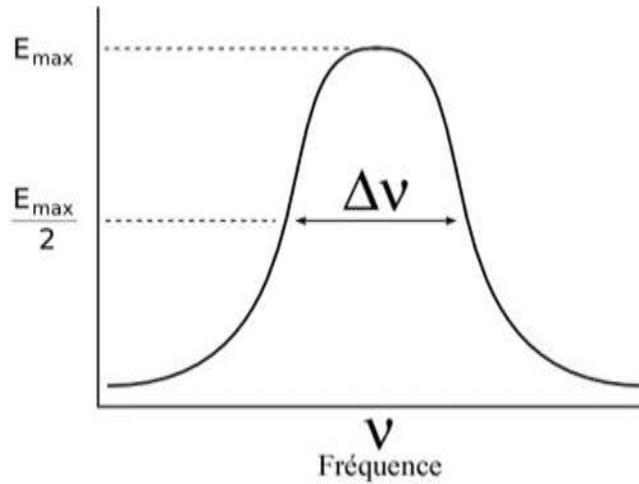
Une autre manière de quantifier le facteur de qualité en terme spectral est de faire le rapport entre la longueur d'onde centrale  $\lambda_r$  de résonance et de sa largeur à mi-hauteur  $\Delta\lambda$  (full width at half maximum, FWHM).

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.3 Il s'exprime comme [19, 24, 25] :

$$Q = \frac{\lambda_r}{\Delta\lambda} = \frac{v}{\Delta v} \dots\dots\dots(2)$$

Avec  $\Delta v$ : la largeur spectrale de la résonance à mi-hauteur

## Chapitre II : Filtrage dans les cristaux photoniques



**Figure II.4:** Mode résonant de largeur spectrale  $\Delta\nu$ , Centré autour de la fréquence  $\nu$  [25].

### II.4.2 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

$$F \equiv \frac{\text{ISL}}{\Delta\lambda} = \frac{\text{ISL} \cdot Q}{\lambda} \dots\dots\dots(3)$$

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 d'autres applications telles que la détection et le démultiplexage [24 ,26].

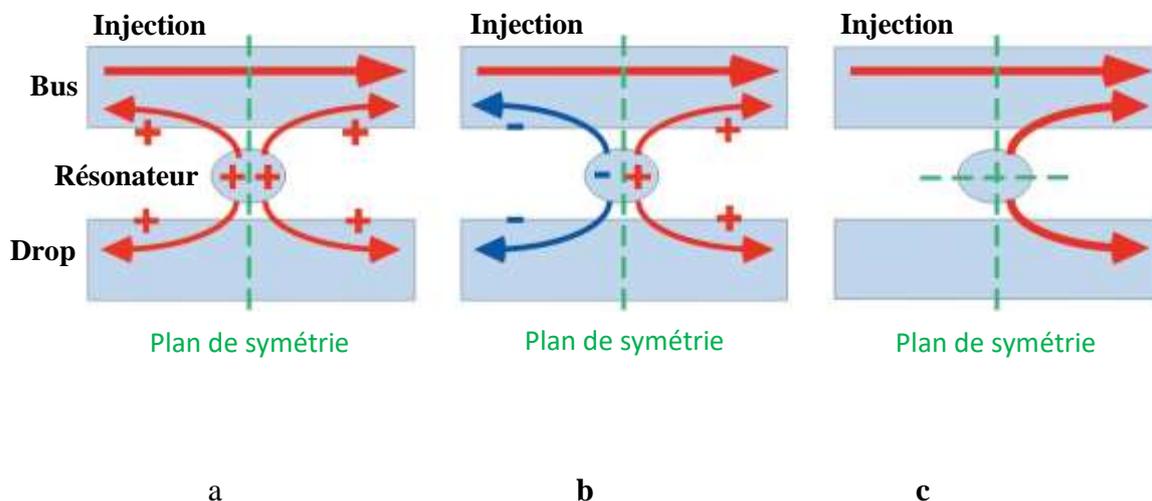
## Chapitre II : Filtrage dans les cristaux photoniques

### II.5. Principe de fonctionnement du CDF :

Dans le but d'expliquer le principe de fonctionnement du filtre à extraction, on considère deux plans de symétrie dans la structure schématique du filtre : un perpendiculaire aux guides d'onde et l'autre parallèle aux guides d'onde.

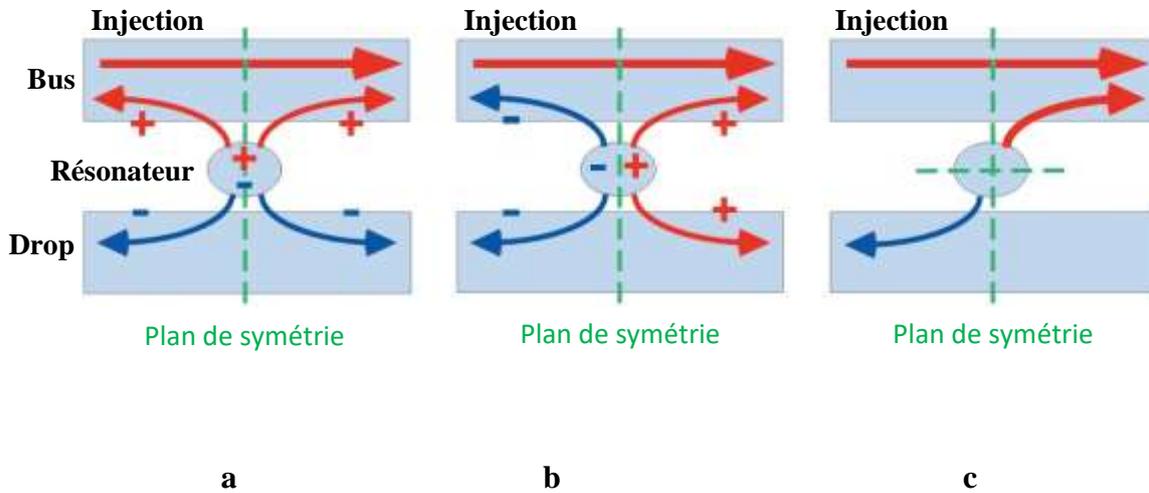
Afin d'inhiber le signal réfléchi dans le guide bus, il est nécessaire que les modes présentent des symétries opposées par rapport au plan perpendiculaire : le mode pair et le mode impair. Le mode pair décroît avec la même phase dans les directions vers l'avant et vers l'arrière (figure II.5.a), tandis que, pour le mode impair l'amplitude de décroissance dans la direction vers l'avant est en opposition de phase avec celle dans la direction vers l'arrière (figure II.5.b). A cause de l'opposition de phase entre les deux modes du résonateur dans la direction vers l'arrière, les amplitudes des modes s'annulent et aucun signal réfléchi n'est possible, comme il est montré sur la figure II.5.c.

On note que, pour que cette annulation se produise, il faut que les deux modes de résonances aient la même fréquence et la même bande passante [18, 27].



**Figure II.5 :** Principe de fonctionnement d'un CDF comportant un résonateur qui supporte deux modes de même symétrie par rapport à un plan parallèle aux guides d'onde et de symétrie opposée par rapport à un plan perpendiculaire aux guides d'onde.

## Chapitre II : Filtrage dans les cristaux photoniques



**Figure II.6** : Principe de fonctionnement d'un CDF comportant un résonateur qui supporte deux modes de symétrie opposée par rapport à un plan parallèle aux guides d'onde et par rapport à un plan perpendiculaire aux guides d'onde.

D'une autre part, grâce à la dégénérescence des modes, l'onde entrante interfère de manière destructive avec l'amplitude de décroissance vers l'avant du guide d'onde bus, provoquant ainsi l'annulation de toute la puissance transmise dans le guide bus et qui sera complètement transférée dans le guide drop.

La direction du transfert dépend quant à elle des symétries des deux modes du résonateur selon un plan de symétrie parallèle aux guides d'onde. Lorsque les deux modes ont les mêmes symétries par rapport à ce plan (figure II.5.a, II.5.b, et II.5.c) tout le signal est transféré vers l'avant dans le guide drop. A l'inverse (figure II.6.a, II.6.b, et II.6.c), si les deux modes ont des symétries opposées par rapport à ce plan, tout le signal est transféré vers l'arrière [18, 27].

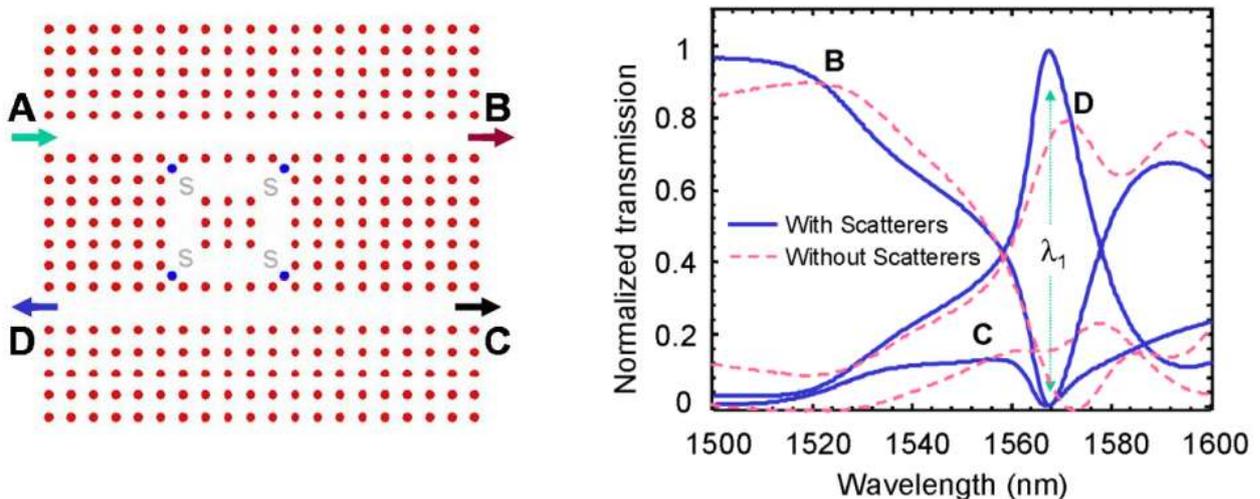
## Chapitre II : Filtrage dans les cristaux photoniques

### II.6. Quelques topologies :

Dans cette partie, nous présentons quelques configurations des filtres à extraction à base de résonateurs en anneaux à cristaux photoniques, proposées et conçues par plusieurs groupes de recherche dans le but d'améliorer leurs caractéristiques de transmission.

#### II.6.1 Première topologie :

Basées sur les résonateurs en anneau à cristaux photoniques (PCRRs), différentes conceptions et configurations sont constamment développées et optimisées pour améliorer davantage les performances des filtres. Dans la conception proposée par Qiang et al. [28], les auteurs ont utilisé un résonateur en anneau en forme de carré dans un cristal photonique bidimensionnel (figure 7.a). Ils ont optimisé la performance de leur CDF en introduisant des tiges de dispersion dans les quatre coins du résonateur. Ces tiges ont les mêmes caractéristiques que celles du reste de la structure photonique. En introduisant ces tiges ils ont amélioré de manière significative les caractéristiques de leur filtre, en augmentant l'efficacité d'extraction à plus de 95 %, comme il est montré sur la figure 7.b.



**Figure II.7 :** (a) Structure schématique et (b) spectres de transmission normalisée du CDF à base de PCRR carré [28].

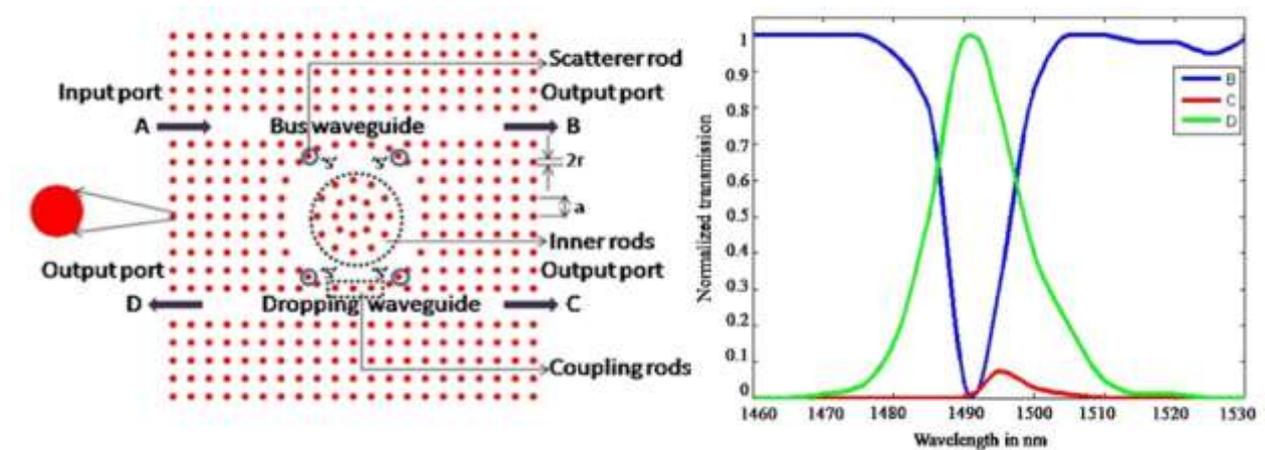
## Chapitre II : Filtrage dans les cristaux photoniques

### II.6.2. Deuxième topologie :

En 2013, l'équipe de Robinson [29] a proposé un filtre à extraction en utilisant un cristal photonique à deux dimensions de tiges diélectriques dans un réseau carré. La figure (II.8.a) montre la structure schématique du CDF, qui se compose des guides d'ondes bus et drop et d'un résonateur en anneau circulaire.

La forme circulaire du résonateur est structurée en faisant varier la position des tiges intérieures et extérieures de leurs positions initiales vers le centre. Dans le but d'améliorer l'efficacité d'extraction et la sélectivité spectrale, les auteurs ont placé des tiges de dispersion ('s') à chaque coin des quatre côtés du résonateur.

Le résultat de leur simulation indique une efficacité d'extraction de 100% et un facteur de qualité de 114.69, comme le montre la figure (II.8.b).



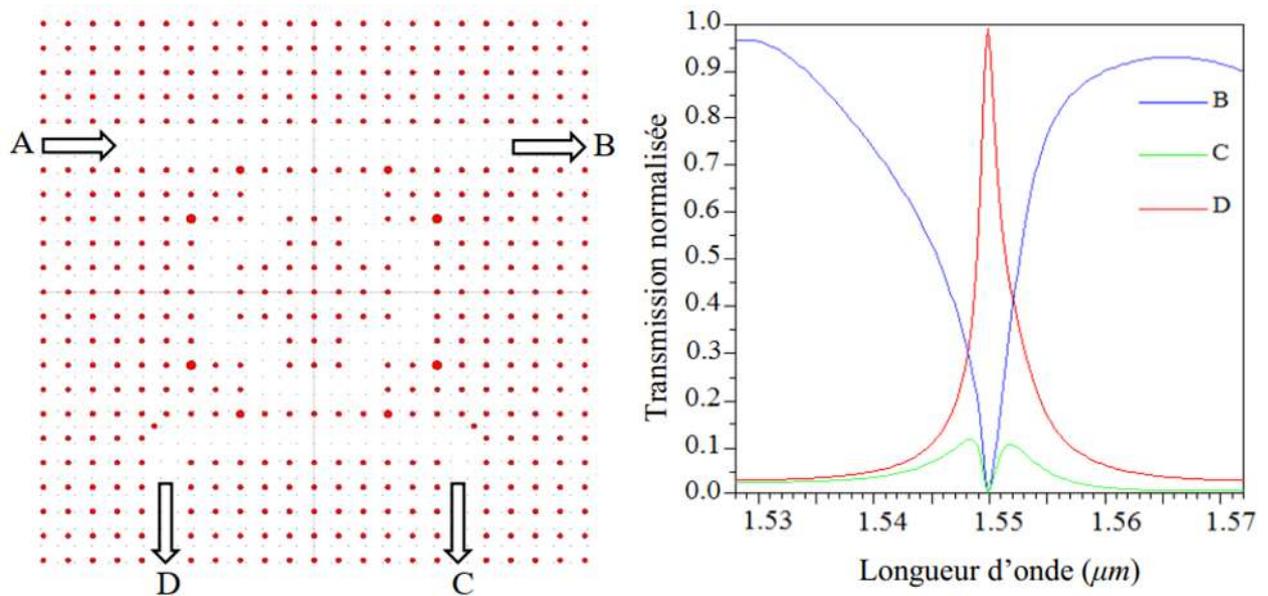
**Figure II.8:** (a) Structure schématique et (b) spectres de transmission normalisée du CDF à base de PCRR de forme circulaire [29].

## Chapitre II : Filtrage dans les cristaux photoniques

### II.6.3. Troisième topologie :

En 2016, Bendjelloul et al. [30] ont proposé un nouveau CDF, dans lequel le PCRR est en forme de ‘plus’, comme il est schématisé sur la figure (II.9.a). Ils ont montré que les performances de leur filtre peuvent être optimisées en augmentant les rayons des quatre tiges situées aux quatre coins internes du résonateur.

Leurs résultats sont reportés sur la figure (II.9.b), ils montrent qu’il est possible d’extraire presque 100 % du signal du guide d’onde bus et de le transférer vers le guide d’onde drop via le résonateur. Ils ont noté également une amélioration dans la valeur du facteur de qualité, elle est de 1011, alors que sa valeur calculée pour la structure non optimisée était seulement de 569.42.



**Figure II.9 :** (a) Structure schématique et (b) spectres de transmission normalisée du CDF à base de PCRR en forme de ‘plus’ [31].

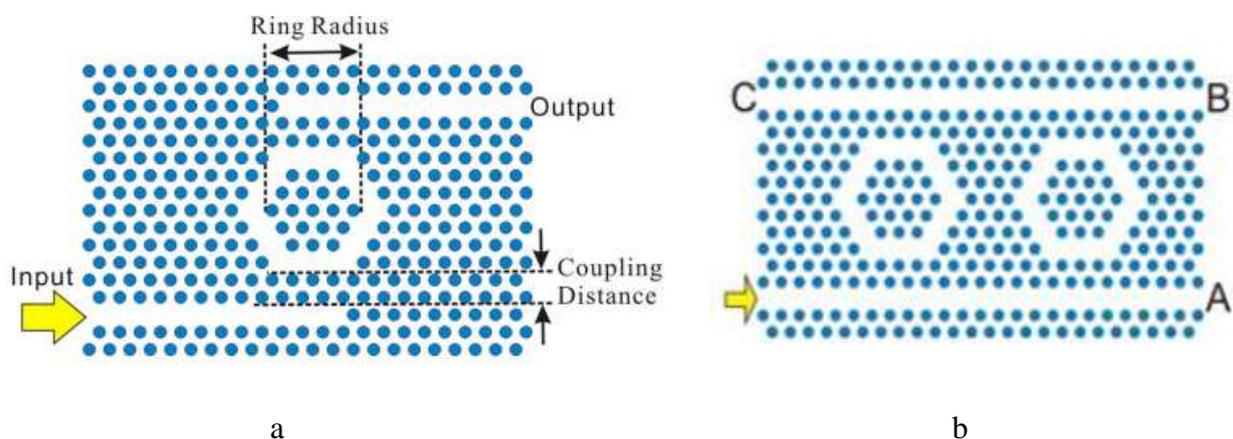
## Chapitre II : Filtrage dans les cristaux photoniques

### II.7. Application des filtres à extraction :

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, à la fois théoriquement et expérimentalement [28,29,10,30]. Dans toutes ces conceptions, la longueur d'onde de fonctionnement est fixe. Dans la mesure où une faible variation de l'un des paramètres structuraux du filtre induit une variation dans la longueur d'onde d'intérêt, Cela améliorerait considérablement l'utilisation de ces dispositifs pour des applications à la demande. C'est sur cette propriété que se base la majorité des applications des CDFs.

#### II.7.1. Capteurs :

La première proposition d'un capteur chimique à base d'un filtre à extraction a été faite par Hsiao et al. [32]. Sa structure schématique est représentée sur la figure II.10.a. La structure du capteur est créée dans une membrane de Silicium d'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 [16] (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 [32] et b) résonateur en anneau en cascade [33].

## Chapitre II : Filtrage dans les cristaux photoniques

### II.7.2. Démultiplexeurs :

Le CDF à base de PCRR est un autre dispositif commun pour la conception des démultiplexeurs optiques. Les auteurs de la référence [34] ont proposé un démultiplexeur hétéro-structure, comme le montre la figure II.11. La structure de base du filtre utilisé dans la conception du démultiplexeur contient un PCRR en forme de X. Dans leur dispositif, la sélection des longueurs d'onde pour chaque canal se fait en modifiant l'indice de réfraction de chaque CDF.

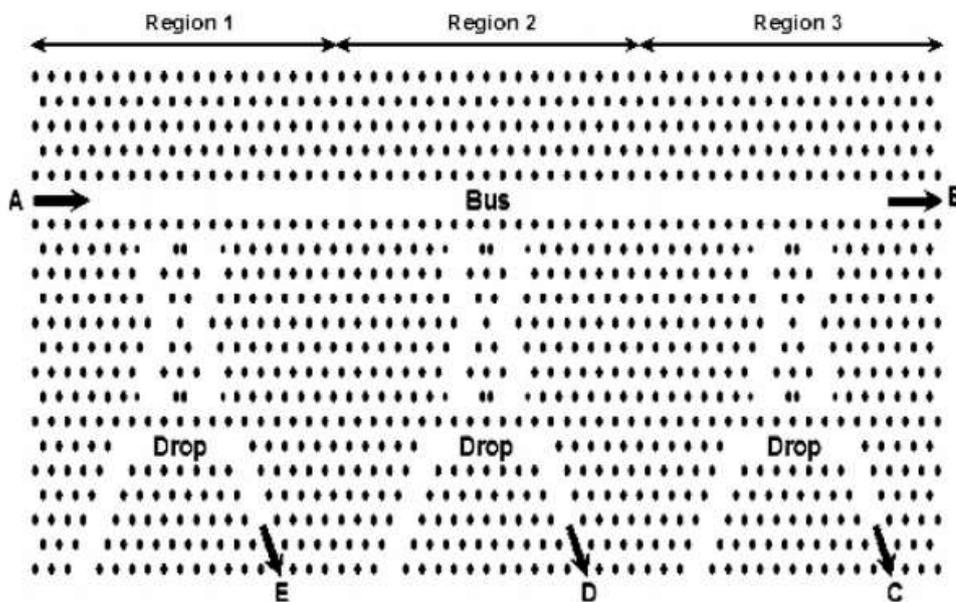


Figure II.11 : Représentation schématique du démultiplexeur proposé par la référence [34].

## **Chapitre II : Filtrage dans les cristaux photoniques**

### **II.8. Conclusion :**

Dans ce 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 expliqué leurs principes de fonctionnement et présenté les principales caractéristiques des résonateurs en anneaux. Enfin, nous avons cité quelques configurations possibles des CDFs trouvées dans la littérature.

## **Chapitre III : Résultats et interprétations**

# Chapitre III : Résultats et interprétations

## III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous proposons la conception d'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, nous avons optimisé la zone de couplage et le rayon des tiges intérieures du résonateur.

Une partie de ce chapitre est consacré à l'analyse de l'effet de la variation de quelques paramètres structurels sur les caractéristiques du filtre.

## III.2. Présentation du logiciel RSoft

Le RSoft est un logiciel de simulation basé sur les méthodes numériques de modélisation telle que : la méthode de différences finies dans le domaine temporel (FDTD) et la méthode des ondes planes (PWE). Il agit comme un programme de commande pour les modules de simulation du dispositif de RSoft qui sont : BeamPROP, FullWave, BandSOLVE, GratingMOD, DiffractMOD, FemSIM, et ModePROP. Dans notre travail, nous avons utilisé les deux modules : BandSOLVE et FullWave.

La figure III.1 représente la fenêtre du programme RSoft CAD où on trouve :

- ❖ En haut : une barre de menu.
- ❖ A gauche : une barre d'outils qui comporte plusieurs icônes.
- ❖ En bas : une barre d'état

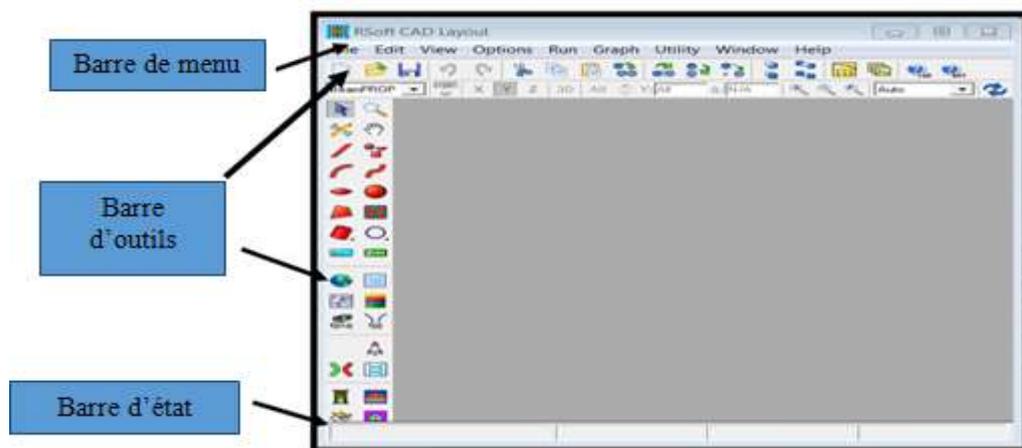


Figure III.1 : La fenêtre de programme de RSoft CAD

# Chapitre III : Résultats et interprétations

## III.3. Simulateur BandSolve

Le simulateur BandSolve est le premier outil de conception disponible dans le commerce à simplifier la modélisation et le calcul des structures de bandes photoniques pour tous les dispositifs à cristaux photoniques. Le moteur de simulation BandSolve utilise l'algorithme PWE (Plane Wave Expansion) pour effectuer des calculs de bandes. La fenêtre des paramètres de simulation de BanSolve est représentée sur la figure .

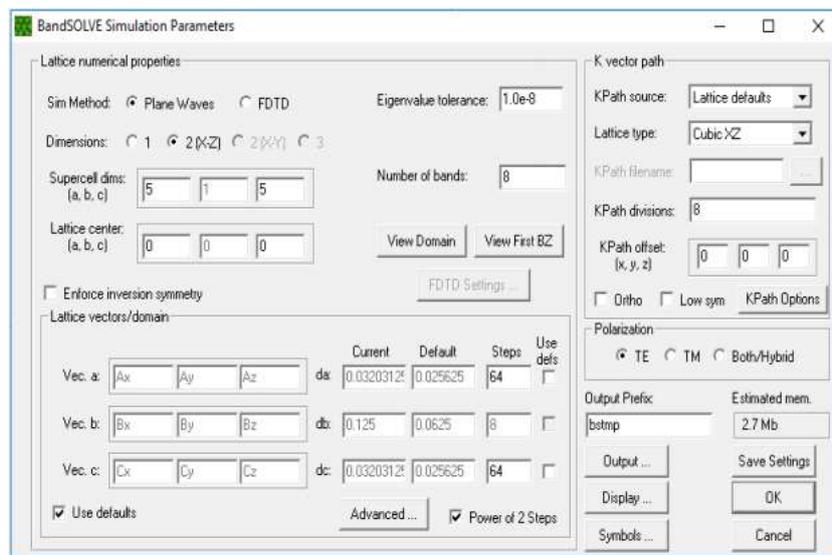


Figure III.2 : Fenêtre du module BandsOLVE

### III.3.2. Le simulateur FullWave

L'outil de simulation FullWave utilise la méthode du domaine temporel des différences finies (FDTD) pour effectuer une simulation vectorielle complète des structures photoniques. C'est un outil très sophistiqué pour étudier la propagation de la lumière dans une grande variété de structures photoniques, y compris des dispositifs à guide d'ondes intégrés et à fibreoptique, ainsi que des circuits et des dispositifs nanophotoniques tels que les cristaux fibreoptique, ainsi que des circuits et des dispositifs nanophotoniques tels que les cristaux photoniques. La fenêtre des paramètres de simulation de FullWave est représentée sur la figure

## Chapitre III : Résultats et interprétations

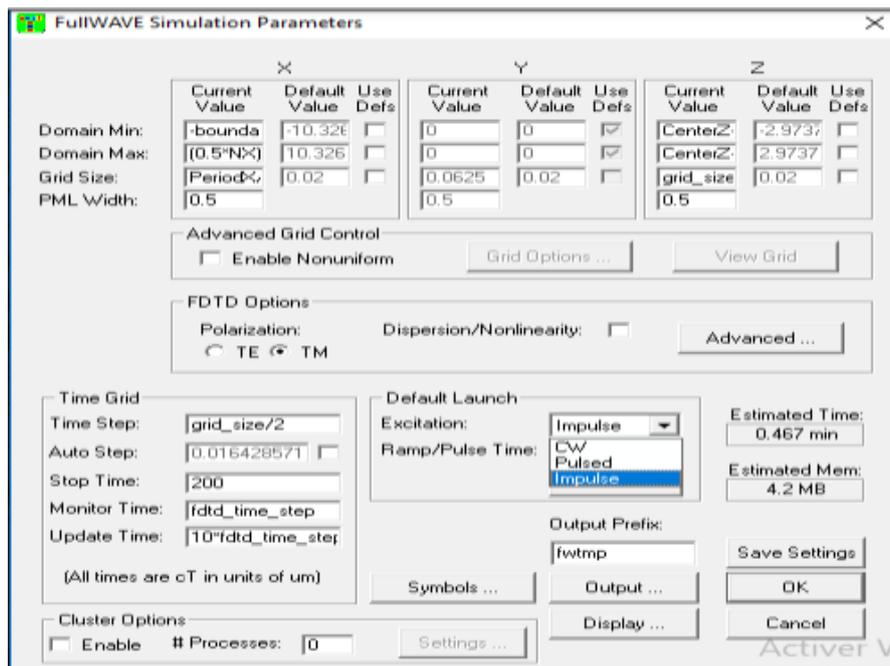


Figure III.3 : Fenêtre du simulateur FullWAVE.

### III.4. Structure sans défauts :

Dans cette étude, la structure que nous avons proposée est conçue en utilisant un cristal photonique bidimensionnel formé par des piliers de silicium ( $n_{Si}=3.9$ ) plongés dans l'air ( $n_{air}=1$ ). Ces piliers ont une section circulaire réparties selon un réseau triangulaire de période  $a=0.63\mu\text{m}$  ( $a$  est la distance entre le centre de deux motifs adjacents) et de rayon  $r=0.106\mu\text{m}$ . Le nombre de tiges dans les directions X et Z est de 27 et 21, respectivement. Le schéma de la structure est reporté sur la figure III.4.

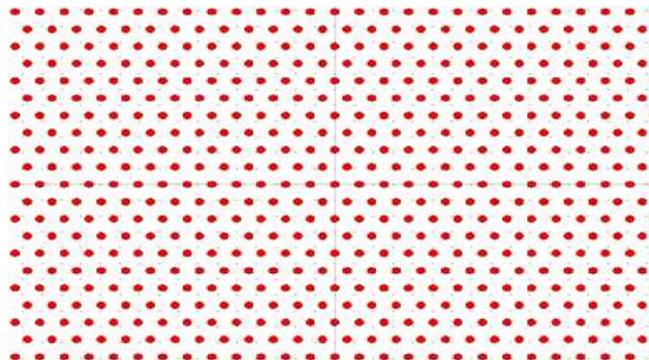


Figure III.4 : Structure sans défauts

## Chapitre III : Résultats et interprétations

Le diagramme de dispersion du cristal photonique sans défaut est calculé en utilisant le simulateur BandSolve basé sur la méthode des onde plane. En fonction de ce calcul, nous pouvons déterminer les bandes interdites photoniques (BIPs) du cristal considéré. Le diagramme obtenu est représenté sur la figure III.5. Sur cette figure, on observe l'apparition de deux bandes interdites photoniques en polarisation TE et TM, et entre ces deux bandes, c'est la plus grande qui sera exploitée. De la figure 3.3, il est clair que le plus grand gap photonique est en polarisation TM. Il est situé entre  $0.275 < a/\lambda < 0.465$  correspondant aux longueurs d'onde  $1.355\mu\text{m} < \lambda < 2.3\mu\text{m}$ . Dans ce cas, une onde électromagnétique incidente dans le plan perpendiculaire au réseau des tiges sera réfléchi, si sa fréquence est comprise dans l'intervalle spectral précédent.

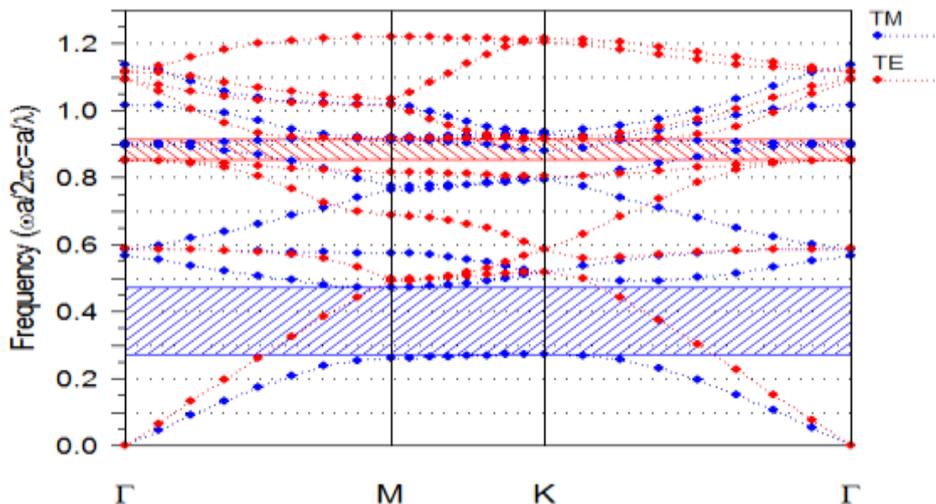


Figure III.5 : Diagramme de bandes d'un CP-2D

### III.5. Filtre Channel-drop à base de résonateur en anneau à cristal photonique :

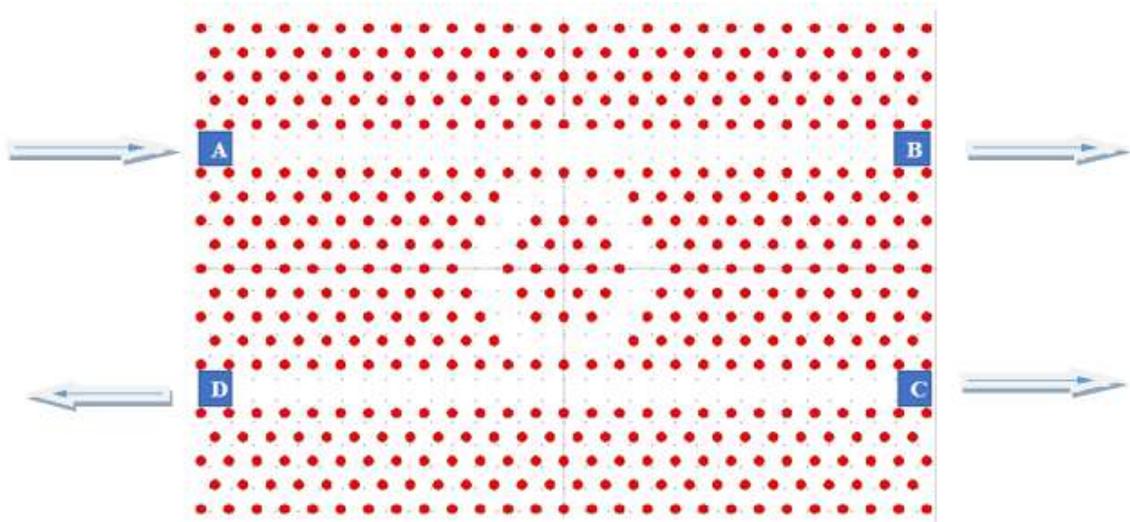
#### III.5.1.1. Structure de base :

La structure de base du filtre à extraction (channel drop filter) est illustrée sur la figure III.6. Elle est composée de deux guides d'ondes entre lesquels est positionné un résonateur en anneau à cristal photonique (PCRR) en forme d'hexagone. 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 (guide d'entrée) est appelé guide d'onde bus. Tandis que le deuxième guide (guide de sortie) est appelé guide d'onde drop.

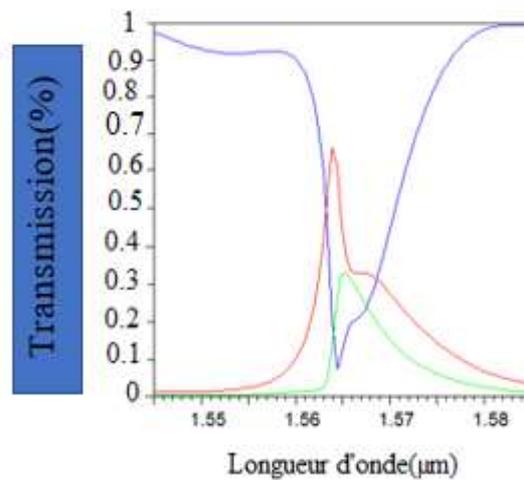
## Chapitre III : Résultats et interprétations

Les tiges situées à l'intérieur du PCRR sont appelées tiges intérieures ; tandis que les tiges de couplage 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.



**FigureIII.6** : La structure de base du filtre à extraction (channel drop filter).



**FigureIII.7**: La réponse spectrale du filtre CDF .

## Chapitre III : Résultats et interprétations

Le calcul de la méthode 2D-FDTD fait par le logiciel FullWave de RSoft, permet de tracer le spectre de transmission de notre composant. 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  $\lambda=1.56395\mu\text{m}$ .

L'apparition de ce mode, ne peut provenir que du transfert d'une partie de la lumière du guide bus vers l'arrière dans le guide drop par l'intermédiaire du résonateur à une longueur d'onde spécifique (résonance). Au même temps, l'analyse spectrale du signal transmis à travers le guide bus, fait apparaître un creux de transmission qui coïncide spectralement avec le mode du résonateur.

A partir du calcul précédent, nous pouvons analyser les caractéristiques du filtre, qui sont l'efficacité d'extraction et le facteur de qualité. Dans ce cas, l'efficacité d'extraction enregistrée au pic  $\lambda=1.56395\mu\text{m}$  est de 68 % avec un facteur de qualité égal à  $Q=446.84$ . Ce faible taux de transmission est dû aux pertes par courbure des coins du résonateur et des pertes de couplage (transfert entre les guides d'onde et le 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.

Afin d'optimiser les performances du filtre proposé, plusieurs paramètres doivent être pris en considération tels que la taille du résonateur, sa géométrie, ses contours, la distance de couplage entre le résonateur et les guides d'ondes.

### III.5.1.2. Structure modifiée :

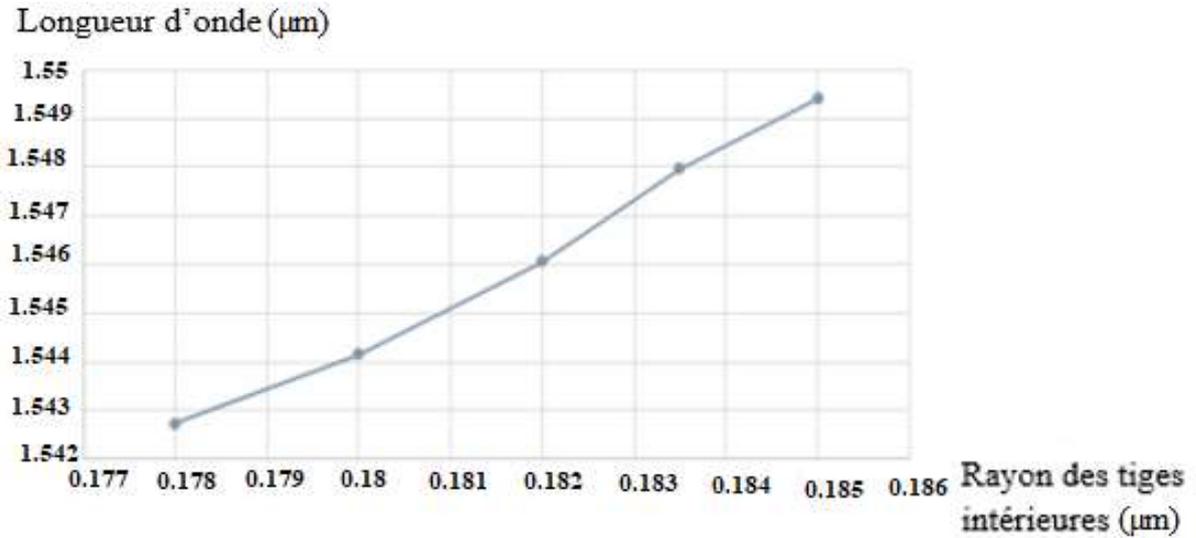
Afin d'améliorer les caractéristiques du filtre channel drop proposé à la longueur d'onde désirée ( $\lambda=1.55\mu\text{m}$ ), nous considérons deux cas de structures modifiées :

#### Premier cas : Modification du rayon des tiges intérieures

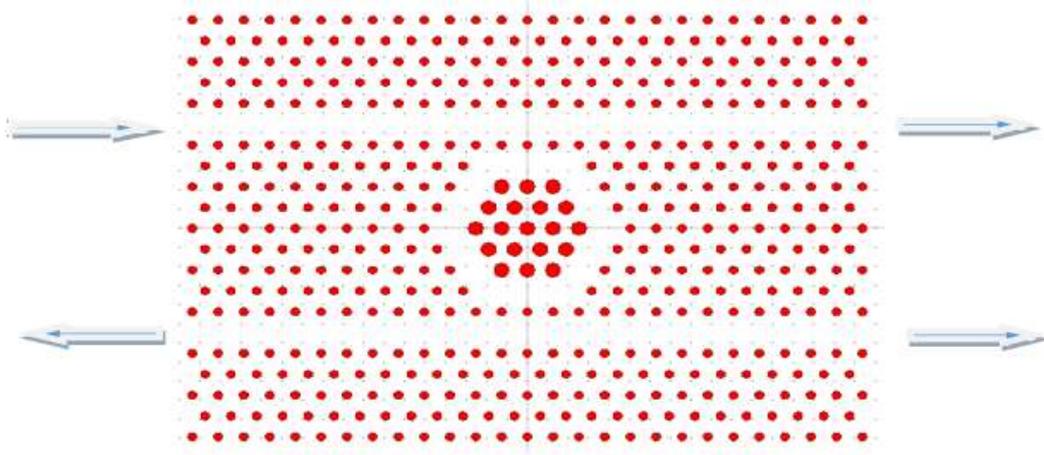
Afin d'ajuster la longueur d'onde de sortie du filtre aux alentours de  $\lambda=1.55\mu\text{m}$ , nous avons modifié la taille (R) des tiges localisées à l'intérieur du résonateur. Pour choisir la meilleure taille des tiges intérieures, la structure est simulée en variant R dans l'intervalle de  $0.178\mu\text{m}$  à  $0.185\mu\text{m}$ . La figure III.8 représente la dépendance entre la longueur d'onde de sortie et la taille des tiges intérieures. Il est clair sur cette figure que lorsque la taille du rayon R augmente, la longueur d'onde de résonance se décale vers les grandes longueurs d'onde.

## Chapitre III : Résultats et interprétations

Dans ce cas, la taille du rayon des tiges intérieures retenue est  $R=0.1835 \mu\text{m}$  pour la longueur d'onde  $\lambda=1.54798\mu\text{m}$ .



**FigureIII.8** : La dépendance entre la longueur d'onde de sortie et la taille des tiges intérieures.

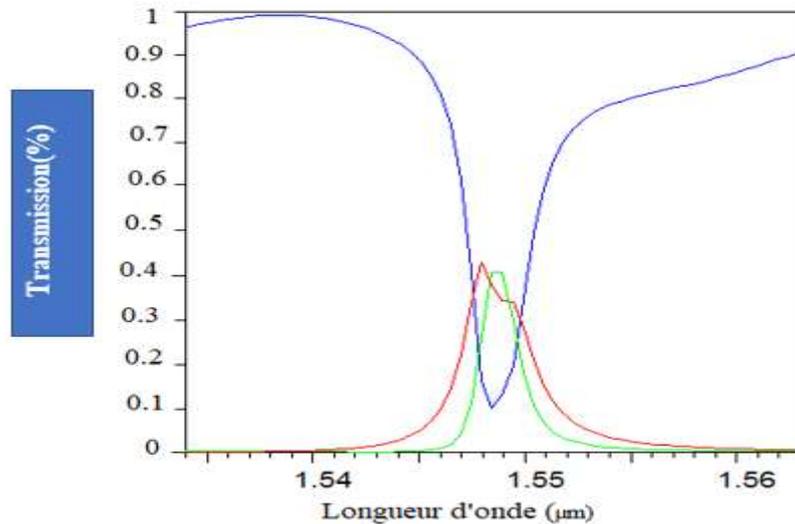


**FigureIII.9** : Structure avec Modification du rayon des tiges intérieures.

Après avoir changé le rayon de toutes les tiges intérieures à  $R=0.1835 \mu\text{m}$  dans la figure III.9, nous avons calculé le spectre de transmission de notre filtre. Le résultat obtenu est illustré sur la figure III.10. D'après cette figure, on relève une efficacité d'extraction de 43.35 % à  $\lambda=1.54798 \mu\text{m}$  avec un facteur de qualité de  $Q= 516$ . Dans ce qui suit, nous allons proposer

## Chapitre III : Résultats et interprétations

d'autres structures optimisées dans le but d'améliorer les caractéristiques du filtre et d'ajuster sa longueur d'onde de fonctionnement.

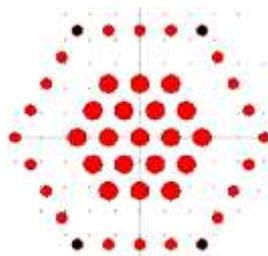


**Figure III.10:** La réponse spectrale du filtre CDF avec modification du rayon des tiges intérieures.

### Deuxième cas : Modification du rayon des tiges 's'

Cette technique a été inspirée des travaux de recherche du groupe Zhang et al. [19] réalisés en 2014. Elle permet d'améliorer non seulement l'efficacité d'extraction de notre filtre, mais aussi le facteur de qualité Q tout en gardant le mode résonant aux alentours de 1.55  $\mu\text{m}$ .

Cette méthode est basée sur la modification du rayon des tiges 's': ce sont des motifs qui appartiennent à la zone de couplage, et qui sont situées aux quatre coins externes du résonateur comme le montre la figure III.11.

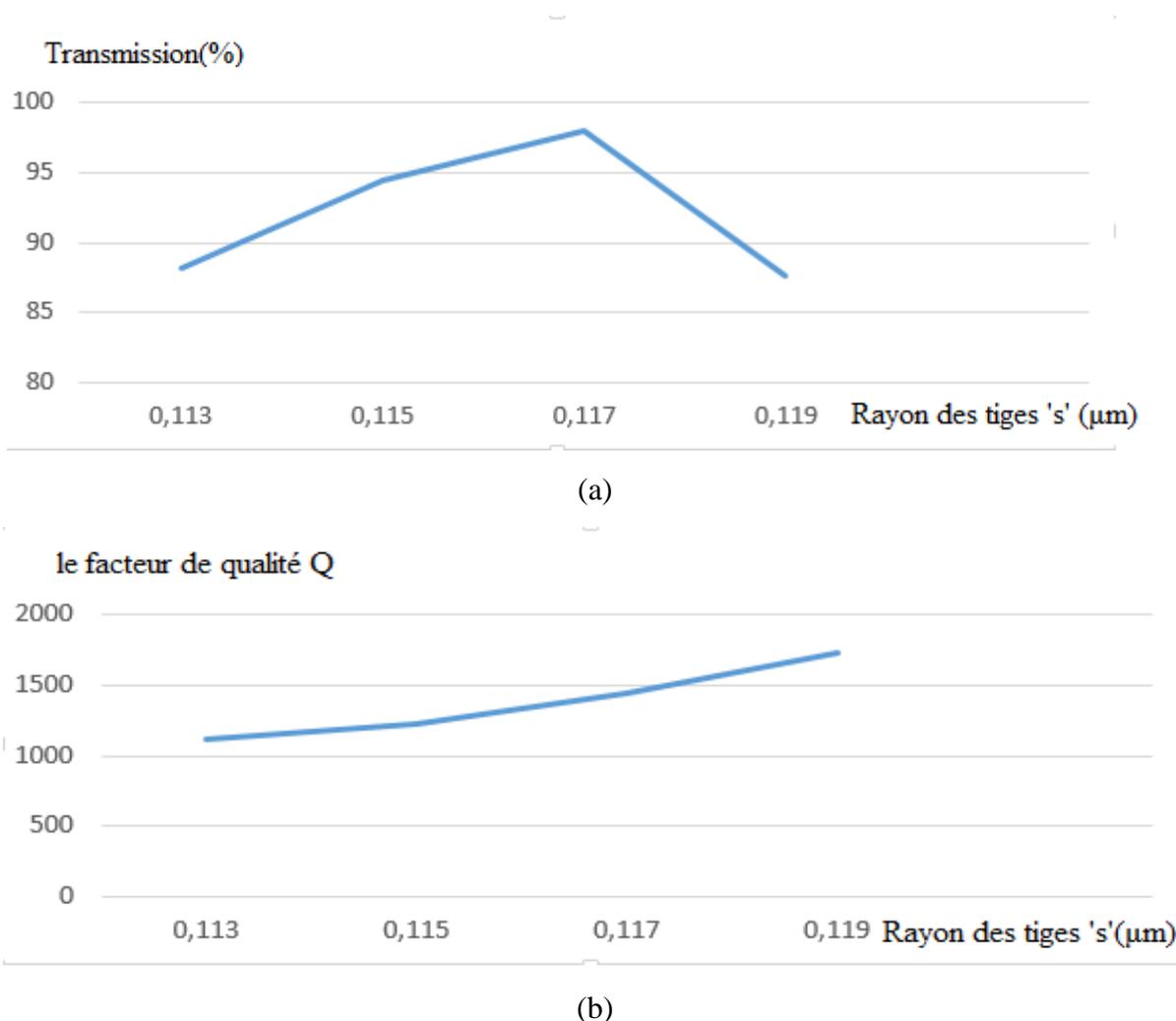


**Figure III.11 :** Résonateur avec Modification du rayon des tiges 's'.

## Chapitre III : Résultats et interprétations

Avant de procéder à la variation du rayon des quatre tiges 's', nous fixons d'abord le rayon R des tiges intérieures à la valeur trouvée précédemment qui est  $R = 0.1835 \mu\text{m}$ . Ensuite, nous avons étudié l'influence de l'augmentation du rayon  $r_s$  des tiges 's' sur l'efficacité d'extraction et le facteur de qualité du mode résonant. Sur la figure 4.11.a, nous pouvons noter qu'une efficacité d'extraction maximale de 98 % est observée pour  $r_s = 0.117 \mu\text{m}$ . Le facteur de qualité, quant à lui, est représenté sur la figure 4.11.b. Le facteur Q maximum que nous avons calculé  $Q = 1736.7$  apparaît à  $r_s = 0.119 \mu\text{m}$  avec une faible transmission (87.64 %).

Donc, on pourrait choisir l'efficacité d'extraction de 98 % et le facteur Q de 1446.8 du mode résonant situé à  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  obtenu pour le rayon  $r_s = 0.117 \mu\text{m}$  comme résultat optimal en raison de son facteur Q et sa transmission relativement élevés.

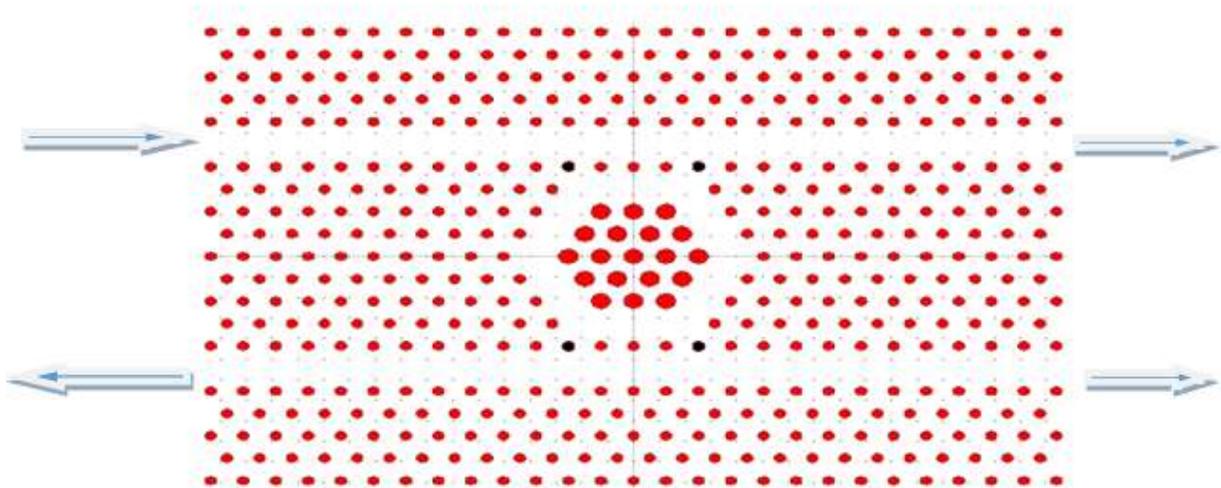


**Figure III.12 :** (a) La dépendance entre le rayon des tiges 's' et le taux de transmission, (b) La dépendance entre le rayon des tiges 's' et le facteur de qualité Q.

## Chapitre III : Résultats et interprétations

### III.3.1.3. Structure finale :

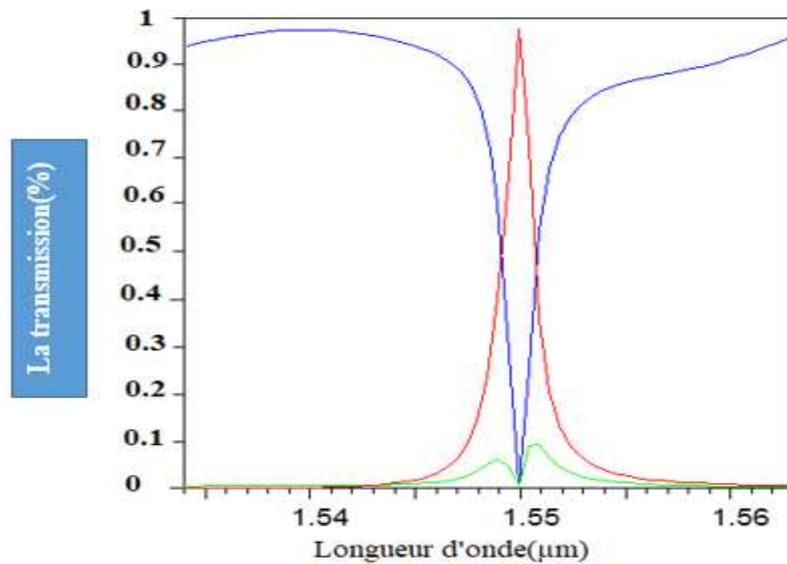
En se basant sur les résultats obtenus précédemment, la figure III.11 illustre la structure finale du filtre à extraction. Elle est composée de deux guides d'onde couplés par l'intermédiaire d'un résonateur en anneau à cristal photonique de forme hexagonale. Le rayon des tiges intérieures  $R=0.1835 \mu\text{m}$  ; tandis que le rayon des tiges 's' est égal à  $r_s = 0.117 \mu\text{m}$ .



**Figure III.13 :** Structure finale

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.13. Les résultats de la 2D-FDTD montrent qu'il est possible d'extraire presque 98 % du signal du guide d'onde bus et de le transférer vers l'arrière dans le guide d'onde drop (port D) via le résonateur. Elle est nettement améliorée par rapport au cas du filtre sans la modification des rayons des huit tiges autour du résonateur, où la transmission était seulement de 68% (figure III.7). On note également une amélioration dans la valeur du facteur de qualité, elle est de 1446.8, alors que sa valeur calculée pour la structure non optimisée était seulement de 446.84. Par conséquent, l'amélioration de l'efficacité d'extraction et du facteur de qualité es due à la diminution des pertes par courbure des coins du résonateur et des pertes de couplage, attribuées à l'effet des tiges modifiées. Cette modification permet aussi d'ajuster la longueur d'onde de sortie du filtre à  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ .

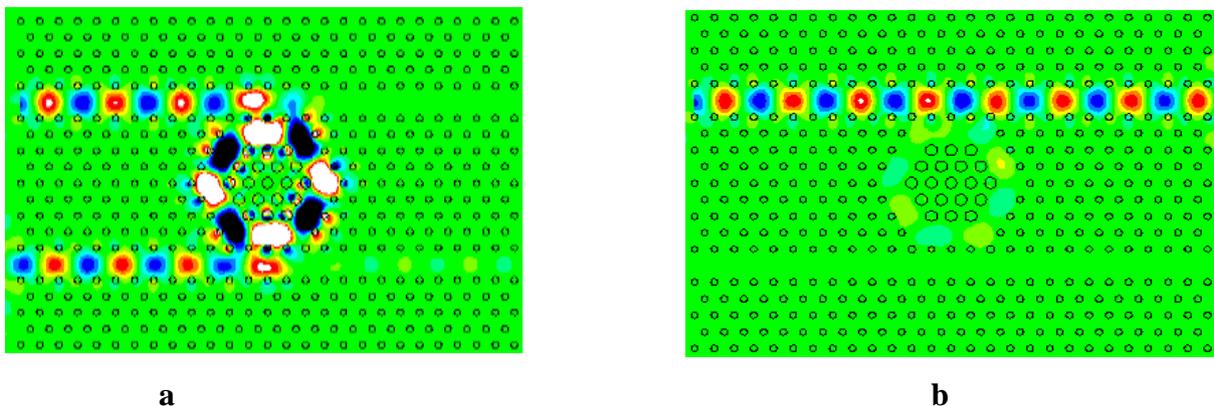
## Chapitre III : Résultats et interprétations



**Figure III.14 :** La réponse spectrale du filtre CDF de la structure finale.

Afin de démontrer la performance du CDF, la distribution du champ en polarisation *TM* dans le composant, pour deux longueurs d'onde  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ , à la résonance, et à  $\lambda = 1.54 \mu\text{m}$ , hors résonance, est donnée dans la figure III.14.

A la résonance, la lumière extraite du guide d'onde bus est transmise, par l'intermédiaire du résonateur, vers l'arrière dans le guide d'onde drop (figure III.14.a). Hors résonance, le signal ne se couple pas au résonateur et continue de se propager dans le guide bus (figure III.14.b).



**Figure III.15:** Répartition du champ dans le CDF en polarisation *TM* aux longueurs d'onde :  
(a)  $1.55 \mu\text{m}$  (à la résonance) et (b)  $1.54 \mu\text{m}$  (hors résonance).

## Chapitre III : Résultats et interprétations

### III.4. Paramètres affectant les caractéristiques du filtre :

En plus de l'importance d'obtenir une efficacité d'extraction élevée et un bon facteur de qualité, la possibilité de concevoir un filtre à extraction accordable est grandement souhaitée. En effet, la majorité des applications des CDFs est basée sur la faisabilité de varier sa longueur d'onde de fonctionnement. Dans cette partie, nous allons démontrer que la longueur d'onde de sortie du filtre proposé peut être modifiée en variant les paramètres structurels tels que l'indice de réfraction, le pas du réseau, et le rayon des tiges de la structure. Cela doit être démontré sans un changement notable dans les caractéristiques de notre filtre.

Nous entamons notre étude par la modification de l'indice de réfraction des tiges de toute la structure. La variation de l'efficacité d'extraction, du facteur de qualité et le décalage de la longueur d'onde de fonctionnement du filtre sont indiqués dans le tableau III.1. A partir de ce tableau, on remarque lorsqu'on augmente 'n' la longueur d'onde de résonance se décale vers les grandes valeurs, sans oublier de noter qu'il y a une faible variation dans les caractéristiques du filtre.

n	$\lambda(\mu\text{m})$	Transmission (%)	Facteur (Q)
3.88	1.54702	98.78	1365.4
3.9	1.55	98	1446.8
3.92	1.55279	98.89	1514.9
3.94	1.55617	98.12	1549.7

**Tableau III.1:** Spécifications du CDF proposé pour différentes valeurs de l'indice de réfraction des tiges.

## Chapitre III : Résultats et interprétations

Ensuite, nous avons procédé à la variation du pas du réseau 'a'. La spécification complète des changements obtenus est résumée dans le tableau III.2.

On constate qu'en augmentant le pas du réseau, la valeur de la longueur d'onde de résonance se décale vers des valeurs plus élevées. On note également une légère modification dans les valeurs de la transmission et le facteur de qualité.

a(μm)	λ (μm)	Transmission (%)	Facteur (Q)
0.628	1.54654	97.83	1439
0.63	1.55	98	1446.8
0.634	1.55762	97.05	1453.2
0.637	1.56298	99.04	1451.3

**Tableau III.2:** Spécifications du CDF proposé pour différentes valeurs du le pas du réseau.

Finalement, nous avons modifié le rayon des tiges de toutes la structure. Le résultat est reporté sur le tableauIII.3. 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 légèrement affectés par cette variation.

r (μm)	λ (μm)	Transmission (%)	Facteur (Q)
0.103	1.54572	97.8	1378.2
0.106	1.55	98	1446.8
0.109	1.55655	98.5	1489
0.112	1.56431	98.05	1503.4

**Tableau III :** Spécifications du CDF proposé pour différentes valeurs des rayons des tiges de toutes la structure.

## **Chapitre III : Résultats et interprétations**

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. Ces résultats encourageants permettent d'envisager la conception d'un démultiplexeur à base de PCRRs, dont l'élément fondamental est le CDF proposé.

### **Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons conçu un filtre à extraction dans un cristal photonique bidimensionnel. Le mécanisme de filtrage est basé sur le couplage entre deux guides d'onde et un résonateur optique. Les propriétés de ce filtres ont été étudiées par simulations en utilisant le logiciel Fullwave qui utilise la méthode des différences finies dans le domaine temporel à deux dimensions. Les résultats obtenus confirment l'efficacité du composant conçu.

# **Conclusion générale**

# Conclusion générale

## Conclusion générale

A travers une recherche bibliographique, nous avons rappelé la théorie et les principes de base des cristaux photoniques, en nous focalisant sur les cristaux photoniques bidimensionnels. Ces derniers permettent de contrôler la propagation de la lumière dans des volumes restreints.

Le travail présenté dans ce mémoire a porté sur la conception et l'optimisation d'un filtre à extraction à cristaux photoniques bidimensionnel. Ce filtre est basé sur le couplage entre des guides d'onde et un résonateur en anneaux à cristaux photoniques (PCRR) de forme hexagonale. Ce filtre contient quatre ports, un port d'entrée et trois ports de sortie, un PCRR situé entre deux guides d'ondes parallèles. La structure proposée est créée en utilisant un cristal photonique bidimensionnel de piliers de silicium (Si) plongés dans l'air de sections circulaires réparties selon un réseau triangulaire. Pour modéliser un tel dispositif, nous avons utilisé les deux modules BandSolve et Fullwave du logiciel Rsoft.

Dans le but d'améliorer le fonctionnement de ce filtre, nous avons ajusté les paramètres permettant d'obtenir un facteur de qualité et une efficacité d'extraction les plus optimaux possible tel que : la modification du rayon des tiges de couplage et la variation de rayon des tiges internes. Un facteur de qualité et un taux de transmission de 1446.8 et 98 % ont été obtenus.

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 tel que le démultiplexeur en longueur d'onde.

**Références**

**bibliographiques**

## Références bibliographiques

- [1] E. Yablonovitch, Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics, Phys. Rev. Lett. 58, 2059, (1987).
- [2] E. Yablonovitch, T.J. Gmitter, and K.M. Leung. "Physical Review Letters 67(17), 2295–2298".
- [3] E. Yablonovitch, «Photonic band-gap crystals», J. Phys. Condens. Matter, vol.5, pp.2443-2460, (1993).
- [4] J.D. Joannopoulos, R.D. Meade, J.N. Winn, Photonic Crystal Molding the Flow of Light, Princeton University. Press, (1995).
- [5] D. Yohan, « Conception et études optiques de composants micro-photoniques sur matériaux III-V à base de structures à bande interdite de photon », thèse de doctorat, Lyon, (2001).
- [6] A. Amirouche, «Contribution à l'étude des microcavités à base des cristaux photoniques » , thèse de doctorat, Université Mohamed Seddik Ben Yahya– Jijel , (2017)
- [7] Graydon, Nature's nanostructures color wings and stones, Opto Lser Europe, 51, 36 June 1998
- [8] R. Zengerle, « Light Propagation in Singly and Doubly Periodic Planar Waveguides », Journal of Modern Optics, vol. 34, pp. 1589-1617, (1987).
- [9] J.D. Joannopoulos, R. D. Meade, J. N. Winn, Photonic Crystals- Molding the Flow of Light. Princeton University Press, Princeton, NJ, 2008.
- [10] Bendjelloul Rahima, "Etude et caractérisation
- [11] 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.
- TM TE
- [12] E. Yablonovitch, T. J. Gmitter et K.M. Leung, "Photonic band structure: the facecentered-cubic case employing non-spherical atoms", Physical Review Letters, Vol.67, n° 17, pp. 2295-2298, (1991).
- [13] Benaissa Fatima, "Etude et Simulation de La Propagation des Ondes Electromagnétiques dans les guides a cristaux Photoniques-Application aux fibres Optiques

- [14] S. Brahim, H. Hammoudi, « Conception de diviseur de faisceau à base des cristaux photoniques bidimensionnels », mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf M'sila, 2016/2017.
- [15] S. Noda, A. Chutnian et M. Imada, "Trap ping and e moisnsi of photons by anisgle de ct in a photonic bandgap structure," *Nature*, vol. 407, p.608-610,2000.
- [16] M. Plihal, A. A. Maradudin, "Photonic Band-Structure of 2-Dimensional Systems – the Triangular Lattice," *Phys. Rev. B*, vol. 44, pp. 8565–8571, 1991.
- [17] 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.
- [18] S. Fan, P. R. Villeneuve, and J. D. Joannopoulos, "Channel drop filters in photonic crystals," *Optics Express*, vol. 3, pp. 4–11, 1998.
- [19] A. Ramier, "Intégration de guides d'onde et microrésonateurs à mode de galerie par assemblage à puce retournée", Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Maîtrise en sciences appliquées, Université de Montréal, Canada, 2014
- [20] H. Kosaka, T. Kawashima, A. Tomita, M. Notomi, T. Tamamura, T. Sato et S. Kawakami. "Photonic crystals for micro lightwave circuits using wavelength dependent angular beam steering", *Applied Physics Letters*, vol. 74, n° 10, pp. 13701372. 1999.
- [21] T. Matsumoto, S. Fujita et T. Baba. "Wavelength demultiplexer consisting of Photonic crystal superprism and superlens". *Optics Express*, vol. 13, n° 26, pp. 10768-10776. 2005.
- [22] C.J.M. Smith, R.M. De La Rue, M. Rattier, S. Olivier, H. Benisty, C. Weisbuch, T.F. Krauss, R. Houdré et U. Oesterle. "Coupled guide and cavity in a two-dimensional photonic Crystal". *App. Phys. Lett.*, vol. 78, n°11, pp.1487. 2001.
- [23] S. Fan, P. R. Villeneuve, and J. D. Joannopoulos, Theoretical investigation of fabrication-related disorder on the properties of photonic crystals, *J. Appl. Phys.* **78**, 1415 (1995).
- [24] L. Ghisa, "Couplage de micro résonateurs. Applications aux fonctions optiques de traitement du signal". Thèse de Doctorat, Université de Rennes I, Rennes, 2008.
- [25] P.H. Merrer, "Élaboration de sources hyperfréquences à haute pureté spectrale à base de résonateurs optiques ". Thèse de Doctorat, Université Toulouse III, Toulouse, 2009.

- [26] G. Lenz et al. "Optical Delay Lines Based on Optical Filters," *IEEE J. Quantum Electron.* Vol. 37, no. 4, pp. 525-532, (April 2001).
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] S. Robinson, R. Nakkeeran, "Two dimensional Photonic Crystal Ring Resonator based Add Drop Filter for CWDM systems," *Optik*, vol. 124, pp. 3430-3435, 2013.
- [30] Wei-Yu, Tai-Wei Huang, Yen-Hsiang Wu, Yi-Jen Chan, Chia-Hung Hou, Hung-Ta Chien, and Chii-Chang Chen, "A Photonic crystal ring resonator formed by SOI nanorods," *Optics express*, Vol. 15; No
- [30] T. Barwicz, M. Popovic, P. Rakich, M. Watts, H. Haus, E. Ippen, H. Smith, "Microring-resonator based add-drop filters in SiN: fabrication and analysis," *Optics Express*, vol. 12, pp. 1437-1442, 2004.
- [31] H. Ren, C. Jiang, W. Hu, M. Gao, J. Wang, "Design and analysis of two-dimensional photonic crystals channel filter," *Optics Communication*, vol. 266, pp. 342-348, 2006.
- [32] 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.
- [33] F. L. Hsiao, C. Lee, « Nanophotonic biosensors using hexagonal nanoring resonators: computational study », *Journal of Micro-Nanolithography MEMS and MOEMS*, vol.10, n°1, p. 013001, 2011
- [34] M. Youcef Mahmoud, G. Bassou, A. Taalbi, Z. Mohamed Chekroun, "Optical channel drop filters based on photonic crystal ring resonators," *Optics Communications*, vol. 285, pp. 368-372, 2012

## Summary

The photonic crystals are both natural and artificial structures where the refractive index varies in one, two or three directions. They are also called photonic band gap materials (BPG), in which the light can no longer propagate.

The objective of this research is to design and optimize a channel drop filter two-dimensional photonic crystals optical filter especially a photonic crystal ring resonator based channel-drop filter (CDF). The filter is based on the coupling between two waveguides and a photonic crystal ring resonator. In order to improve the performance of the filter and adjust the wavelength at  $\lambda=1.55\mu\text{m}$ , we changed the geometric structure of the filter by changing the radius of the coupling rods and the inner rods.

### Keywords:

photonic crystals, photonic band gap, ring resonator, drop filter, quality factor, extraction efficiency.

## ملخص

البلورات الضوئية هي هياكل من صنع الإنسان أو طبيعية يختلف معامل انكسارها في اتجاه واحد أو اتجاهين أو ثلاثة. وتسمى أيضًا مواد فجوة النطاق الضوئية (BIP) التي لم يعد ينتشر فيها الضوء.

الهدف من هذا العمل هو تصميم مرشح استخراج في بلورات ضوئية ثنائية الأبعاد. يعتمد هذا المرشح على الاقتران بين دليلين موجيين ومرنان حلقة بلورية فوتونية. من أجل تحسين أداء المرشح المصمم وضبط الطول الموجي الناتج إلى  $\lambda = 1.55$  ميكرومتر ، قمنا بتغيير الهيكل الهندسي للمرشح عن طريق تغيير نصف قطر قضبان التوصيل والقضبان الداخلية.

### الكلمات الدالة:

البلورات الضوئية ، فجوة النطاق الضوئية ، مرنان الحلقة ، مرشح الإسقاط ، عامل الجودة ، كفاءة الاستخراج.

