

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 Des Télécommunications

Thème

**Conception d'un filtre optique à base de cristaux
photoniques bidimensionnels pour les
Systèmes WDM.**

Préparé par :

SAOUDI Zine eddine.

BOUNEHAR Sabrina.

Dirigé par :

Mme. Bendjelloul Rahima

Examiné par :

Mme Hamzaoui Dehbia

Mme Bouncer Samira

Année universitaire : 2021/2022.

Remerciements

Tout d'abord nous remercions le BON DIEU de nous avoir aidés à accomplir ce
modeste travail

Nous ne saurions réellement, trouver les expressions éloquentes que mérite
notre encadrante « Mme : BENDJELLOUL », afin de la remercier pour sa
sympathie, encouragements, aides, dévouements et pour son travail et sa
présence totale.

Nous tenons à remercier vivement « Mme : HEMZAOUI » et « Mme : BOUNCER
» de l'université de Bejaia d'avoir l'intérêt d'examiner notre travail et l'enrichir
par leurs propositions.

Nous pourrions passer outre notre reconnaissance envers nos parents, nos
sœurs et nos frères, leur présence, leur écoute, leur confiance en nous et leur
soutien, grâce à eux nous avons pu surmonter et surpasser tous les obstacles.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont
participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail et ma profonde gratitude A tous ceux qui se sont sacrifié pour m'offrir les conditions propices à ma réussite : A mon cher père Moussa A ma chère mère Chafika A mon frère Billel A ma Sœur Ferial A mes tantes Nana Farida et Ziza et Dada Moumouh et Mehdi et Raouf, Tous Mes amis particulièrement Menzou, Fouad, Salim, Yanis, Islam, Abdou, Akram, Ma binôme Sabrina et tout le soutien de la Chère Ania et toute personne qui aime le savoir et défie les difficultés.....

Zine eddine.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail et ma profonde gratitude à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin
durant mon cursus universitaire,

A mes parents,

Mon père, En signe d'amour, de reconnaissance et de gratitude pour tous les soutiens et les Sacrifices dont
il a fait preuve à mon égard.

Ma mère, Ma raison d'être, ma raison de vivre, la lanterne qui éclaire mon chemin et m'illumine de
douceur et d'amour.

A mes chers frères : Rachid, Housseem, Lamine, Assaad

Qui m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours.

A ma grand-mère Cherifa, mes tantes Chafiaa, Samia, Mes cousins et cousines : Tinhinane, Massi, Nadjat

Qui ont toujours été là pour moi.

À la mémoire de mon grand-père qui nous a quitté.

J'espère que du monde qui est sien maintenant il 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.

A mon binôme Zinou,

Pour son aide et support durant les moments difficiles.

A mes amis(es) : Sarah(s), Daouia, Akram, Rahma, Fouad, Halim, Siham, Khaled, Baboul, Khoudir, Assia,
Anouar, Zaynas, Mona, Lamia, Yasmine, Mira, Nabil, Houssam

Aux étudiants et les profs du département télécoms et toute la promotion 2022.

Je vous aime

Sabrina.

Table des matières

Liste des figures	i
Liste des tableaux	ii
Introduction générale	1

Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques

I.1 Introduction	3
I.2 Définition des cristaux photoniques	3
I.3 Analogie électron-photon	3
I.4 Types des cristaux photoniques	5
I.4.1 Cristaux photoniques unidimensionnels	6
I.4.2 Cristaux photoniques bidimensionnels	7
I.4.2.1 Les différentes familles des cristaux photoniques bidimensionnelles	7
I.4.2.2 Diagramme de bandes.....	8
I.4.2.3 Polarisation de l'onde électromagnétique.....	9
I.4.2.4 Réseaux réciproques.....	10
I.4.2.5 La zone de Brillouin.....	11
I.4.3 Les cristaux photoniques tridimensionnels.....	11
I.5 Les défauts dans les cristaux photoniques	12
I.5.1 Les défauts ponctuels	12
I.5.2 Les défauts linéaires	13
I.6 Applications.....	13
I.6.1 Diviseur de puissance à cristaux photoniques.....	13

I.6.2 Fibres optiques.....	14
I.7 Techniques de modélisation.....	15
I.7.1 La méthode des ondes planes	15
I.7.2 La méthode des Différences finies dans le domaine temporel FDTD.....	16
I.8 Conclusion	16
Bibliographie	17

Chapitre II : Filtrés optiques à Cristaux photoniques

II.1.Introduction.....	19
II.2 Filtre optique.....	19
II.3 Filtrés optiques à base de cristaux photoniques	20
II.3.1 Cavités à cristaux photoniques.....	20
II.3.1.1 Facteur de qualité	21
II.3.1.2 Types des cavités.....	22
II.4 Différentes configurations des CDFs à base de cavités à CPs.....	23
II.5 Application des filtrés à extraction à base de cristaux photoniques	24
II.5.1 Démultiplexeurs à base de cristaux photoniques	24
II.5.1.1 Quelques topologies	25
II.6 Conclusion	27
Bibliographie	28

Chapitre III : résultats et interprétations

III.1 Introduction.....	29
III.2 Présentation de l'outil de simulation	29
III.2.1 Simulateur BandSOLVE.....	30
III.2.2 Simulateur FullWAVE	31

III.3 Filtre drop à base de cavité à cristaux photoniques	31
III.3.1 Structure d'étude.....	31
III.3.2 Structure non optimisée	32
III.3.3 Optimisation du filtre	34
a) Distance de couplage	34
b) Modification de la longueur du réflecteur.....	35
III.4 Démultiplexeur à base des cristaux photoniques	37
III.5 Conclusion	41
Bibliographie	42
Conclusion générale.....	43
Résumé.	

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I :

Figure I-1 : représentation Schématique de cristaux photoniques 1D, 2D ou 3D.

Figure I-2 : Structure unidimensionnelle.

Figure I-3 : Structures bidimensionnelles : (a) connectée, (b) déconnectée.

Figure I-4 : Structures 2D : (a) carré, (b) triangulaire et (c) hexagonale.

Figure I-5 : Diagrammes de bandes d'une structure bidimensionnelle pour les polarisations TE (en rouge) et TM (en bleu).

Figure I-6 : Définition des polarisations pour les cristaux photoniques 2D.

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

Figure I-9 : Défauts ponctuels : (a) Défaut lacunaire, (b) et (c) Défauts de substitutions.

Figure I-10: Exemples de défauts linéaires dans un cristal photonique 2D créés (a) en omettant une seule rangée de motifs, (b) en modifiant l'indice de réfraction d'une seule rangée de motifs, (c) en variant le rayon d'une seule rangée de motifs de la structure.

Figure I-11 : (a) exemple d'un diviseur de puissance en T, (b) exemple d'un diviseur de puissance en Y.

Figure I-12 : Image par microscopie électronique d'un prototype de fibre optique conçu sur la base d'un cristal photonique.

CHAPITRE II :

Figure II.1: Illustration du couplage frontal entre un guide et une cavité d'un même cristal photonique.

Figure II.2 : Illustration du couplage latéral entre un guide et une cavité d'un même cristal photonique.

Figure II.3: Réponse spectrale d'une cavité.

Figure II.4 : Images MEB des cavités (a) de type H₂ et (b) de type L₃.

Figure II.5 : (a) Filtre à base de cavité linéique (b) son spectre de transmission.

Figure II.6 : structure d'un démultiplexeur accordable basé sur l'utilisation d'un résonateur de filtrage.

Figure II.7: Démultiplexeur à 8 canaux.

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

Figure II.9: (a) Structure schématique du démultiplexeur proposé par [11] et (b) son spectre de transmission.

Chapitre III

Figure III.1 : fenêtre du programme RSoft CAD.

Figure III.2 : Fenêtre du module BandSOLVE.

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

Figure III.4 : (a)Structure sans défauts, (b) : Diagramme de bandes de la structure d'étude.

Figure III.5 : (a)Représentation schématique d'un filtre à base de cavité à cristaux photoniques. (B)le spectre de transmission pour $r=0,1005\mu\text{m}$.

Figure III.6 Spectre de transmission du filtre pour $D=3$.

Figure III.7 : (a)structure schématisée pour $L=4$ et $D=2$, (b) spectre de transmission pour la structure schématisée.

Figure III.8: Répartition du champ dans le filtre à extraction à $\lambda=1.55\mu\text{m}$.

Figure III.9: Représentation schématique du démultiplexeur proposé.

Figure III.10 : Spectre de transmission du démultiplexeur proposé pour $L= 4$.

Figure III.11 : Spectre de transmission du démultiplexeur pour $L=5$.

Figure III.12 : Répartition du champ dans le démultiplexeur aux longueurs d'onde : (a) $\lambda = 1.5503\mu\text{m}$, (b) $\lambda =1,5485\mu\text{m}$.

Liste des Tableaux

Tableau III.1 : la longueur d'ondes en fonction du Rayon.

Tableau III.2 : les caractéristiques d'un filtre à base d'une cavité résonante à fonction de la variation de la distance de couplage.

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

Tableau III.4: Caractéristiques du démultiplexeur proposé pour $L=4$.

Tableau III.5 : les caractéristiques d'un démultiplexeur pour $L=5$.

Introduction Générale

Ces dernières années, les matériaux à bande interdite photonique (BIP) ou cristaux photoniques ont attiré de nombreux chercheurs en science de la technologie, grâce à leurs propriétés optiques uniques qui ont suscité un intérêt important, offrant la possibilité de contrôler la propagation de la lumière. Le développement de ce nouveau type de matériau a ouvert la voie à un nouveau champ de recherche et à des possibilités d'applications très diverses.

Les cristaux photoniques sont des matériaux naturels ou artificiels dont l'indice de réfraction varie périodiquement dans les différentes directions de l'espace et constituent actuellement une nouvelle classe de matériaux. Ces matériaux peuvent en effet offrir aux photons le même comportement des électrons dans un réseau cristallin. Cette analogie permet d'envisager l'utilisation des cristaux photoniques pour confiner, localiser, filtrer ou bien guider la lumière : on parle alors du contrôle de la longueur d'onde des signaux optiques véhiculés, qui constitue une fonction clé des réseaux de télécommunications optiques.

Ainsi, le but de ce travail est l'étude et la caractérisation de composants à base de cristaux photoniques bidimensionnels et en particulier l'étude des filtres à extraction à base de cavités résonantes.

Ce mémoire s'articule autour de trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous commencerons par des notions générales sur les cristaux photoniques. Ensuite, nous présenterons un bref rappel sur le phénomène d'ouverture de bandes interdites et les différents types de cristaux photoniques, nous focaliserons notre étude sur les cristaux bidimensionnels (CPs-2D). Nous continuerons par une présentation des principaux défauts qui existent au niveau des cristaux photoniques. Enfin, Nous terminerons ce chapitre par quelques applications des cristaux photoniques.

Le deuxième chapitre sera consacré aux filtres à cristaux photoniques, à leur description, et à leur principe de fonctionnement, suivi d'une présentation de quelques configurations de ces filtres. La dernière section de ce chapitre sera consacrée aux démultiplexeurs à cristaux photoniques.

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**

I.1 Introduction

Au cours de la dernière décennie, les cristaux photoniques (PCs), appelés aussi matériaux à bande interdite photonique (BIP), ont fait l'objet de plusieurs articles de recherche. Ces structures sont des systèmes très prometteurs pour des applications dans le domaine des micro-ondes, optoélectronique et communication optique. Plusieurs composants à base de cristaux photoniques ont été réalisés sur des semi-conducteurs en utilisant les avancées technologiques de la microélectronique.

L'objectif de ce premier chapitre est de présenter les notions de bases liés aux cristaux photoniques. Nous débuterons par une définition de ces cristaux, puis nous présenterons l'analogie qui existe entre l'électron et le photon. Nous continuerons par une présentation des différents types des cristaux photoniques ainsi que leurs défauts. Nous verrons aussi leurs applications ainsi que les différentes techniques de modélisation utilisées pour l'étude de ces structures.

I.2 Définition des cristaux photoniques

Les cristaux photoniques ou matériaux à bandes interdites photoniques (BIP), sont des nanostructures périodiques de matériaux, diélectriques, semi-conducteurs ou métalliques dont la constante diélectrique varie périodiquement à l'échelle de la longueur d'onde selon une ou plusieurs directions de l'espace. La propriété principale des cristaux photoniques est l'existence de bandes de fréquences interdites, dans lesquelles la propagation de la lumière est interdite dans certaines directions et pour certaines fréquences, d'où l'appellation de matériaux à bandes interdites photoniques (BIPs). Cette propriété les rend intéressants pour de nombreuses applications en optique intégrée.

I.3 Analogie électron-photon

La théorie des cristaux photoniques s'inspire très largement de la similitude entre un photon qui se propage dans un cristal photonique et un électron dans un semi-conducteur. En effet, l'équation de Schrödinger, régissant le déplacement des électrons dans un matériau caractérisé par un potentiel périodique est analogue à l'équation de propagation, dérivée des équations de Maxwell, utilisée pour décrire la propagation d'une onde électromagnétique dans un matériau caractérisé par sa constante diélectrique périodique ϵ [1].

Dans le cas d'un milieu diélectrique, linéaire, isotrope, non magnétique, et en l'absence de charges et de courants, les équations de Maxwell s'expriment de la manière suivante [2] :

$$\nabla \cdot (\boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)) = 0 \quad (\text{I. 1})$$

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

$$\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} \quad (\text{I. 3})$$

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

Où \mathbf{E} et \mathbf{H} désignent respectivement les champs électrique et magnétique, ε est la permittivité relative appelée aussi la constante diélectrique, ε_0 et μ_0 représentent la permittivité diélectrique et la perméabilité magnétique du vide, \mathbf{r} et t représentent les dépendances spatiales et temporelles.

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

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

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)) = -\mu_0 \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}, t)) \quad (\text{I. 5})$$

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

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)) = -\mu_0 \varepsilon_0 \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{r}) \frac{\partial^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2} \quad (\text{I. 6})$$

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

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

On sait que :

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

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

On a aussi :

$$\Delta \mathbf{E}(\mathbf{r}) = \nabla^2 \mathbf{E}(\mathbf{r})$$

On aura donc :

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

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

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad \text{La vitesse de la lumière}$$

ω : Pulsation

L'équation de Schrödinger en régime stationnaire pour la fonction d'onde ψ d'un électron dans un potentiel V s'écrit sous la forme suivante [3] :

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

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

\hbar : est la constante de Planck réduite.

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

I.4 Types des cristaux photoniques

Les cristaux photoniques sont classés selon leur dimensionnalité en trois types : cristaux photoniques unidimensionnels (Figure I-1a), cristaux photoniques bidimensionnels (Figure I-1b) et cristaux photoniques tridimensionnels (Figure I-1c).

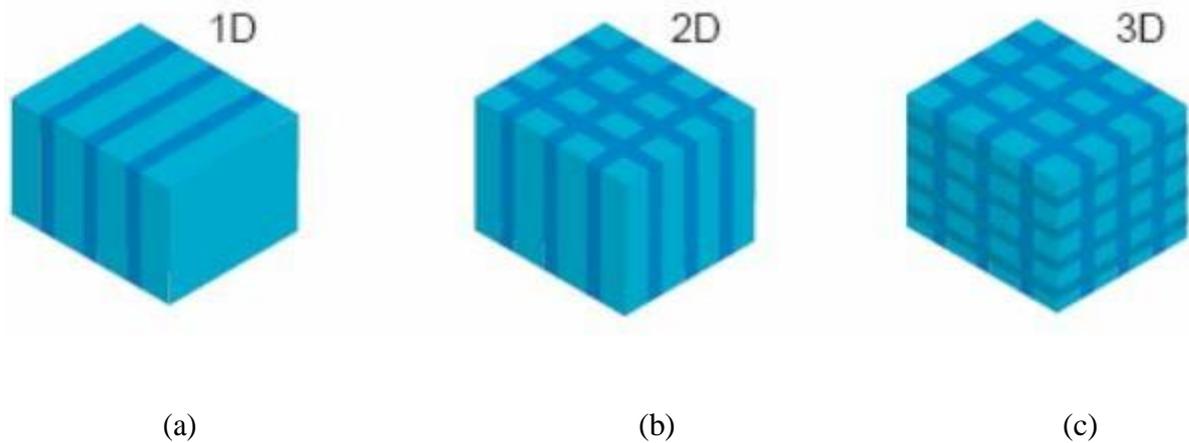


Figure I-1 : représentation Schématique de cristaux photoniques 1D, 2D ou 3D [4].

I.4.1 Cristaux photoniques unidimensionnels

Les cristaux photoniques 1D sont les plus simples à réaliser. Ils sont obtenus en empilant périodiquement des couches planes de diélectriques d'indices de réfraction différents. À chaque interface entre deux couches (Figure I-2), la lumière est partiellement réfléchi et transmise. Selon la valeur des déphasages on obtient des interférences destructives ou constructives. Les interférences constructives des ondes réfléchies entraînent une réflexion totale. Ainsi, à certaines longueurs d'onde, la structure des multicouches se comportent comme des miroirs [1].

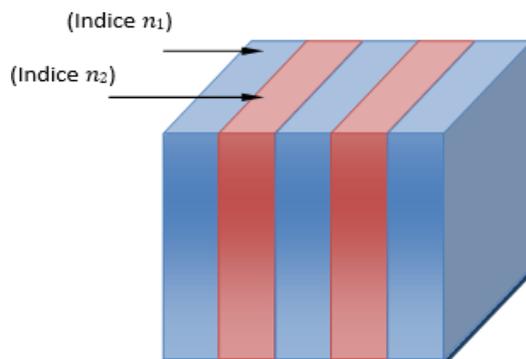


Figure I-2 : Structure unidimensionnelle.

I.4.2 Cristaux photoniques bidimensionnels

La difficulté de fabrication des structures 3D ont conduit à envisager la réalisation et l'étude des structures 2D, qui ont une modulation périodique de la permittivité diélectrique suivant deux directions de l'espace, et homogène dans la troisième. Les réponses optiques de ces structures dépendent de la polarisation de l'onde électromagnétique qui peut être soit de type TE (Transverse Electric) ou TM (Transverse magnétique), et peuvent ne pas posséder une bande interdite complète.

Il existe plusieurs façons de réaliser ces structures bidimensionnelles. Par exemple, on peut placer des tiges diélectriques dans l'air (structure déconnectée) ou encore dans un autre diélectrique (structure connectée), comme le montre la figure I.3. Afin d'ouvrir des bandes interdites larges, il faut un contraste d'indice (différence entre les indices du milieu et des tiges) suffisamment grand [5].

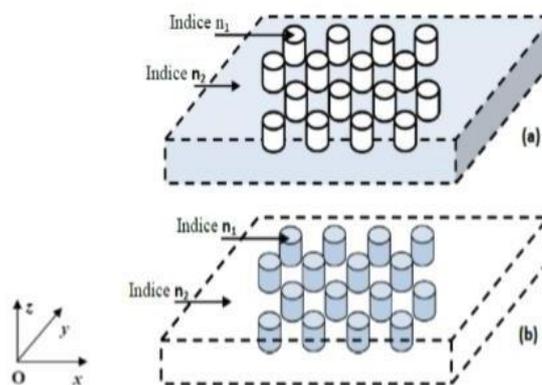


Figure I-3 : Structures bidimensionnelles : (a) connectée, (b) déconnectée [5].

I.4.2.1 Les différentes familles des cristaux photoniques bidimensionnelles

De nombreux théoriciens ont cherché à optimiser les paramètres des structures bidimensionnelles afin d'obtenir des bandes interdites complètes. Ces paramètres résident dans la forme du réseau selon lequel les motifs de la structure cristalline sont répartis. Dans ce cas, on distingue trois grandes familles des CPs-2D, comme le montre la figure I.4:

-Réseau carré : Les nœuds du réseau sont situés sur un carré de côté « a ».

-Réseau triangulaire : Chaque nœud du réseau est espacé de son proche voisin d'une même distance « a ».

-Réseau hexagonal : si tous les nœuds sont identiques et espacés de « a ».

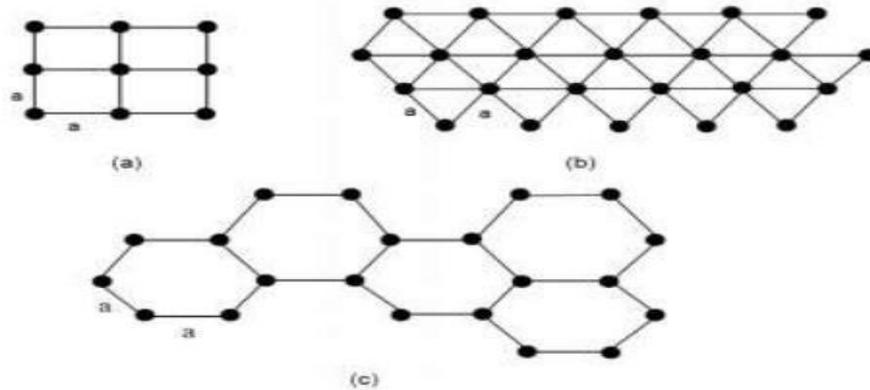


Figure I-4: Structures 2D : (a) carré, (b) triangulaire et (c) hexagonale [6].

I.4.2.2 Diagramme 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 [7], 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 présentons sur la figure I-5 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-5 représente :

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

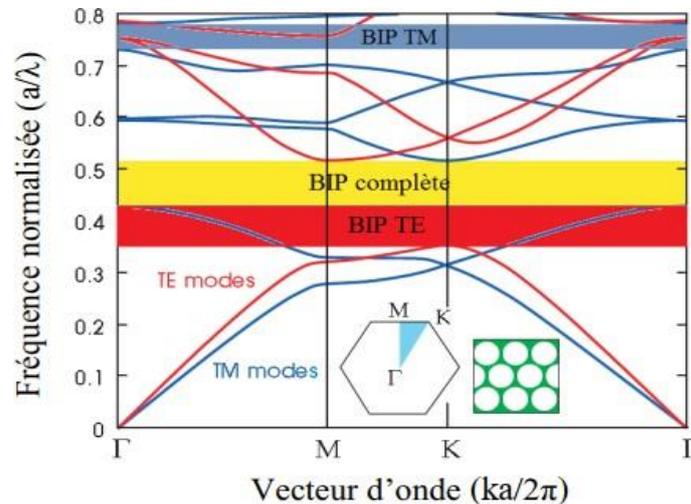


Figure I-5 : Diagrammes de bandes d'une structure bidimensionnelle pour les polarisations TE (en rouge) et TM (en bleu) [7].

Les bandes d'énergie autorisées ou interdites varient selon que la polarisation TE ou TM est prise en compte. Il existe donc un band gap TE et un band gap TM. Si la bande interdite photonique des polarisations TE et TM se chevauche, la bande interdite est dite parfaite. L'obtention de cette dernière nécessite un contraste d'indice de réfraction suffisamment important [8].

L'intérêt des cristaux photoniques vient de leur capacité à empêcher la propagation de la lumière. Il est donc préférable d'utiliser un cristal avec la bande interdite la plus parfaite possible.

I.4.2.3 Polarisation de l'onde électromagnétique

Les propriétés optiques des structures bidimensionnelles sont fortement dépendantes de la polarisation de l'onde électromagnétique. On peut séparer le champ électromagnétique en deux polarisations indépendantes, la polarisation TE (Transverse Electric) et la polarisation TM (Transverse Magnétique). En polarisation TE, le champ électrique (\vec{E}) est orienté dans le plan de périodicité et le champ magnétique (\vec{H}) n'a qu'une composante normale au plan. Dans ce cas, les composantes du champ électromagnétique sont (E_x, E_y, H_z), les autres

composantes étant nulles. En polarisation TM, les rôles de \vec{E} et (\vec{H}) sont permutés et le champ électromagnétique est de la forme (H_x, H_y, E_z) (Figure I-6) :

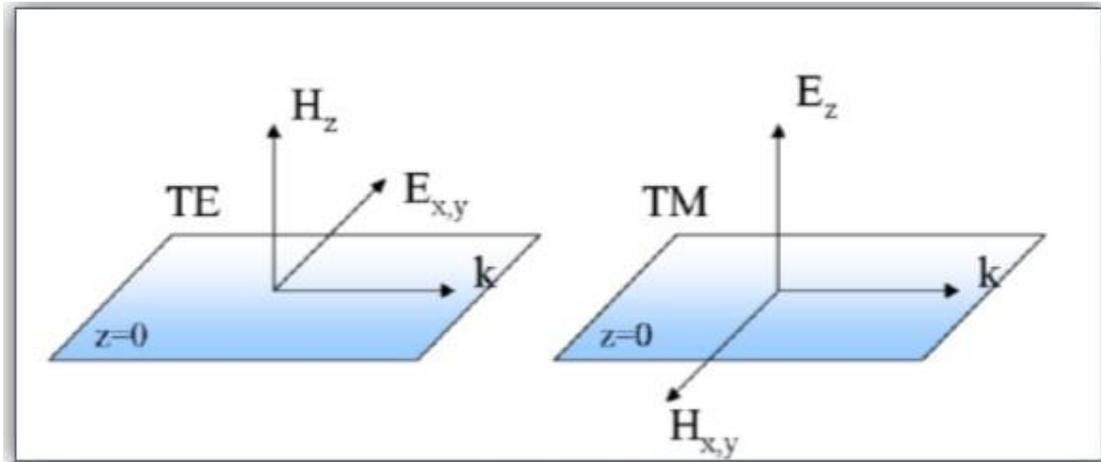


Figure I-6 : Définition des polarisations pour les cristaux photoniques 2D.

Les bandes énergétiques permises ou interdites seront différentes. Il existe donc une bande interdite TE et une bande interdite TM. Les bandes interdites qui apparaissent dans chaque cas doivent se superposer pour former une bande interdite totale. Elle empêche ainsi la propagation de l'onde incidente quelle que soit sa polarisation [9].

I.4.2.4 Réseaux réciproques

Beaucoup de propriétés des cristaux photoniques (CPs) sont directement compréhensibles par l'étude de leur diagramme de bandes. Pour les étudier, on utilise les notions de réseau réciproque et de zones de Brillouin. Le réseau réciproque d'un CP 2D est défini à partir du réseau réel par la relation suivante [1] :

$$a_i \cdot b_j = 2\pi \delta_{ij}$$

Où les a_i et b_j sont les vecteurs des réseaux réel et réciproques. δ_{ij} est le symbole de Kronecker.

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

I.4.2.5 La zone de Brillouin

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

On appelle zone de Brillouin irréductible la plus petite surface qui permet de déduire la relation de dispersion dans tout l'espace réciproque [1].

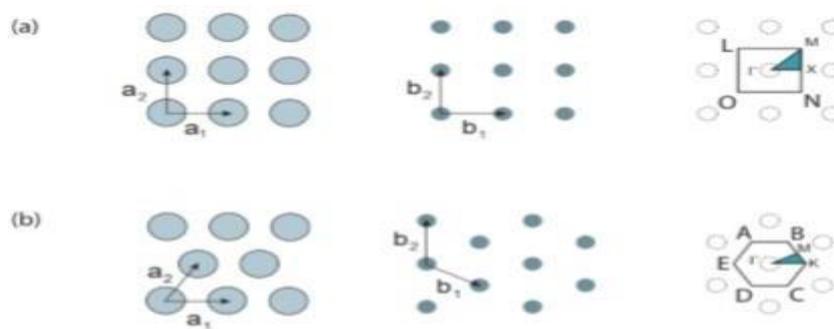


Figure I.7 : Réseau réel, réciproque, première zone de Brillouin et zone de Brillouin irréductible pour les réseaux 2D (a) carré et (b) triangulaire.

I.4.3 Les cristaux photoniques tridimensionnels

Les cristaux photoniques tridimensionnels (CPs-3D) sont des structures périodiques suivant les trois directions de l'espace. De nombreuses structures tridimensionnelles ont été proposées telles que la structure tas de bois, la structure cubique, spirale et la structure quasi-diamant (figure I-8). Cependant, il reste encore difficile d'envisager leur intégration en tant que composants dans des circuits photoniques intégrés. C'est pour cette raison que les cristaux photoniques 2D sont passés au premier plan.

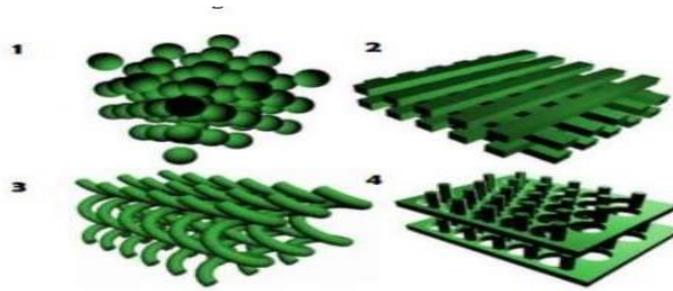


Figure I-8: Exemples de structures artificielles 3D : structure cubique (1), tas de bois (2), structure spirale (3), quasi-diamant (4)[10].

I.5 Les défauts dans les cristaux photoniques

La plupart des applications des cristaux tournent autour de la bande interdite photonique. Dans certains cas, des défauts doivent être introduits dans la structure périodique pour disposer d'une fréquence de propagation permise à l'intérieur de la bande de fréquences interdites. On distingue deux types de défauts : les défauts linéaires et les défauts ponctuels.

I.5.1 Les défauts ponctuels

Dans les cristaux photoniques bidimensionnels, il existe de multiples manières de créer des défauts ponctuels. On peut procéder au retrait, à l'ajout ou à la modification d'un ou plusieurs motifs du cristal, comme le montre la Figure I-9. Un défaut ponctuel dans un cristal photonique peut servir de cavité résonante, puisqu'il piège la lumière dans une bande de fréquence très étroite [5].

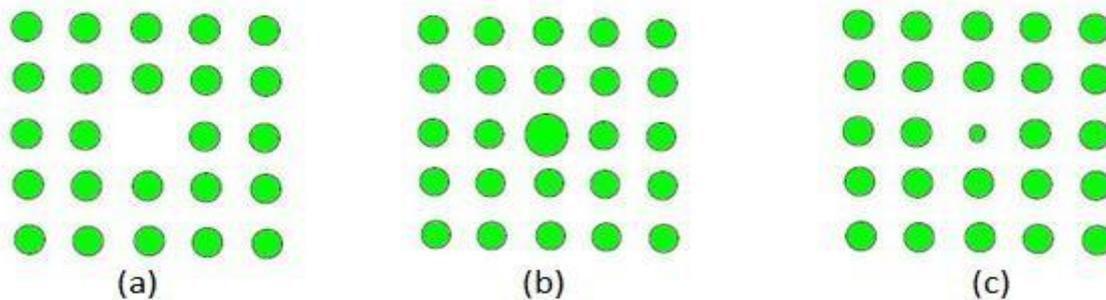


Figure I-9: Défauts ponctuels : (a) Défaut lacunaire, (b) et (c) Défauts de substitutions.

I.5.2 Les défauts linéaires :

Les défauts linéaires ou les défauts étendus sont créés dans les cristaux photoniques par la suppression ou la modification d'une ou de plusieurs rangées de motifs (trous ou de tiges), comme il est représenté sur la figure I-10. Au sein de ces défauts, des modes ayant une fréquence appartenant à la bande interdite photonique peuvent exister. Ces défauts peuvent servir de guides d'ondes pour orienter la propagation de la lumière dans une direction choisie.

On appelle W_n (W : abréviation de Waveguide) les guides d'ondes à cristaux photoniques, où n est le nombre de rangées de motifs manquants.

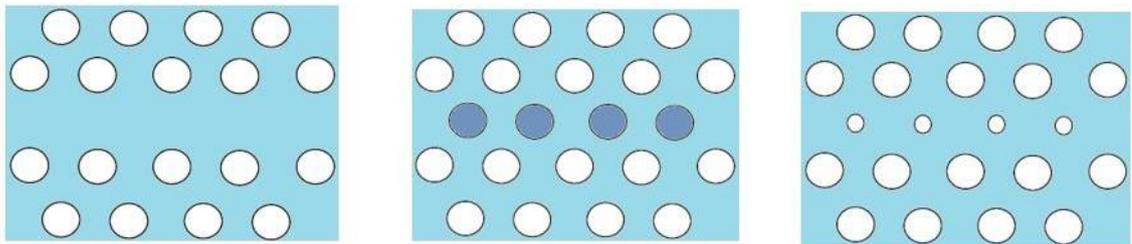


Figure I-10: Exemples de défauts linéaires dans un cristal photonique 2D créés (a) en omettant une seule rangée de motifs, (b) en modifiant l'indice de réfraction d'une seule rangée de motifs, (c) en variant le rayon d'une seule rangée de motifs de la structure.[1]

I.6 Applications :

La capacité des cristaux photoniques à manipuler, confiner et contrôler la lumière dans les trois dimensions de l'espace a de nombreuses utilisations. Ils sont principalement utilisés dans la conception de dispositifs qui utilisent des photons au lieu des électrons comme supports de l'information, pour reproduire les principes de fonctionnement des divers composants des circuits intégrés. Nous allons donc exposer brièvement deux exemples de composants à base de cristaux photoniques bidimensionnels.

I.6.1 Diviseur de puissance à cristaux photoniques :

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

* **La jonction T** : Elle contient un guide d'onde d'entrée juxtaposé avec une portion de guide plus large et multimode (figure I-11. a).

* **La jonction Y** : Ce type de diviseur a la forme d'un Y, il présente l'avantage d'offrir une réponse spectrale plate pour un intervalle de longueur d'onde très étendue (figure I-11. b).

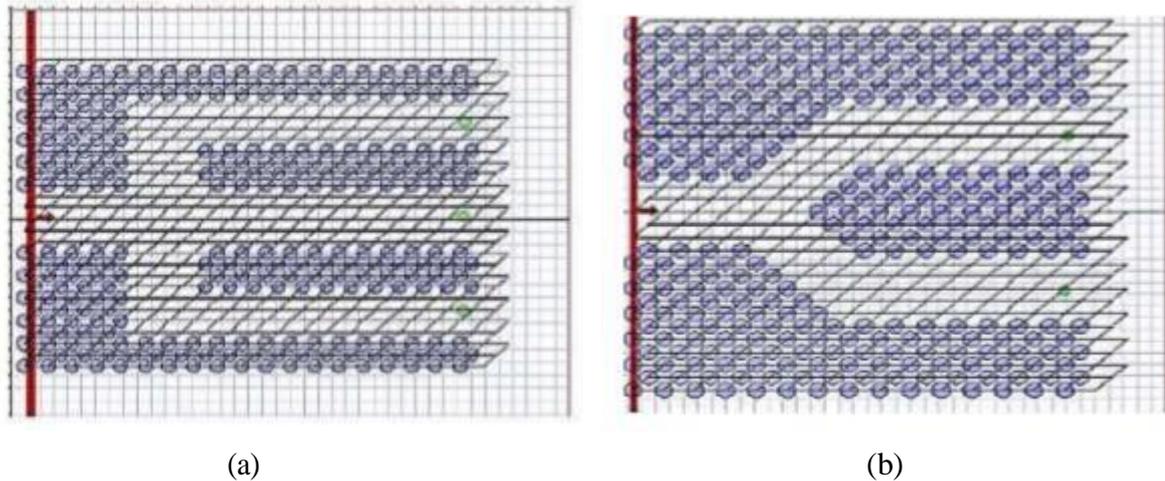


Figure I.11 : (a) exemple d'un diviseur de puissance en T, (b) exemple d'un diviseur de puissance en Y [11].

I.6.2 Fibres optiques :

La fibre à trous, ou fibre à cristal photonique (FCP) a été proposée pour la première fois en 1995 [12]. Cette fibre est constituée d'un cœur de silice pure entouré d'un arrangement régulier de canaux d'air de dimensions microscopiques, comme il est montré sur la figure (I.14). Son principe de fonctionnement est basé sur la présence de la bande interdite photonique qui confine l'énergie au centre de la fibre, en la guidant et en l'empêchant de se propager vers la gaine.

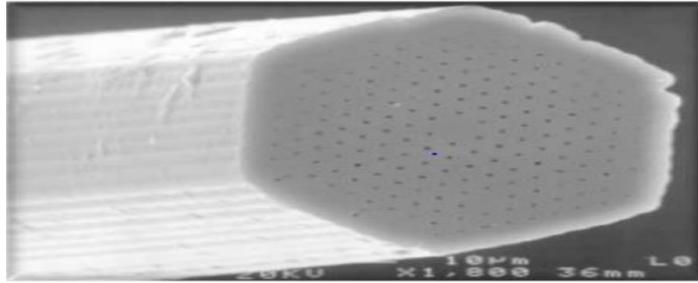


Figure II-12 : Image par microscopie électronique d'un prototype de fibre optique conçu sur la base d'un cristal photonique [13].

I.7 Techniques de modélisation :

Les principales techniques utilisées pour décrire la propagation des ondes électromagnétiques dans les cristaux photoniques sont la décomposition en ondes planes et la méthode des différences finies dans le domaine temporel.

I.7.1 La méthode des ondes planes :

La technique de décomposition en ondes planes (plane wave expansion, PWE) s'applique à toutes les structures dont la constante diélectrique est une fonction périodique de l'espace [14]. Cette technique consiste à résoudre, dans l'espace fréquentiel, l'équation d'onde en développant le champ électromagnétique sur une base d'ondes planes. Cette méthode est très efficace pour calculer les diagrammes de bandes de cristaux infinis parfaitement périodiques. Elle permet de déterminer la fréquence, la polarisation, et la distribution du champ pour les modes d'une structure photonique. Elle peut être adaptée pour étudier certaines structures nonpériodiques comme les guides d'ondes ou les cavités grâce à la technique des super-cellules [4].

En pratique, la structure est définie par une cellule et par un réseau périodique selon lequel cette cellule est reproduite pour couvrir entièrement l'espace. La cellule peut être uniquement le motif du cristal photonique pour un cristal sans défaut, mais peut aussi être de dimension plus grande (on parle alors de super-cellule) dans le cas de structures non périodiques comme les guides d'onde ou les cavités [15-16].

I.7.2 La méthode des Différences finies dans le domaine temporel FDTD :

A partir du premier algorithme proposé par Yee en 1966 [17], la méthode des différences finies dans le domaine temporel (finite difference time domain, FDTD) est largement utilisée en Électromagnétisme. Cette méthode de calcul par éléments finis décompose l'espace-temps selon un maillage de cellules élémentaires. Les équations de Maxwell sont remplacées par un système d'équations qui relie le champ électromagnétique de chaque cellule au champ d'une cellule adjacente. Cette équation est résolue comme conditions initiales et aux limites. La méthode FDTD permet de résoudre les équations de Maxwell avec une précision arbitraire en augmentant la densité de la grille de cellules unitaires. Bien que cette méthode permette le calcul de diagrammes de bandes, elle est principalement utilisée pour simuler la propagation de la lumière dans des structures à base de cristaux photoniques en calculant l'évolution temporelle des champs électromagnétiques. Le comportement spectral de la structure est déduit de cette évolution temporelle à l'aide d'une transformée de Fourier.

I.8 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les notions de base liées aux cristaux photoniques, en commençant par une définition et un bref historique, suivi d'un aperçu des différentes classes de ces matériaux et de leurs défauts. Ensuite, nous avons présenté deux exemples d'applications et les techniques de modélisation utilisés pour l'étude de ces structures périodiques.

Bibliographie

- [1] BENDJELLOUL Rahima, « Etude et caractérisation de circuits photoniques à base de cristaux photoniques de micro piliers : Application aux filtres à base de résonateurs », Thèse de Doctorat, Université de Constantine, juillet 2017.
- [2] K. Sakoda, Optical properties of photonic crystals. Springer series in optical sciences vol. 80, Springer-Verlag, Berlin, 2001.
- [3] C. Kittel, Quantum Theory of Solids. John Wiley and Sons Inc., New York, 1963.
- [4] R. BENDJELLOUL, « Etude du couplage dans les guides d'onde à cristaux photoniques », Thèse de Magister, Université de Constantine, juillet 2009.
- [5] Abri Badaoui Hadjira, « Etude et conception des microcomposants a base des cristaux photoniques bidimensionnels », Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, décembre 2012.
- [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] E.Chow ,S.Y.Lin ,S.G.Johnson ,P.R.Villeneuve , J.D.Joannopoulos ,J.R.Wendt , G.A.Vawter ,W.Zubrzycki,H.Hou , and A.Alleman . “Nature 407(6807),983.-986,2000”.
- [8] A. Dekhira, « Etude théorique et simulation des cristaux photoniques et leurs applications en chimie et biochimie », Thèse de Doctorat, Université de l'USTHB, janvier 2011.
- [9] M. Grillet. “Cristaux photoniques et intégration photonique”. Thèse de doctorat de L'université de Lyon. 2003.
- [10] E. Yablonovitch, T. J. Gmitter et K.M. Leung, “Photonic band structure: the facecenteredcubic case employing non-spherical atoms”, Physical Review Letters, Vol.67, n° 17, pp. 2295- 2298, (1991).
- [11] S.Brahimi, H. Hammoudi , « Conception de diviseur de faisceau à base des cristaux photoniques bidimensionnels » ,mémoire de master, Universite Mohamed Boudiaf M'sila ,2016/2017.
- [12] P. Sanchis, P. Bienstman, B. Luyssaert, R. Baets, J. Marti, “Analysis of Butt Coupling in Photonic Crystals,” IEEE Journal of Quantum Electronics, vol. 40, pp. 541–550, 2004.fibre

[13] Michael SARRAZIN, « Etude de propriétés optiques liées à la transmission de cristaux photoniques bidimensionnels », Thèse de doctorat n° 903, Université de Franche-comté, 24 avril 2002.

[14] M. PLIHAL and A. A. MARADUDIN, « Photonic Band-Structure of 2-Dimensional Systems – the Triangular Lattice », Physical Review B, vol. 44, no. 16, pp. 8565-85

[15] A. Glushko, “Plane wave method for out-of-plane propagation in 2D photonic crystals”, IEEE, pp. 406- 408, 2006.

[16] M. Zelsmann, “Cristaux photoniques en silicium sur isolant pour le guidage, le filtrage, l’émission et l’extraction de lumière”, Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble 1, 2003.

[17] K. S. Yee, Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol.14, no. 3, pp. 302-307, 1966.

Chapitre II :
Filtres optiques à
Cristaux photoniques.

II.1. Introduction

Un attrait majeur des cristaux photoniques 2D repose sur l'insertion de défauts au sein du cristal photonique. Ces défauts peuvent créer des tolérances aux fréquences de la bande interdite du cristal parfait et peuvent donc supporter la propagation des champs électromagnétiques à ces fréquences. L'utilisation de ces structures ouvre une voie pour la miniaturisation des composants de l'optique intégrée et l'amélioration de leurs performances.

Dans ce chapitre, les cavités basées sur les cristaux photoniques bidimensionnels sont décrites. Nous décrivons ensuite les différents types de cavités ainsi que leurs caractéristiques. Nous présentons quelques configurations des filtres à base de ces cavités.

II.2 Filtre optique

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. Il a suscité l'intérêt des chercheurs en raison de la demande significative pour sélectionner un canal requis à partir des systèmes WDM (Wavelength Division Multiplexing). Les filtres conventionnels demeurent de l'ordre du centimètre et du millimètre, ce qui peut ne pas convenir aux circuits photoniques intégrés. Cependant, la conception des filtres optiques basés sur les cristaux photoniques réduirait leurs dimensions jusqu'à l'ordre du micromètre [1-2].

II.3 Filtres optiques à base de cristaux photoniques

Le couplage entre les cavités résonantes et les guides d'ondes à cristaux photoniques a fait l'objet d'un effort de recherche significatif puisqu'ils sont les composants de base dans les circuits photoniques intégrés. Plusieurs voies de couplage sont envisageables :

- Une première voie consiste à réaliser le couplage par l'extrémité du guide en introduisant la cavité sur l'axe du guide, à quelques motifs de son extrémité. La plupart des longueurs d'ondes guidées seront réfléchies à cette extrémité, sauf quelques-unes, qui seront couplées à la cavité. Cette approche permet de réaliser des dispositifs de type Fabry-Pérot, si un second guide est placé face à la cavité. Le mécanisme de ce couplage est illustré sur la **Figure II.1**.

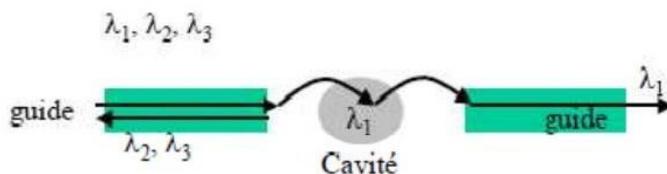


Figure II.1: Illustration du couplage frontal entre un guide et une cavité d'un même cristal photonique [3].

- Une seconde voie consiste à juxtaposer la cavité parallèlement au guide pour aboutir à une interaction latérale des modes de la cavité avec les modes du guide. Ce couplage permet d'extraire une ou plusieurs fréquences se propageant dans le guide. Ces fréquences peuvent ensuite être redirigées, de manière directive, vers un second guide également juxtaposé à la cavité (**Figure II.2**). Ce type de couplage permet de concevoir des filtres à extraction à cristaux photoniques (Channel drop filter, CDF).

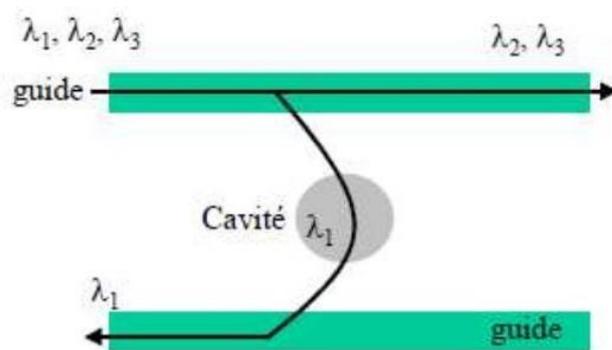


Figure II.2 : Illustration du couplage latéral entre un guide et une cavité d'un même cristal photonique [3].

II.3.1 Cavités à cristaux photoniques

Une manière simple de confiner le champ dans un volume très réduit est de briser localement la périodicité du réseau par l'introduction de défauts. Ceci a pour effet de créer des niveaux d'énergie discrets supplémentaires dans la structure de bandes. Les modes photoniques ainsi créés, à condition qu'ils se situent dans la bande interdite, concentrent leur énergie dans cette zone de défauts. Le cristal environnant se comporte comme un miroir et la lumière est réfléchi par les bords du défaut. Les performances d'un résonateur sont données

par une caractéristique très importante : le facteur de qualité (Q) qui rend compte de la finesse de la résonance.

Les cavités à cristaux photoniques, qui permettent de confiner fortement la lumière, pourraient avoir beaucoup d'applications dans plusieurs domaines. Le critère pour ces applications demeure dans la réalisation des cavités avec des facteurs de qualité élevés.

II.3.1.1 Facteur de qualité

Le facteur de qualité (Q) est une grandeur utilisée pour représenter le confinement temporel de l'énergie dans un résonateur. Il est proportionnel à la durée de vie des photons dans le résonateur (τ) et peut être défini en fonction de celle-ci par la relation [4] :

$$Q = \omega_r \cdot \tau$$

ω_r : la pulsation.

Une autre façon de quantifier le facteur de qualité en termes de spectre consiste à prendre le rapport de la longueur d'onde centrale λ_r de résonance sur la pleine largeur à mi-hauteur $\Delta\lambda$ (full width at half maximum, FWHM). Grâce à la forme de résonance de Lorentz elles s'exprime comme suit [4] :

$$Q = \frac{\lambda_r}{\Delta\lambda}$$

Le facteur de qualité est inversement proportionnel à $\Delta\lambda$. Cela signifie que des résonances étroites dans le domaine fréquentiel correspondent à des résonateurs à faible perte.

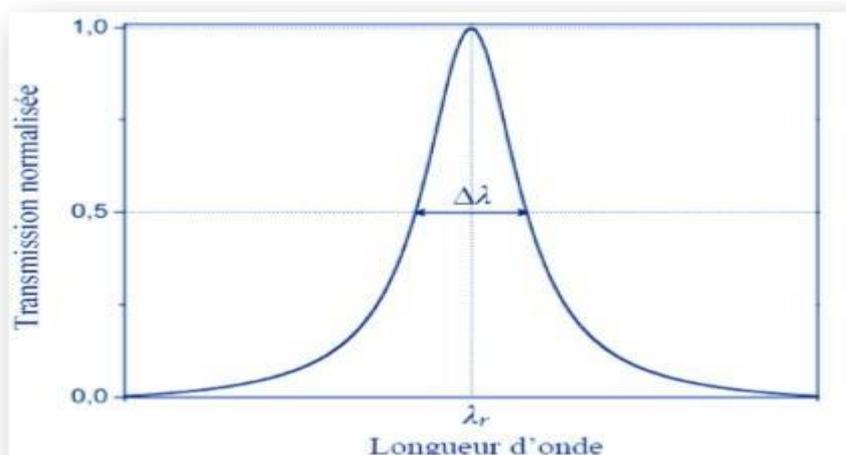


Figure II.3: Réponse spectrale d'une cavité.

II.3.1.2 Types des cavités

On peut réaliser une cavité en modifiant les paramètres d'un ou plusieurs trous dans un cristal photonique : soit en changeant le rayon des trous, soit en déplaçant des trous de leurs positions originales, soit en remplissant complètement les trous. Ces cavités sont généralement de deux types : le type H_n et le type L_n [5]. La cavité de type H_n est une cavité hexagonale dont chaque côté présente une omission de « n » trous. La cavité de type L_n est une cavité linéique qui est réalisée par l'omission de « n » trous du cristal. Les deux images au microscope électronique à balayage (MEB) (**Figure II.4**) sont des exemples de ces deux types de cavités, une cavité H2 et une cavité L3.

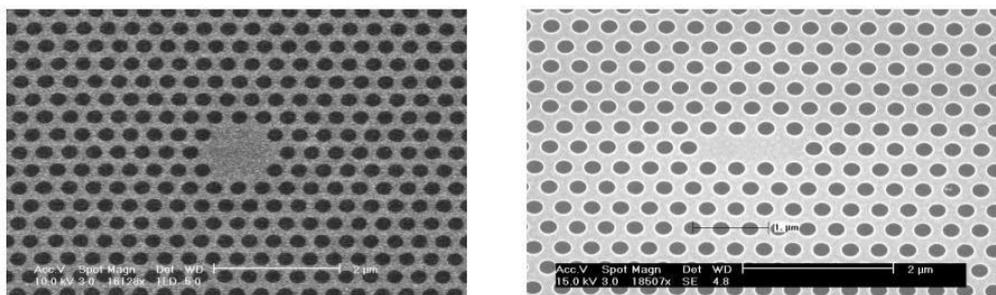


Figure II.4 : Images MEB des cavités (a) de type H2 et (b) de type L3 [6].

Le meilleur facteur de qualité obtenu avec ce type de cavité était de 20 000. Dans le but de l'améliorer, plusieurs chercheurs se sont intéressés à l'étude de ce type de cavités. L'auteur de la référence [6] démontre qu'un facteur de qualité égal à 45 000 a été obtenu par la cavité L3 ainsi qu'une version optimisée de L3. Une version optimisée de la cavité H1 a atteint un facteur de qualité 320 000 par le groupe de Notomi et al. [7]. L'optimisation de ces facteurs de qualité est basée sur le déplacement des trous au bord de la cavité à une distance appropriée. L'intérêt de ce type d'ingénierie est de positionner le mode résonant d'intérêt n'importe où dans la bande interdite, ce qui est un point important vis-à-vis l'utilisation de la cavité dans la conception de plusieurs dispositifs tels que capteurs, filtres à extraction (CDFs) et démultiplexeurs.

II.4 Différentes configurations des CDFs à base de cavités à CPs

a) Première configuration

En 2016, Absalan [8] a proposé un filtre à extraction conçu dans un cristal photonique bidimensionnel. Le filtre est composé de deux guides d'onde et une cavité linéique **Figure II.5.(a)**. Le guide d'entrée et le guide de sortie sont obtenus en supprimant plusieurs motifs de la structure dans la direction horizontale et verticale, respectivement. La cavité quant à elle est créée par la réduction du rayon de deux tiges dans la structure. Le spectre de transmission de cette structure est reporté sur **Figure II.5.(b)** Il indique une efficacité d'extraction de 95 % avec un facteur de qualité égale à 788 à la longueur d'onde $\lambda = 1577$ nm.

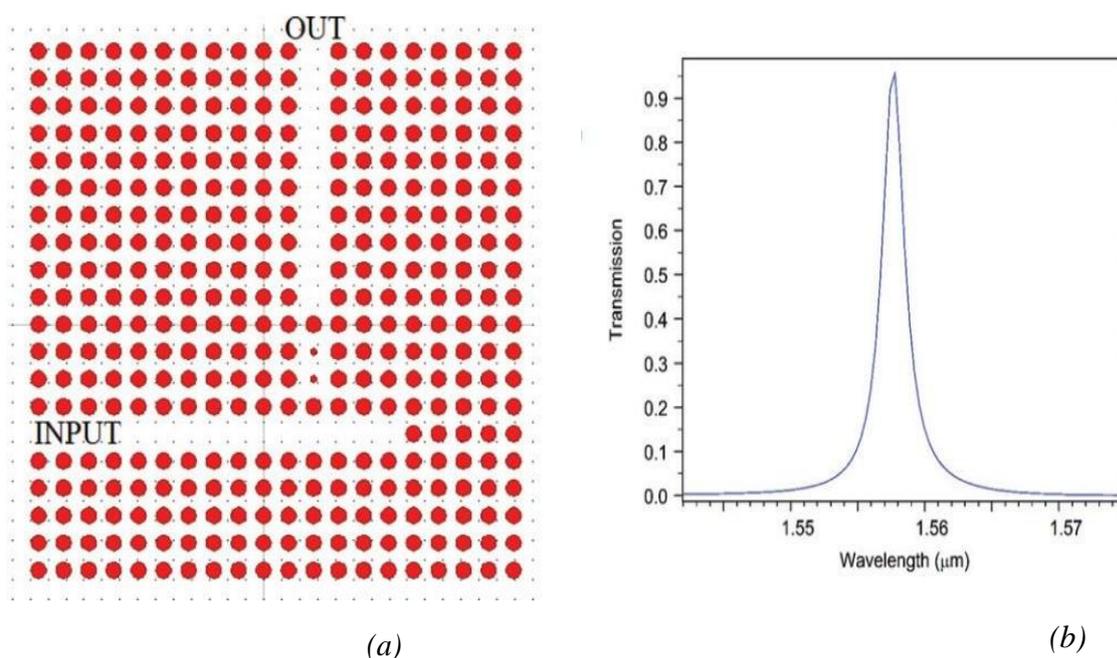


Figure II.5 : (a) Filtre à base de cavité linéique (b) son spectre de transmission [9].

b) Deuxième configuration

Les auteurs de la référence [9] ont conçu un dispositif de filtrage ultracompact fonctionnant dans la fenêtre de communication optique. Ce dispositif est basé sur la combinaison d'un cristal photonique 2D (trous d'air gravés dans un matériau d'indice de réfraction $n=2.89$), et un résonateur formé par la modification des rayons de certains trous (R0, R1 et R3). D'après leurs résultats de simulation, les auteurs ont démontré la faisabilité d'un filtre accordable, en agissant sur les rayons des trous localisés dans le résonateur.

Comme montre **Figure II.6**.

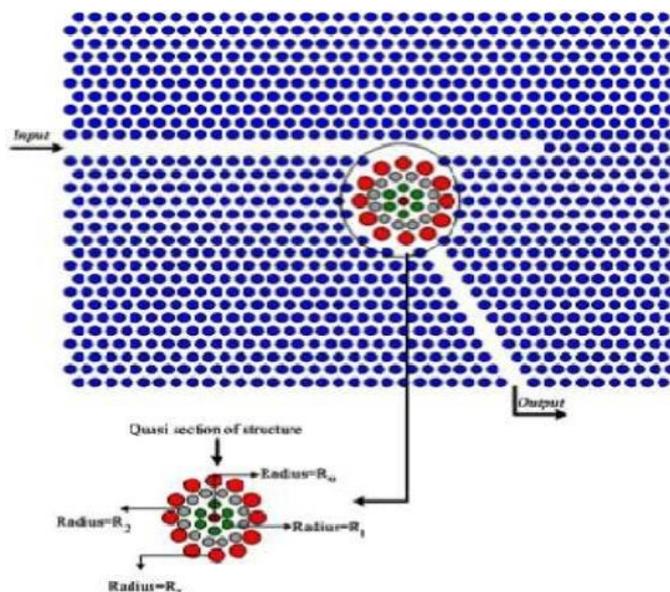


Figure II.6 : structure d'un démultiplexeur accordable basé sur l'utilisation d'un résonateur de filtrage [9].

II.5 Application des filtres à extraction à base de cristaux photoniques

Le principe de "Channel drop filter" joue un rôle très important dans l'intégration des circuits photoniques, il est largement employé dans les systèmes des communications optiques. En se basant sur ce type de dispositif, plusieurs composants comme multiplexeur/démultiplexeur, switches, coupleur directionnel peuvent être réalisés.

II.5.1 Démultiplexeurs à base de cristaux photoniques

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

Considérons un signal optique comprenant les longueurs d'onde $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_i$. Il est possible de diviser celui-ci en une série de « n » signaux de sortie (avec $n = 1, 2, \dots, i$) de telle sorte que la sortie (n) permettra d'extraire la longueur d'onde λ_n , comme le montre la **Figure II.7**.

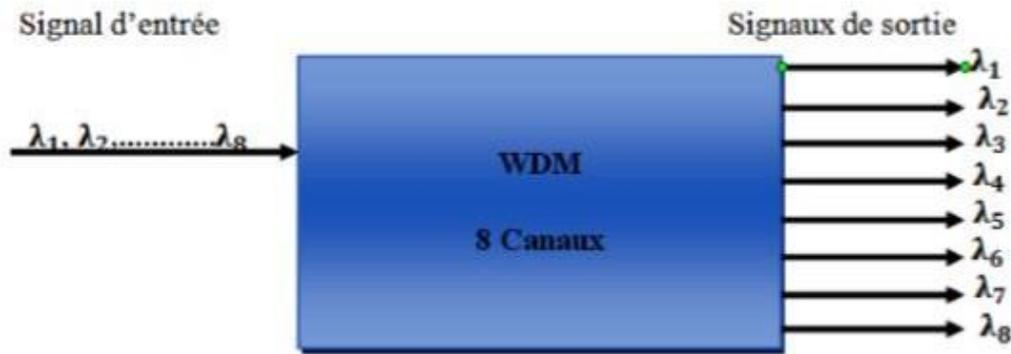


Figure II.7: Démultiplexeur à 8 canaux.

Le démultiplexeur est caractérisé sa diaphonie (crosstalk, CT). La diaphonie représente l'effet indésirable d'un canal sur les autres canaux. Elle est définie par [10] :

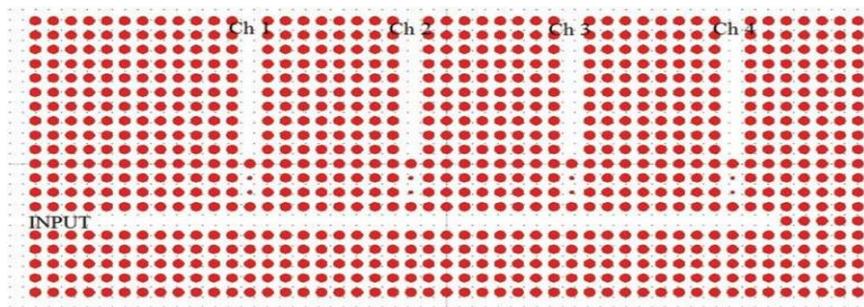
$$CT = 10 \log \frac{\text{Transmission pour une longueur d'onde spécifique au port de sortie non souhaité}}{\text{Transmission pour une longueur d'onde spécifique au port de sortie souhaité}}$$

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

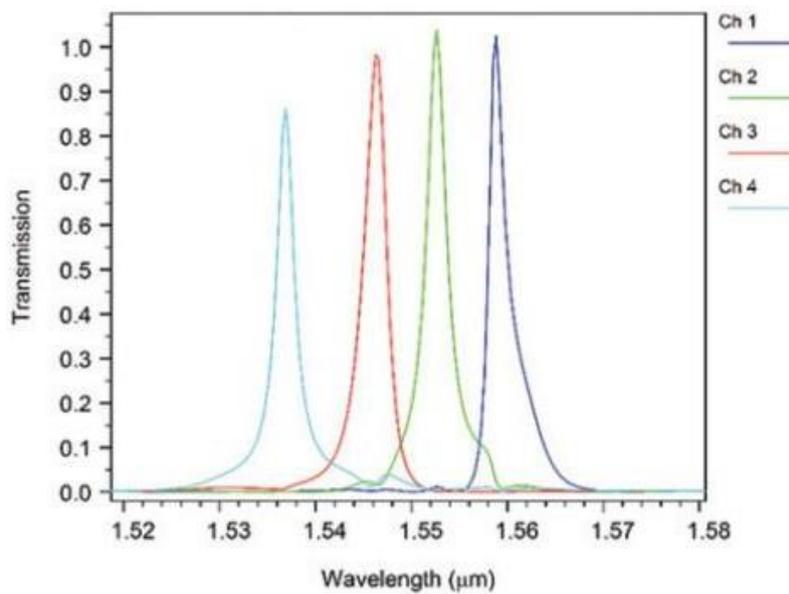
II.5.1.1 Quelques topologies

a) Première topologie

Le filtre conçu par Absalan [8], cité plus haut, est utilisé pour développer un démultiplexeur quatre canaux. Sa structure schématique est montrée sur **Figure II.8**. Ce démultiplexeur comporte un guide d'onde d'entrée et quatre cavités résonantes. Les différentes cavités sont créées en choisissant différents rayons pour les défauts de dimensions réduites, d'où quatre longueurs d'onde différentes. D'après les résultats de simulation, l'auteur a démontré l'efficacité de sa structure en séparant les quatre longueurs d'onde $\lambda_1=1,537 \mu\text{m}$, $\lambda_2=1,546 \mu\text{m}$, $\lambda_3=1,553 \mu\text{m}$ and $\lambda_4=1,560 \mu\text{m}$ avec des efficacités de transmission supérieures à 85 % et des niveaux de diaphonie compris entre -18 dB et -3dB.



(a)



(b)

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

b) Deuxième topologie

En 2017, Bouamami et al. [11] ont proposé un démultiplexeur sept canaux en forme de Y, dans un cristal photonique bidimensionnel de réseau carré comme montre **Figure II.9**. La sélection des différentes longueurs d'onde est réalisée par la modification du rayon du défaut de chaque cavité. En comparaison avec d'autres démultiplexeurs à base de cavités résonantes, leur structure est caractérisée par une dimension très réduite. D'après les résultats obtenus, ils ont confirmé la faisabilité de séparer les sept longueurs d'ondes 1.345 μm, 1.472 μm, 1.425 μm, 1.555 μm, 1.411 μm, 1.639 μm, 1.398 μm.

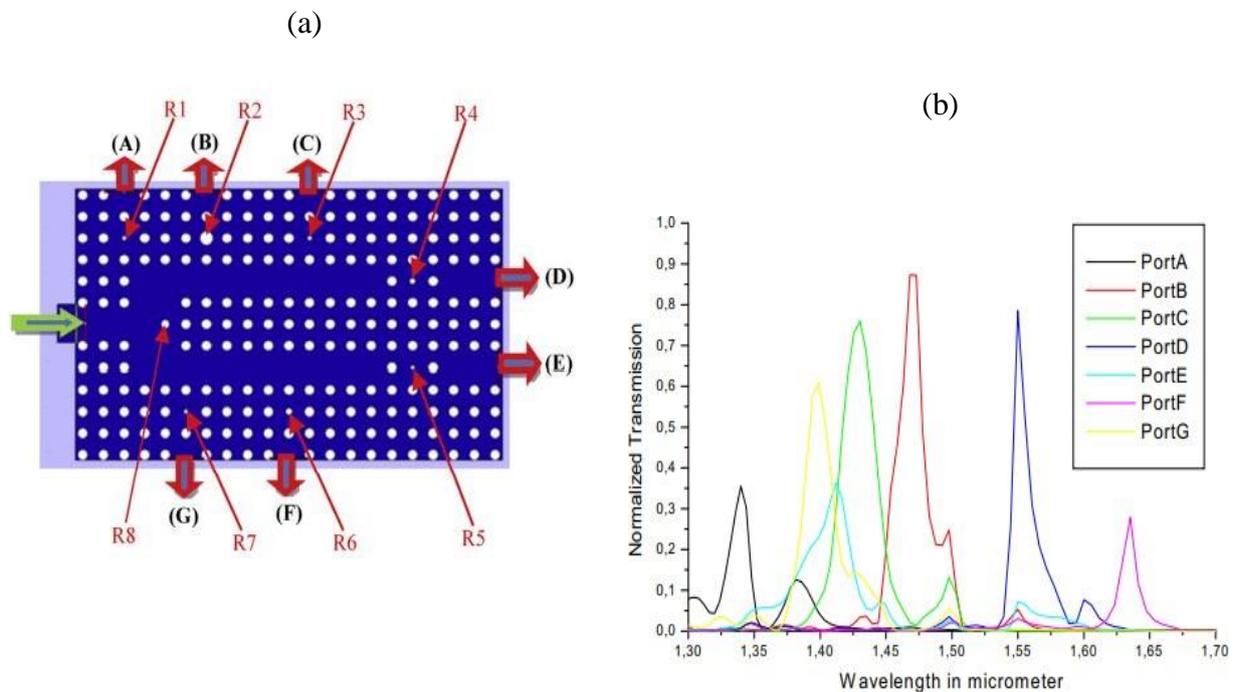


Figure II.9: (a) Structure schématique du démultiplexeur proposé par [11] et (b) son spectre de transmission.

II.6 Conclusion

Dans ce deuxième chapitre nous avons rappelé les notions de bases liés aux cavités résonantes. Ensuite nous avons montré la faisabilité d'un CDF à base de ces cavités. Différents exemples portant sur la conception de ces filtres à base de différentes cavités ont été présentés en soulignant des travaux de recherche antérieurs. L'une des applications des CDFs à base de cavités ayant suscité le plus d'intérêt est le démultiplexage en longueurs d'onde sur lequel nous reviendrons spécifiquement au chapitre 3.

Bibliographie

- [1] M. Plihal, A. A. Maradudin, "Photonic Band-Structure of 2-Dimensional Systems – the Triangular Lattice," *Phys. Rev. B*, vol. 44, pp. 8565–8571, 1991.
- [2] 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.
- [3] S.Bouamami, Etude des Propriétés de dispersion dans les Cristaux photoniques Bidimensionnels :Application A L'étude Des Différents Types De démultiplexeurs En Longueurs D'ondes(WDM),thèse de doctorat ,Université de Djillali Liabes de Sidi Bel Abbas,2015
- [4] L. Ghisa, "Couplage de micro résonateurs. Applications aux fonctions optiques de traitement du signal". Thèse de Doctorat, Université de Rennes I, Rennes, 2008.
- [5] H. Benisty, J.M.Lourtioz, A. Chelnokov, S. Combrie, et X.Checoury," Recent advances toward optical devices in semiconductor based photonic crystals," *Proceedings Of The IEEE*, vol. 94, N°5, p. 997–1023, 2006.
- [6] Y. Akahane, T. Asano, B. S. Song, et S. Noda," High-Q photonic nanocavity in a twodimensional photonic crystal," *Nature*, vol.425, N°6961, p.944–947, 2003.
- [7] T. Tanabe, A. Shinya, E. Kuramochi, S. Kondo, H. Taniyama, and M. Notomi," Single point defect photonic crystal nanocavity with ultrahigh quality factor achieved by using hexapole mode," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 91, N° 2, p.021110, 2007.
- [8] Hassan Absalan, « A Four-Channel Optical Demultiplexer Using Photonic Crystal-Based Resonant Cavities », *Optics Communications*, 2017.
- [9] A. Rostami, A. Haddadpour, F. Nazari1 and H. Alipour, "Proposal for an ultracompact tunable wavelength-division-multiplexing optical filter based on quasi-2D photonic crystals", *J. Opt.* Vol. 12, (7pp), 2010.
- [10] S. Rawal, R.K. Sinha, « Design, analysis and optimization of silicon-on-insulator photonic crystal dual band wavelength demultiplexer, » *Optics Communications*, vol. 282, pp. 3889–3894, 2009.
- [11] Bouamami S, Naoum R. New version of seven wavelengths demultiplexer based on the microcavities in a two-dimensional photonic crystal. *Optik* . 2014 ; v125 : pp7072–7074.

Chapitre III :
Résultats et interprétations.

III.1 Introduction

La modélisation électromagnétique des propriétés des cristaux photoniques nécessite en général un gros investissement en programmation et en analyse numérique, et constitue une activité exigeante en compétence et en temps. Le développement des méthodes de modélisation optiques précises et rapides reste donc primordial pour l'étude de ces structures. De plus plusieurs simulateurs ont été conçus pour faciliter cette tâche, parmi eux se trouve le simulateur Fullwave qui sera largement utilisé dans les simulations réalisées dans ce chapitre.

Dans ce mémoire, Nous nous sommes inspirés des travaux de ZAVARI.M[1]. Afin de développer un filtre à extraction, basés sur des cavités linéiques à cristaux photoniques bidimensionnels. Ce filtre sera l'élément fondamental pour la conception d'un démultiplexeur quatre canaux.

III.2 Présentation de l'outil de simulation

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

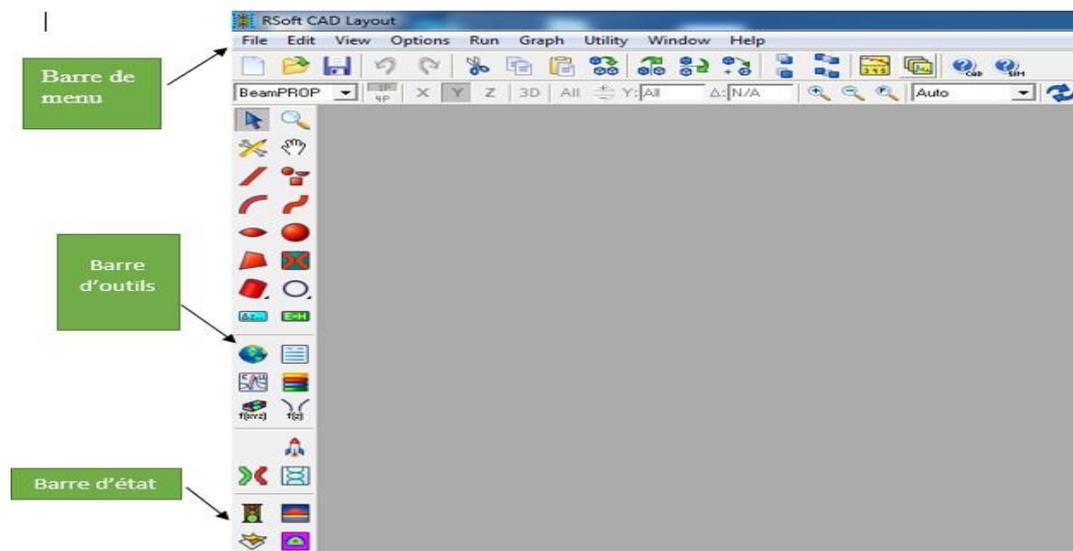


Figure III.1 : fenêtre du programme RSoft CAD.

III.2.1 Simulateur BandSOLVE

BandSOLVE est un module de simulation pour générer et analyser des structures à bandes interdites photoniques. Ce programme utilise la méthode des ondes planes pour calculer la bande interdite d'une structure périodique. BandSOLVE est particulièrement utile pour l'optimisation des propriétés des cristaux photoniques. La fenêtre des paramètres de simulation de BanSolve est représentée sur **Figure III.2**.



Figure III.2 : Fenêtre du module BandSOLVE.

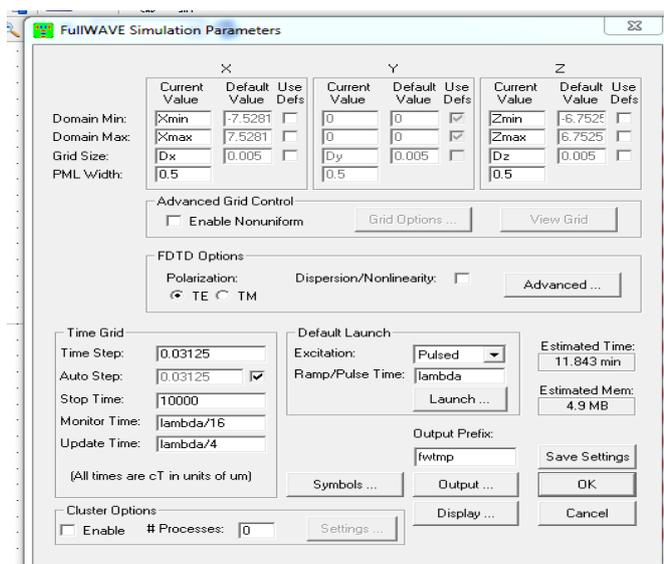


Figure III.3: Fenêtre principale des paramètres de simulation de FullWAVE.

III.2.2 Simulateur FullWAVE

Le module de simulation FullWAVE est basé sur la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD). Il calcule le champ électromagnétique en fonction du temps et de l'espace dans une structure périodique en réponse à une excitation électromagnétique donnée. Le FullWAVE est idéal pour étudier la propagation de la lumière dans une grande variété de structures photoniques. La figure III.3 montre la fenêtre principale de Fullwave.

III.3 Filtre channel drop à base de cavité à cristaux photoniques

III.3.1 Structure d'étude

La structure initiale de notre dispositif est un cristal photonique bidimensionnel de dimensions 19×19 [1]. Ce cristal est composé d'un réseau carré de piliers de Silicium d'indice de réfraction $n_{Si}=3.46$ entourées par l'air d'indice de réfraction $n_{air}=1$. Ces piliers ont une section circulaire réparties selon un réseau carré de période $a=0.73\mu m$ (a est la distance entre le centre de deux motifs adjacents) et de rayon $r=0.219\mu m$. Le schéma de la structure est reporté sur **Figure III.4(a)**.

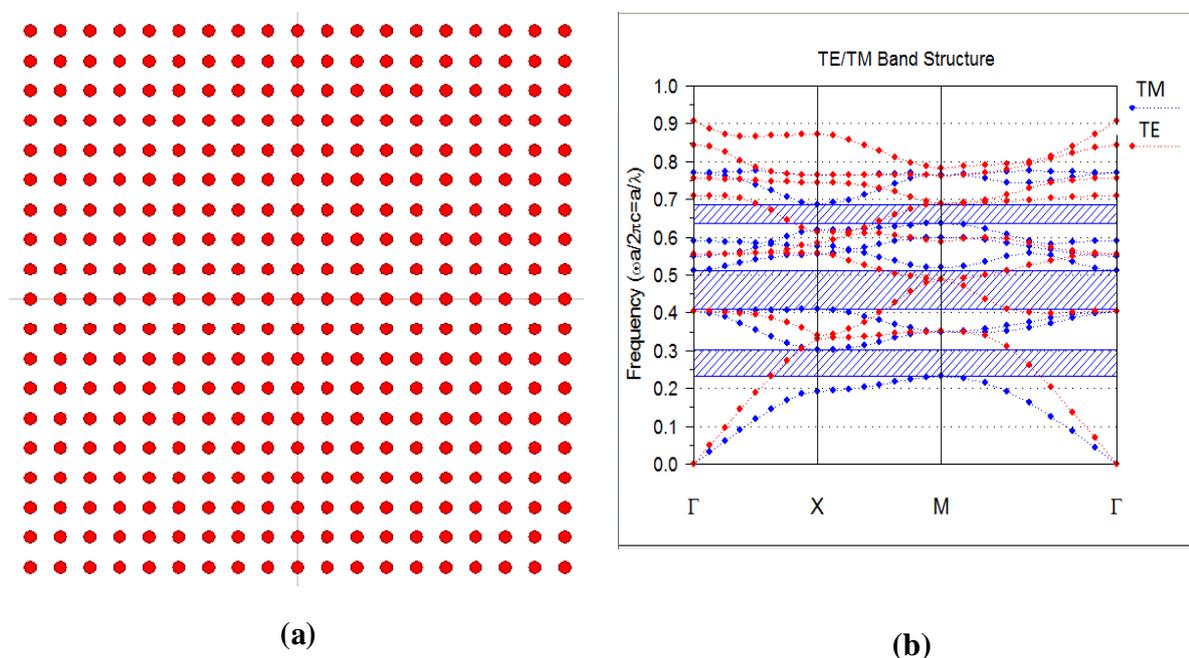


Figure III.4 : (a) Structure sans défauts, (b) Diagramme de bandes de la structure d'étude.

Le digramme de dispersion du cristal photonique sans défaut est calculé en utilisant le simulateur BandSolve basé sur la méthode des ondes planes. **Figure III.4** montre que la structure possède trois bandes interdites en polarisation TM, dont l'une est large et qui s'ouvre pour des fréquences normalisées entre $0.41 < a/\lambda < 0.51$ correspondant aux longueurs d'onde $1.4308 \mu\text{m} < \lambda < 1.7812 \mu\text{m}$. Les deux autres bandes interdites photoniques sont de largeurs réduites et se situent aux intervalles des fréquences normalisées $0.22 < a/\lambda < 0.30$ et $0.63 < a/\lambda < 0.68$ correspondant aux longueurs d'onde $2.433 \mu\text{m} < \lambda < 3.318 \mu\text{m}$ et $1.0735 \mu\text{m} < \lambda < 1.1587 \mu\text{m}$, respectivement. Nous nous intéressons à la plus large bande interdite TM qui permet d'interdire la propagation des ondes électromagnétiques dans la gamme des télécommunications optiques.

III.3.2 Structure non optimisée

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à la conception d'un filtre à extraction à base de cavité à cristaux photoniques. Notre filtre contient deux guides d'onde (guide d'entrée et guide de sortie), entre lesquels est disposé une cavité linéique. Le guide d'entrée est créé par la suppression de 14 tiges dans la direction horizontale, tandis que le guide d'onde de sortie est créé par la suppression de 6 tiges dans la direction verticale. La cavité quant à elle est formée par l'omission de deux motifs de la structure. La structure schématique du filtre conçu est illustrée sur **Figure III.5. (a)**. « D » est la distance de couplage entre les guides d'onde et la cavité, elle est choisie égale à 2 lignes de motifs ($D=2$). Les cinq tiges insérées à l'extrémité du guide d'onde d'entrée agissent comme un réflecteur des fréquences non résonantes. Initialement, la longueur du réflecteur est choisie égale à cinq tiges ($L=5$).

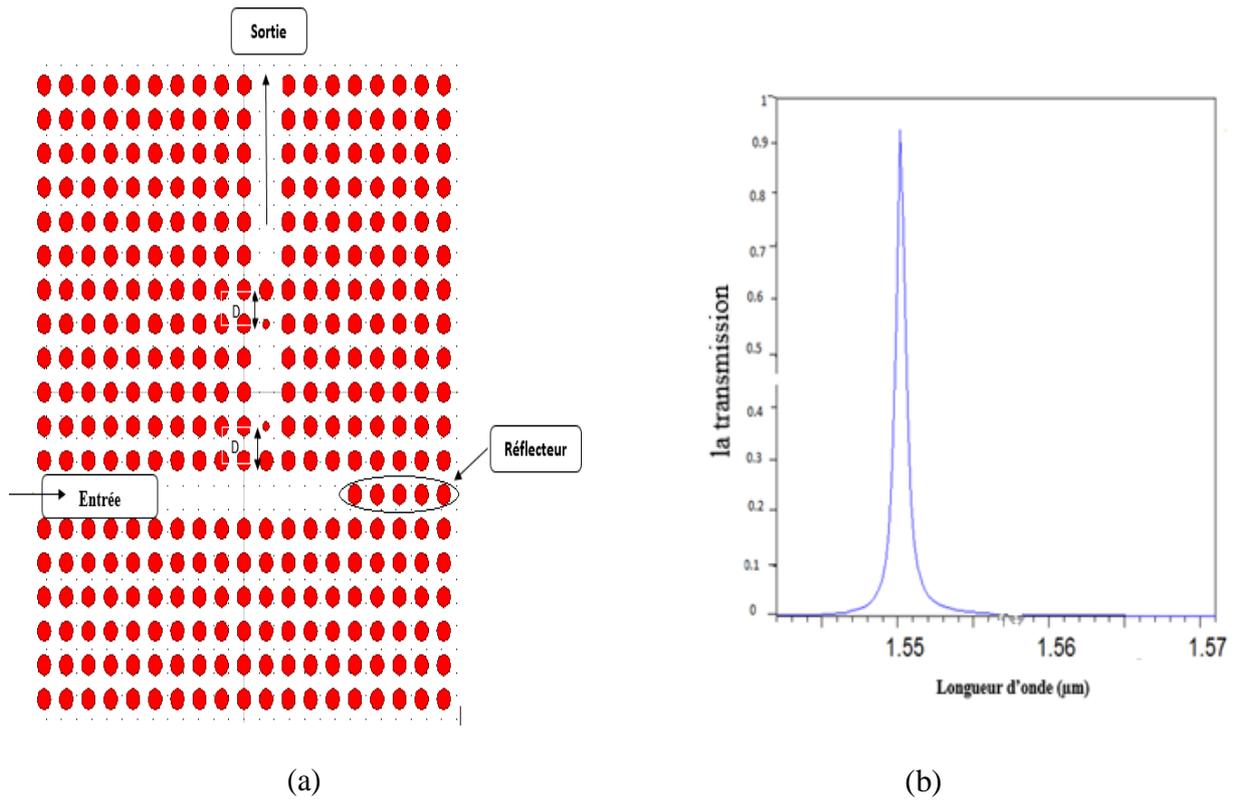


Figure III.5 : (a) Représentation schématique du filtre proposé. (b) son spectre de transmission.

Afin d'ajuster la longueur d'onde de sortie du filtre aux alentours de $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, nous avons modifié le rayon « R » des tiges situées aux bords de la cavité. La structure est simulée en variant « R » dans l'intervalle de $0.08 \mu\text{m}$ à $0.12 \mu\text{m}$. **Tableau III.1** indique les changements obtenus.

Rayon des tiges (μm)	longueur d'onde λ (μm)
0,08	1,5314
0,09	1,5416
0,1	1,5498
0,1005	1,55
0,108	1,5562
0,12	1,5662

Tableau III.1 : Modification de la longueur d'onde en fonction du Rayon.

D'après ce tableau, on remarque qu'en augmentant le rayon des tiges adjacentes à la cavité, la valeur de la longueur d'onde de sortie se décale vers des valeurs plus élevées. La longueur d'onde $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ est enregistrée pour un rayon $R = 0,1005 \mu\text{m}$. Dans ce cas, nous avons calculé le spectre de transmission du filtre et reporté le résultat sur la figure (). Selon cette figure, nous observons l'existence d'un pic situé à $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$. Ce pic est caractérisé par une efficacité d'extraction de 94.25 % et un facteur de qualité égal à $Q = 2012.98$.

III .3.3 Optimisation du filtre

Afin d'améliorer les caractéristiques du filtre proposé, nous procédons aux modifications suivantes :

a) Modification de la distance de couplage

En approchant un guide d'onde d'une cavité de facteur de qualité Q , on permet aux parties évanescentes des champs du guide et de la cavité de se coupler. Le facteur de qualité Q de la cavité est alors réduit par les pertes dues au couplage entre le guide et la cavité. On peut donc dire que l'écart entre les deux valeurs du facteur Q est principalement due au faible confinement dans les sections de couplage entre les deux guides d'onde et la cavité. Afin d'acquérir un facteur de qualité Q du filtre le plus élevé possible, la distance de couplage (D) entre les guides et la cavité doit être ajustée de façon à réaliser un bon confinement dans les sections de couplage.

Nous allons donc modifier la distance qui sépare les deux guides d'onde de la cavité.

Tableau III.2 indique les changements obtenus.

D	Transmission (%)	Facteur de qualité (Q)
2	94,25	2012,98
3	31,61	5805,99

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

A partir de ce tableau, plusieurs informations peuvent être collectées. Tout d'abord, l'efficacité d'extraction augmente à mesure que les guides d'onde se rapprochent de la cavité (en diminuant D). D'autre part, il est clairement visible qu'à mesure que la distance de couplage augmente, le facteur Q du CDF s'améliore. Cela est dû au fait que lorsque les guides d'onde sont loin de la cavité, cette dernière se comporte comme un résonateur seul.

Sur la **Figure III.6**, le spectre de transmission du filtre, est présenté, pour une distance séparant les guides de la cavité de $D=3$. Cette figure montre qu'une meilleure sélectivité spectrale peut être obtenue avec un facteur de qualité égal à 5805.99, en augmentant simplement la distance de couplage entre les guides et le résonateur. On note par contre, une diminution de l'efficacité d'extraction jusqu'à 31.61 %. Les résultats obtenus précédemment, nous permettent de déterminer la distance de couplage optimale qui est égale à $D=2$.

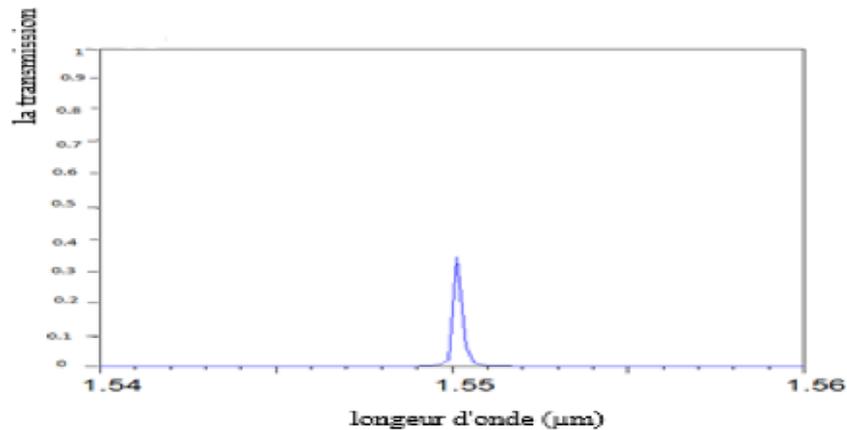


Figure III.6 : Spectre de transmission du filtre pour $D=3$.

b) Modification de la longueur du réflecteur

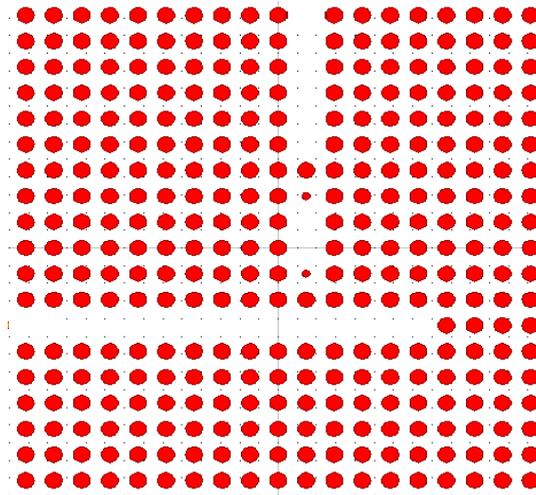
Le réflecteur situé à l'extrémité du guide d'onde d'entrée a pour rôle de réfléchir les longueurs d'onde non résonantes. Afin de garantir une bonne efficacité d'extraction du signal transmis du guide d'onde d'entrée vers le guide de sortie via la cavité. Cette dernière doit être placée à une distance bien choisie par rapport au réflecteur. Cela est possible, en agissant sur la longueur « L » de ce dernier.

Le tableau suivant récapitule les résultats obtenus après un calcul FDTD-2D. Les résultats reportés sur ce tableau montrent une amélioration notable du taux de transmission pour une longueur égale à $L=4$.

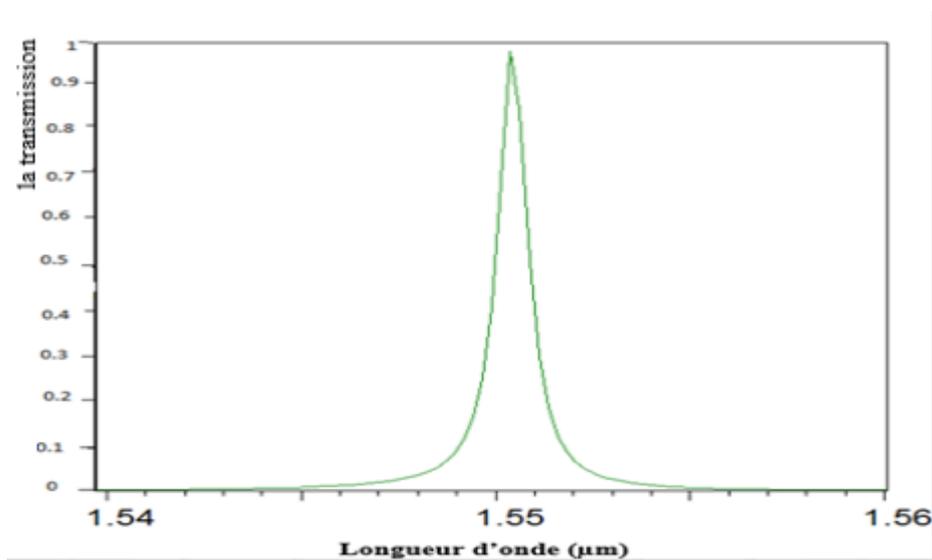
L	Transmission (%)	Facteur de qualité (Q)
3	19,78	3370.40
4	98.96	1667.10
5	94.25	2012.98

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

Les résultats obtenus précédemment nous permettent ainsi de déterminer précisément les nouveaux paramètres de notre structure ($D=2$, $L=4$). La structure du filtre optimisé et son spectre de transmission sont présentés sur **Figure III.7**.



(a)



(b)

Figure III.7 : (a) structure schématique du filtre pour $L=4$ et $D=2$, et son (b) spectre de transmission.

Afin de démontrer la performance du filtre, on simule la distribution du champ dans ce composant pour $\lambda=1.55 \mu\text{m}$. Le résultat est représenté sur **Figure III.8**. Comme on le voit, en raison du couplage entre le guide d'onde et la cavité à la longueur d'onde de résonance, le signal est complètement extrait du guide d'onde d'entrée et transféré ensuite au guide d'onde de sortie via la cavité.

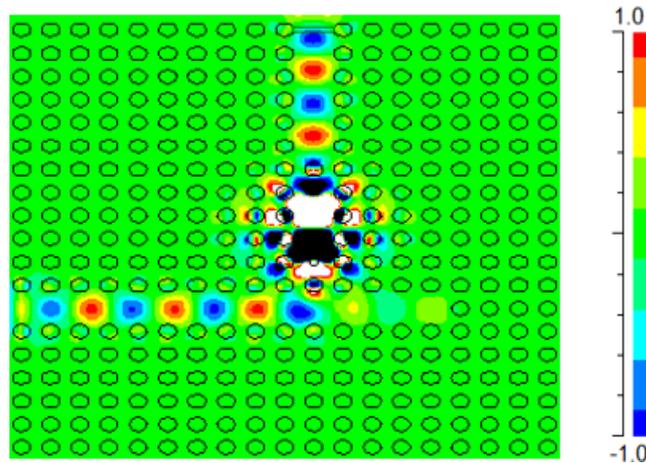


Figure III .8: Répartition du champ dans le filtre à extraction à $\lambda=1.55 \mu\text{m}$.

III.4 Démultiplexeur à base de cavités à cristaux photoniques

La structure du démultiplexeur que nous proposons est représentée sur **Figure III.9**. Le démultiplexeur proposé est capable de séparer quatre longueurs d'onde. Il est constitué d'un guide d'onde d'entrée et de quatre canaux de sortie, entre lesquels sont situés quatre cavités à cristaux photoniques. La sélection de la longueur d'onde de sortie pour chaque canal est réalisée par le déplacement « d » d'une seule tige située aux bords de chaque cavité. Le **Tableau III.4** indique la variation de la longueur d'onde en fonction de la variation du déplacement des tiges adjacentes. La longueur du réflecteur est de cinq tiges ($L=4$).

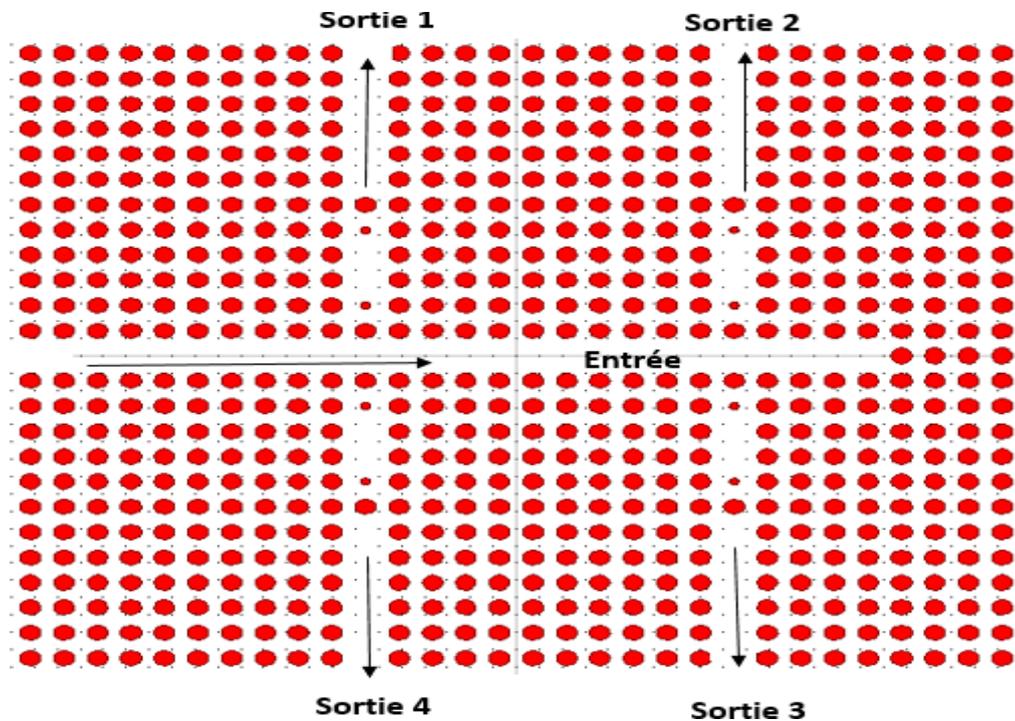


Figure III.9 : Représentation schématique du démultiplexeur proposé.

Après avoir simulé cette structure en utilisant le logiciel Fullwave, nous avons reportés les résultats obtenus sur **Figure III.10**. Selon cette figure, nous observons l'existence de quatre pics résonants à $\lambda_1= 1.5504 \mu\text{m}$, $\lambda_2=1.5499 \mu\text{m}$, $\lambda_3=1.5489 \mu\text{m}$, $\lambda_4=1.5478 \mu\text{m}$, obtenues à la sortie des canaux 1, 2, 3, 4, respectivement.

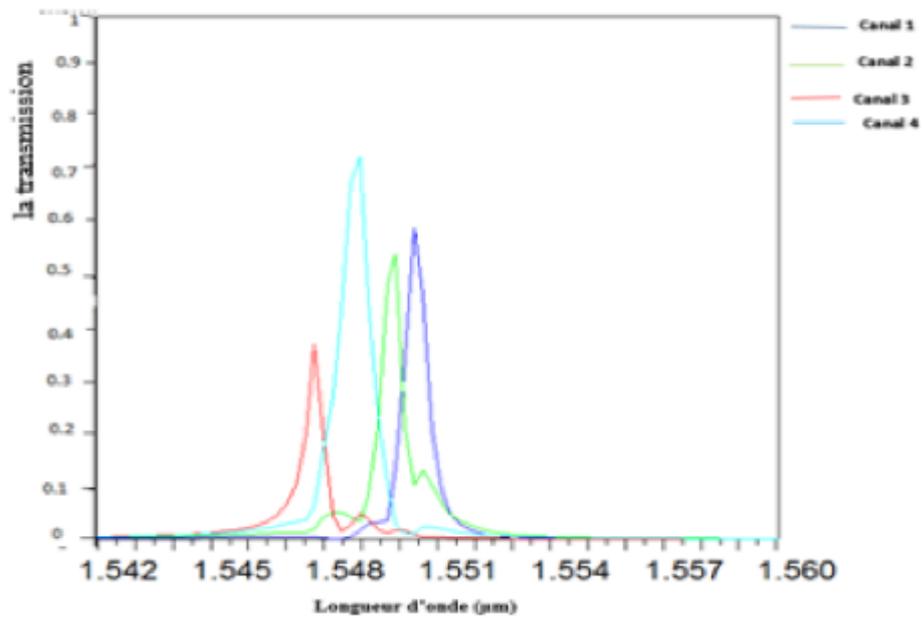


Figure III.10 : Spectre de transmission du démultiplexeur proposé pour $L=4$.

Les spécifications des quatre longueurs d'onde sont indiquées dans le **Tableau III.4**

	λ (μm)	La transmission (%)	Le crosstalk (dB)
Canal 1	1,5504	58,34	-7,16
Canal 2	1,5499	54,29	-5,72
Canal 3	1,5489	73,67	-9,46
Canal 4	1,5478	38,51	-9

Tableau III.4 : Caractéristiques du démultiplexeur proposé pour $L=4$.

D'après ce tableau, on constate que les quatre pics sont caractérisés par les taux de transmission suivant : $T_1=58,34\%$, $T_2=54,29\%$, $T_3=73,67\%$, $T_4=38,51\%$, et que le niveau de diaphonie entre les canaux de la structure est compris entre $-5,72$ et $-9,46$ dB. Ce résultat n'est pas satisfaisant, car on note la présence du signal d'un canal particulier dans les autres canaux.

L'amélioration des caractéristiques du démultiplexeur peut être établie en agissant sur la longueur du réflecteur, autrement dit, la distance entre le réflecteur et les différentes cavités. Pour ce faire, nous avons simulé notre structure pour une longueur de $L=5$. Le détail des caractéristiques des quatre longueurs d'onde est résumé dans le **Tableau III .5**.

Canal	λ (μm)	Transmission (%)	Facteur de qualité (Q)	Crosstalk (dB)
Canal 1	1,5503	83,3	1336,55	-11,16
Canal 2	1,5497	58,3	1519,38	-4,07
Canal 3	1,5485	85	1335,94	-8,04
Canal 4	1,5466	97,59	14185,89	-13,79

Tableau III .5 : Caractéristiques du démultiplexeur pour L=5.

Les résultats reportés sur ce tableau montrent une amélioration notable du taux de transmission pour L=5. Nous enregistrons également un faible niveau de diaphonie pour la même distance. Dans ce cas, le spectre de transmission pour les quatre canaux est illustré sur **Figure III.11**.

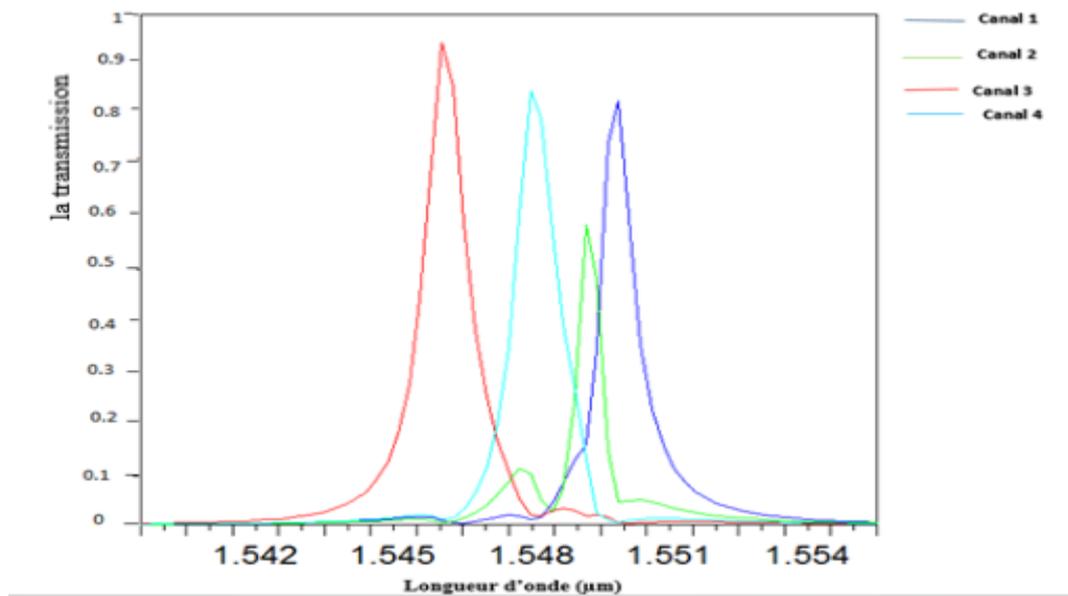


Figure III.11 : Spectre de transmission du démultiplexeur pour L=5.

La distribution du champ dans le démultiplexeur correspondant aux longueurs d'onde à la sortie des canaux 1 et 3, est représentée sur la figure (). Sur cette figure, il est clairement visible que les longueurs d'onde $\lambda = 1.5503 \mu\text{m}$, et $\lambda = 1.5485 \mu\text{m}$ (voir **Figure III.12**) sont extraites du guide d'onde d'entrée et transférées aux guides d'onde de sortie par l'intermédiaire des quatre cavités.

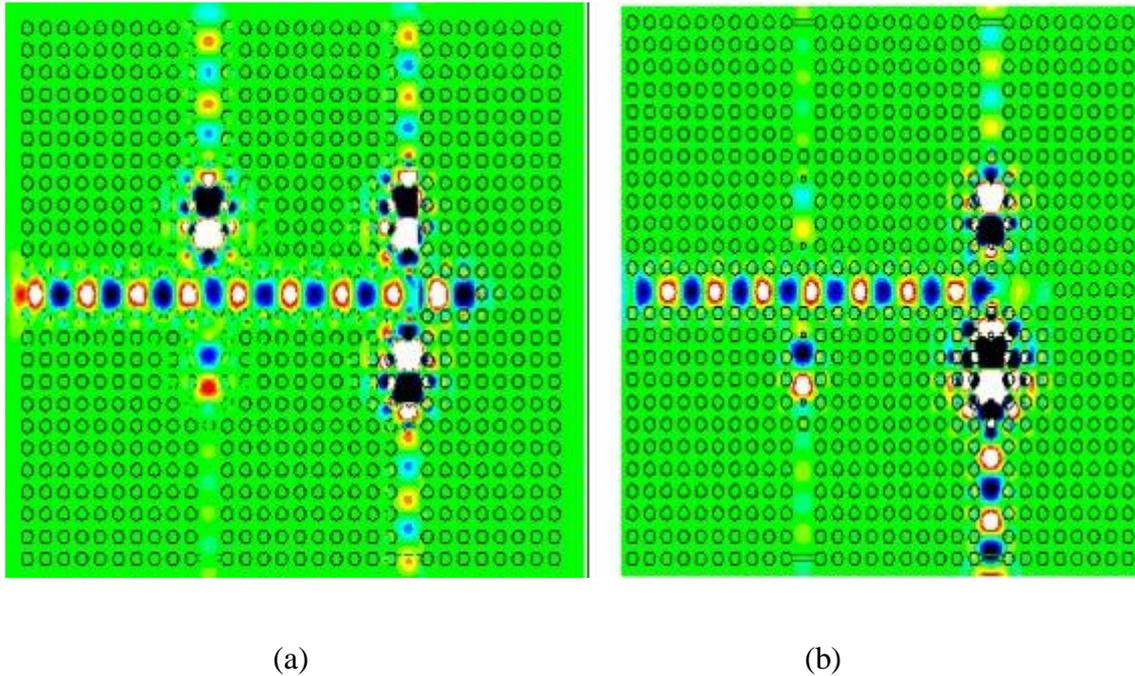


Figure III.12 : Répartition du champ dans le démultiplexeur aux longueurs d'onde : (a) $\lambda = 1.5503\mu\text{m}$, (b) $\lambda = 1,5485\mu\text{m}$.

III .5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons essayé de développer un filtre à extraction à base de cavités à cristaux photoniques bidimensionnels. Ce dispositif comporte deux guides d'onde couplés à une cavité linéique. Afin d'améliorer les performances du filtre, nous avons optimisé la distance entre les guides et la cavité ainsi que la longueur du réflecteur situé à l'extrémité du guide d'onde d'entrée. Les résultats obtenus assurent l'efficacité du composant proposé. Le filtre conçu a servi comme élément fondamental pour la conception d'un démultiplexeur quatre canaux à cristaux photoniques.

Bibliographique :

[1] ZAVARI.M, « design of photonic crystal-Based Ddemultiplexeur with High-Qualité Factor For DWDM Applications, Optics Communications, 2017.

Conclusion Générale

Cette étude souligne l'intérêt d'utiliser des cristaux photoniques dans des systèmes optiques guidés. Ces matériaux, dont la permittivité change périodiquement sur l'échelle des longueurs d'ondes, se caractérisent par la présence d'une bande interdite photonique qui empêche la propagation de la lumière à l'intérieur de la structure. L'utilisation de cet effet de bande interdite ouvre la voie à la réalisation de nombreuses fonctions optiques. Les applications potentielles des cristaux photoniques sont multiples et variées : réalisation de cavités résonantes de taille très réduite, guides d'ondes, filtres sélectifs, démultiplexeurs, et fibres optiques....

Le travail présenté dans ce mémoire a porté sur l'étude d'un filtre à extraction (Channel drop filter, CDF) basé sur le couplage entre des guides d'onde et une cavité résonante à cristaux photoniques. 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 possibles tel que la modification de la distance de couplage entre les guides et la cavité ainsi que la distance entre le réflecteur et la cavité. Un facteur de qualité et un taux de transmission de 1667.10 et 98.96 % ont été obtenus. Ces résultats encourageant nous ont permis d'utiliser ce filtre comme élément fondamental afin de concevoir un démultiplexeur quatre canaux à cristaux photoniques.

Résumé

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

Ce mémoire constitue un ensemble de travaux qui s'appuie sur la conception de composants à base de cristaux photoniques pour des applications dans les communications optiques. Des dispositifs à cristaux photoniques tels que les cavités résonantes et les guides d'onde sont élaborés afin de réaliser un filtre optique pour une application dans les systèmes WDM.

Abstract

Photonic crystals are nano-structure materials whose dielectric index varies periodically in one or more directions in space, in which appears a photonic band gaps for electromagnetic fields in which light cannot propagate.

This work constitutes a collection of works based on the design of components based on photonic crystals for applications in optical communications. Photonic crystal devices such as resonant cavities and waveguides are elaborated in order to realize an optical filter for Wavelength Division Multiplexing (WDM) systems.