

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane Mira
Faculté de la Technologie



Département d'Automatique, Télécommunication et d'Electronique

Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Télécommunication

Spécialité : Système des télécommunications

Thème

**Etude et conception d'un filtre optique à
base de cavités résonantes à cristaux
photoniques**

Préparé par :

- SOUCI LYDIA
- MEGROUS HASSIBA

Dirigé par :

Mme BENDJELLOUL

Examiné par :

- Mme BOUNCER
- Mme ACHOUR

Année universitaire : 2022/2023

Remerciements

Nous remercions Dieu, le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Nous remercions notre encadrante madame BENDJELLOUL pour sa disponibilité, son soutien et ses conseils précieux tout au long de ce mémoire.

Nos remerciements vont également à M^{me} BOUNCER qui nous a fait l'honneur de présider notre jury de soutenance

Nous adressons aussi nos remerciements à M^{me} ACHOUR d'avoir accepté de juger notre travail.

Nous sommes honorés d'avoir eu l'opportunité de présenter notre travail devant vous.

A nos parents,

Nous ne saurions jamais assez-vous remercier pour votre amour inconditionnel, votre soutien constant et votre confiance en nous. Vous avez toujours été nos plus grands fans et nos piliers dans les moments difficiles. Votre encouragement et vos sacrifices ont été la clé de notre réussite. Nous sommes profondément reconnaissantes d'avoir des parents aussi merveilleux que vous.

Dédicace

Je dédie ce travail à la vie elle-même, qui m'a offert un voyage étonnant rempli de hauts et de bas, de défis et d'opportunités.

Chère mère et cher père,

Le moment est venu pour moi de terminer cette étape importante de ma vie, celle de mes études. C'est avec une grande émotion que je souhaite vous dédier ce mémoire, car vous avez été mes piliers tout au long de ce parcours.

Maman, tu as toujours été présente à mes côtés, me soutenant inconditionnellement dans chaque décision que j'ai prise. Tu as été ma source d'inspiration et ma force lorsque j'en avais le plus besoin. Ce mémoire est le fruit de notre complicité et de notre soutien mutuel, je te suis infiniment reconnaissante pour tout ce que tu as fait pour moi, et je suis fière de te compter comme ma mère.

Mon père, même si tu es malade et que la maladie a posé des obstacles sur notre chemin, tu as toujours été là, avec ton sourire bienveillant et ton esprit combatif. Tu m'as appris la valeur de la persévérance et du courage et grâce à toi, je me suis surpassé à chaque étape de ma vie, sache que chaque ligne de ce mémoire porte ton empreinte, je te dédie ces réalisations avec amour et gratitude. Je te souhaite un prompt rétablissement mon père.

Enfin, à **moi-même**, je dédie ce travail. Par ce que j'ai relevé les défis avec courage et persévérance, j'ai acquis une précieuse expérience et je suis devenue une version plus éclairée de moi-même.

SOUICI LYDIA



Dédicace

Je remercie mon Dieu le tout Puissant de m'avoir donné la force et le courage pour terminer mes études.

À mes très chers parents qui se sont toujours sacrifiés pour me voir réussir, pour leur soutien, leur patience leur encouragement durant mon parcours scolaire, que dieu leur procure bonne santé et longue vie.

A mes frères : **Rachid, Haouas et Hicham**

A mes sœurs : **Nadia et Hedda**

A mes chères amies : **Lamissa, Kenza, Tinhinane, Youssra et Lamia**

*A ma binôme et consœur : **Lydia** et sa famille*

À tous mes frères et ma nièce **Sabrina** et mon neveu **Meziane**

*Enfin, j'exprime ma dernière pensée à mon fiancé « **Anouar** » qui m'a soutenue et qui m'a encouragé dans ma carrière universitaire*

A toute la famille Megrous

A tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à la réalisation de ce mémoire.

MEGROUS HASSIBA

Liste des abréviations

CPs : cristaux photoniques

1D : unidimensionnel

2D : bidimensionnel

3D : tridimensionnel

TE : transverse électrique

TM : transverse magnétique

BIP : bande interdite photonique

PBG : bande interdite photonique (photonic gap bande)

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

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

λ : longueur d'onde

Q : facteur de qualité

λ_r : longueur d'onde de résonance

$\Delta\lambda$: la largeur à mi-hauteur (full width at half maximum, FWHM)

V : volume modal

Chapitre I : Généralité sur les cristaux photoniques

Figure I.1 : Différents types des cristaux photoniques : 1D, 2D et 3D.....4

Figure I.2 : exemple des cristaux photoniques naturels : **(a)** : Aile de papillon. **(b)** : Coupe d'une aile de papillon observée au MEB [1]. **(c)** : Plume de paon. L'encadré de droite est une image prise au microscope électronique : La structure cristal photonique 2D.....5

Figure I.3 : **(a)** Bracelet monté d'une opale naturelle quasi-périodiques bille de silice **(b)** Image au microscope électronique d'une opale naturelle.....6

Figure I.4 : Schéma d'un miroir de Bragg constitué d'un milieu diélectrique périodique fini.....7

Figure I.5: (a) structure déconnectée. (b) structure connectée.....8

Figure I.6 : Familles des cristaux photoniques 2D : **(a)** réseau carré. **(b)** réseau triangulaire . **(c)** réseau hexagonal.....9

Figure I.7 : Représentation des polarisations TE et TM pour les cristaux photoniques 2D.....9

Figure I.8 : Diagramme de bande d'un cristal photonique bidimensionnel de réseau triangulaire.....10

Figure I.9 : la Yablonovit.....11

Figure I.10 : structure tas de bois.....12

Figure I.11 : Exemple de défauts ponctuels : **(a)** défaut lacunaire, **(b)** et **(c)** défauts de substitution.....12

Figure I.12 : Exemples de défauts linéaires dans un cristal photonique 2D créés (a) en omettant une seule rangée de motifs, (b) en modifiant l'indice de réfraction d'une seule rangée de motifs et (c) en variant le rayon d'une seule rangée de motifs de la structure.....13

Figure I.13 : Dispositifs à base de cristaux photoniques 2D : (a) Coupleur directionnel ; (b) Biocapteur ; (c) Diviseur de puissance ; (d) Filtre ; (e) Démultiplexeur ; (f) Double virage.....14

CHAPITRE II: Filtre optique à cavités résonnantes à cristaux photoniques

Figure II.1 : Types de cavités : (a) une cavité L3 et (b) une cavité H2.....20

Figure II.2 : Réponse spectrale d'une cavité.....21

Figure II.3 : Quelques exemples de types de cavités à défaut ponctuel.....24

Figure II.4 : Exemples de cavités de types H_n : (a) cavité H0, (b) cavité H1, cavité H4.....25

Figure II.5 : Signatures spectrales de cavités hexagonales.....26

Figure II.6 : Exemples de cavités de types L_n : (a) cavité L3, (b) cavité L5, (c)cavité L7.....27

Figure II.7: (a) Cavité à double hétéro-structure réalisée en connectant les structures basiques à cristaux photoniques PC0 et PC1, (b) Cavité à multi hétéro structure réalisée en connectant les structures basiques à cristaux photoniques PC0 et PC1, PC2.....28

Figure II.8 : (a) structure du filtre proposé, et (b) son spectre de transmission.....29

Figure II.9 : (a) structure du filtre proposé, et (b) son spectre de transmission.....30

Figure II.10 : (a) structure du démultiplexeur proposé, et (b) son spectre de transmission.....31

Figure II.11 : (a) Structure du démultiplexeur proposé, et (b) son spectre de transmission.....32

CHAPITRE III: Résultats et interprétations

Figure III.1 : Fenêtre du logiciel Rsoft CAD.....37

Figure III.2 : Fenêtre du simulateur BANDSOLVE.....37

Figure III.3 : Fenêtre du simulateur fullwave.....38

Figure III.4 : Représentation schématique de la structure étudiée.....39

Figure III.5 : Diagramme de bande de la structure d'étude.....39

Figure III.6 : Représentation schématique du filtre proposé.....40

Figure III.7 : spectre de transmission du filtre proposé.....41

Figure III.8 : Représentation schématique du filtre pour $L=8$42

Figure III.9 : Spectre de transmission du filtre pour $L=8$43

Figure III.10 : Représentation schématique du filtre pour $D_c=2$44

Figure III.11 : Spectre de transmission du filtre pour $D_c=2$44

Figure III.12 : Représentation schématique du filtre pour $D_c=3$46

Figure III.13 : Spectre de transmission du filtre pour $D_c=3$	46
Figure III.14 : Représentation schématique de la structure finale du filtre.....	48
Figure III.15 : Spectre de transmission de la structure finale du filtre.....	48
Figure III.16 : Répartition du champ dans le filtre pour $\lambda=1.5336 \mu\text{m}$	49
Figure III.17 : Représentation schématique du démultiplexeur proposé.....	50
Figure III.18 : Spectre de transmission de démultiplexeur.....	50
Figure III.19 : Spectre de transmission du démultiplexeur pour $d=3$ et $L=5$	52
Figure III.20 : Répartition du champ dans le démultiplexeur avec $d=3$ tiges et $L=5$ tiges pour les longueurs d'onde : (a) $\lambda_1 = 1.5335 \mu\text{m}$, (b) $\lambda_2=1.5432 \mu\text{m}$, (c) $\lambda_3= 1.5505 \mu\text{m}$ et (d) $\lambda_4=1.5579 \mu\text{m}$	53

Liste des tableaux

Tableau III.1 : Caractéristiques du filtre pour différentes longueurs du réflecteur.....42

Tableau III.2 : Caractéristiques du filtre pour $D_c=1$, $D_c=2$, $D_c=3$46

Tableau III.3: Caractéristiques du filtre pour différentes valeurs du rayon des tiges de couplage.....47

Tableau III.4 : Influence de la distance entre les canaux sur les caractéristiques du démultiplexeur.....51

Tableau III.5 : Influence de la longueur du réflecteur sur les caractéristiques du démultiplexeur.....52

Introduction générale.....	1
Références bibliographiques.....	3
<i>Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques</i>	
I.1/ Introduction.....	4
I.2/ définition des cristaux photoniques.....	4
I.3/ les cristaux photoniques naturels.....	5
I.4/ les types des cristaux photoniques.....	6
I.4.1/ Cristal photonique 1D.....	6
I.4.2/ Cristal photonique 2D.....	7
I.4.2.1/les familles des cristaux photoniques bidimensionnels.....	8
I.4.2.1.1/cristaux photoniques bidimensionnels à réseau carré.....	8
I.4.2.1.2/ cristaux photoniques bidimensionnels à réseau triangulaire.....	8
I.4.2.1.3/cristaux photoniques bidimensionnels à réseau hexagonale.....	8
I.4.2.2/ la polarisation TE et TM.....	9
I.4.2.3/ Diagramme de bande	10
I.4.3/ le cristal photonique tridimensionnel 3D.....	11
I.5/ défaut dans les cristaux photoniques.....	12
I.5.1/ les défauts ponctuels.....	12
I.5.2/ les défauts linéaires.....	13
I.6/ application des cristaux photoniques.....	13
I.7/ technologie et matériaux.....	14
I.8/ techniques de modélisation.....	15
I.8.1/ méthode des ondes planes PWE.....	15
I.8.2/ la méthode FDTD.....	15
Conclusion.....	16
Références bibliographique.....	17

Chapitre II : filtre optique à cavités résonantes à cristaux photonique

II.1/Introduction.....	19
II.2/ Les filtres optiques.....	19
II.3/ Cavités a cristaux photoniques.....	20
II.4/ Propriétés des cavités a cristaux photoniques.....	21
II.5/ géométrie de cavités.....	22
II.6/ les types de cavités à cristaux photoniques bidimensionnels.....	23
II.6.1/ cavités a défaut ponctuel.....	23
II.6.1.1/ les cavités Hn.....	24
II.6.1.2/ les cavités Ln.....	26
II.6.2/ cavités a défauts couplés.....	27
II.6.2.1/ les cavités a hétéro-structures.....	27
II.7/ influence des modifications des dimensions d'une cavité résonante sur sa résonance.....	28
II.8/Quelques topologies des filtres à base de cavités a cristaux photoniques.....	29
II.8.1/ première topologie.....	29
II.8.2/ deuxième topologies.....	29
II.9/ Applications des filtres à base de cavités à cristaux photoniques.....	30
II.9.1/ Démultiplexeurs en longueur d'onde.....	30
Conclusion.....	32
Référence bibliographique.....	33

Chapitre III : Résultats et interprétations

III.1/ introduction.....	36
III.2/ Présentation du logiciel RSOFT CAD	36
III.2.1/ Simulateur Bandsolve.....	37
III.2.2/ Simulateur Fullwave	38
III.3/ Structure d'étude	38
III.4/ Filtre à cristaux photoniques.....	42
III.4.1/ Structure de base.....	42
III.4.2/ Structure modifiée.....	42
III.4.2.1/ Modification de la longueur du réflecteur.....	42

III.4.2.2/ Modification de la distance de couplage.....	44
III.4.2.2.1/ Pour $D_c=2$	44
III.4.2.2.2/Pour $D_c=3$	44
III.4.2.3/ Modification du rayon des tiges de couplage pour $D_c=2$	47
III.5/ Démultiplexeur à cristaux photoniques.....	49
III.5.1/ Modification de la distance entre les canaux.....	51
III.5.2/Modification de la longueur du réflecteur.....	51
Conclusion.....	53
Références bibliographiques.....	54
Conclusion générale.....	55

Introduction Générale

Introduction générale

Depuis plusieurs décennies, la recherche en nanotechnologie a permis d'explorer et de découvrir de nouveaux matériaux artificiels qui peuvent contrôler la propagation de la lumière, ouvrant la voie à de nombreuses applications dans la communication optique.

Les cristaux photoniques sont des matériaux artificiels qui ont une structure périodique dans l'espace, de sorte que les ondes électromagnétiques qui les traversent subissent une réflexion ou une diffraction constructive et destructive. Ils sont souvent construits à partir de matériaux diélectriques tels que le silicium. Les cristaux photoniques ont des propriétés optiques uniques, qui sont principalement liées à la présence de la bande interdite photonique (BIP) [1, 2]. Ils offrent une plateforme prometteuse pour la réalisation de divers composants optiques avancés. Leur structure périodique permet de manipuler et de contrôler la propagation de la lumière de manière précise, ce qui ouvre la voie à la conception de composants optiques innovants et performants. Parmi les composants à base de cristaux photoniques, on trouve notamment les guides d'onde, les filtres, les lasers, les diviseurs de puissance...

L'objectif de ce mémoire consiste à examiner la conception et l'analyse de dispositifs à base de cristaux bidimensionnels et plus précisément à explorer l'utilisation de cavités résonantes pour la réalisation de filtres optiques.

En effet, nous allons présenter un travail partagé en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous examinerons les caractéristiques générales des cristaux photoniques, notamment leur définition et leurs types, ainsi que les différents types de défauts que l'on peut rencontrer dans ces structures périodiques, de la technologie et des matériaux utilisés pour leur fabrication, ainsi que des techniques de modélisation qui permettent de comprendre leur comportement optique. Enfin, nous conclurons ce chapitre en soulignant l'importance des cristaux photoniques pour la recherche fondamentale et les applications technologiques futures.

Dans le deuxième chapitre, nous allons explorer les différentes propriétés des cavités à cristaux photoniques et leurs types existants, ainsi que les topologies des filtres optiques qui peuvent être réalisées à partir de ces cavités. Nous examinerons également l'influence des

modifications des dimensions d'une cavité sur sa résonance et les différentes géométries de cavités qui peuvent être utilisées.

Le troisième chapitre mettra en évidence l'utilisation du logiciel de simulation Fullwave pour la conception et l'optimisation de filtres optiques et de démultiplexeurs. Il démontrera comment cet outil puissant nous permet de simuler et d'améliorer les performances des dispositifs optiques, ouvrant ainsi la voie à de nouvelles avancées dans le domaine de la photonique intégrée et des communications optiques.

Enfin, nous terminerons notre travail par une conclusion générale.

Références bibliographiques

[1] Yablonovitch, « Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics, » Phys. Rev. Lett. 58, 2059–2062 (1987).

[2] S. John, « Localization of photons in certain disordered dielectric superlattices, » Phys. Rev. Lett. 58, 2486–2489 (1987).

Chapitre I
Généralités sur les cristaux
photoniques

I.1/ Introduction :

Depuis une trentaine d'années, les chercheurs se sont focalisés à concevoir des dispositifs microscopiques permettant de guider, capter, piéger ou filtrer la lumière. Dans cette perspective, une attention particulière a été accordée à l'étude des cristaux photoniques, appelés aussi matériaux à bandes interdites photoniques. Ces matériaux se distinguent par leur structure périodique à l'échelle microscopique, qui permet de manipuler la propagation de la lumière de manière précise et contrôlée.

Le chapitre présent a pour objectif de fournir une vue d'ensemble des cristaux photoniques, en abordant différents aspects tels que les différents types de cristaux photoniques (CPs), les défauts qui peuvent être présents dans ces cristaux, les domaines d'application optique qui en découlent, ainsi que les techniques de modélisation utilisées pour étudier ces matériaux.

I.2/ Définition des cristaux photoniques :

Les cristaux photoniques sont des structures périodiques artificielles qui présentent une modulation périodique de l'indice de réfraction dans une, deux ou trois directions de l'espace, comme le montre la figure I.1. Cette structure périodique confère aux cristaux photoniques des propriétés optiques uniques qui diffèrent de celles des matériaux traditionnels. L'une des caractéristiques clés des cristaux photoniques est la présence d'une bande interdite photonique. Cette bande interdite est une gamme de fréquences ou de longueurs d'onde dans laquelle la propagation de la lumière est interdite. Elle résulte de l'interférence constructive et destructive de la lumière dans la structure périodique des cristaux photoniques. La bande interdite photonique permet de contrôler et de manipuler la propagation de la lumière de manière sélective, ce qui ouvre la voie à de nombreuses applications optiques tels que les lasers, les modulateurs, les détecteurs et les filtres optiques.

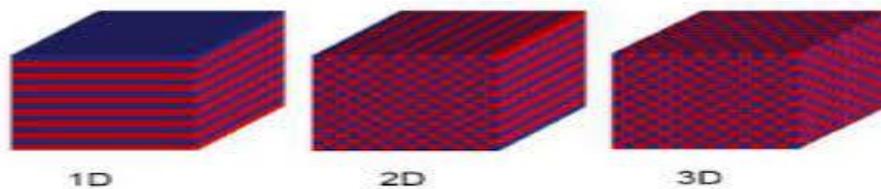


Figure I.1 : Différents types des cristaux photoniques : 1D, 2D et 3D.

I.3/ Cristaux photoniques naturels :

Les cristaux photoniques naturels sont des structures périodiques qui se trouvent dans certains organismes vivants tels que les papillons, les coléoptères, les abeilles, les oiseaux, les poissons et les coquillages, comme il est présenté sur la figure I.2. Ces structures sont composées de matériaux tels que la chitine, les protéines et les pigments et sont capable de manipuler la lumière de manière spectaculaire.

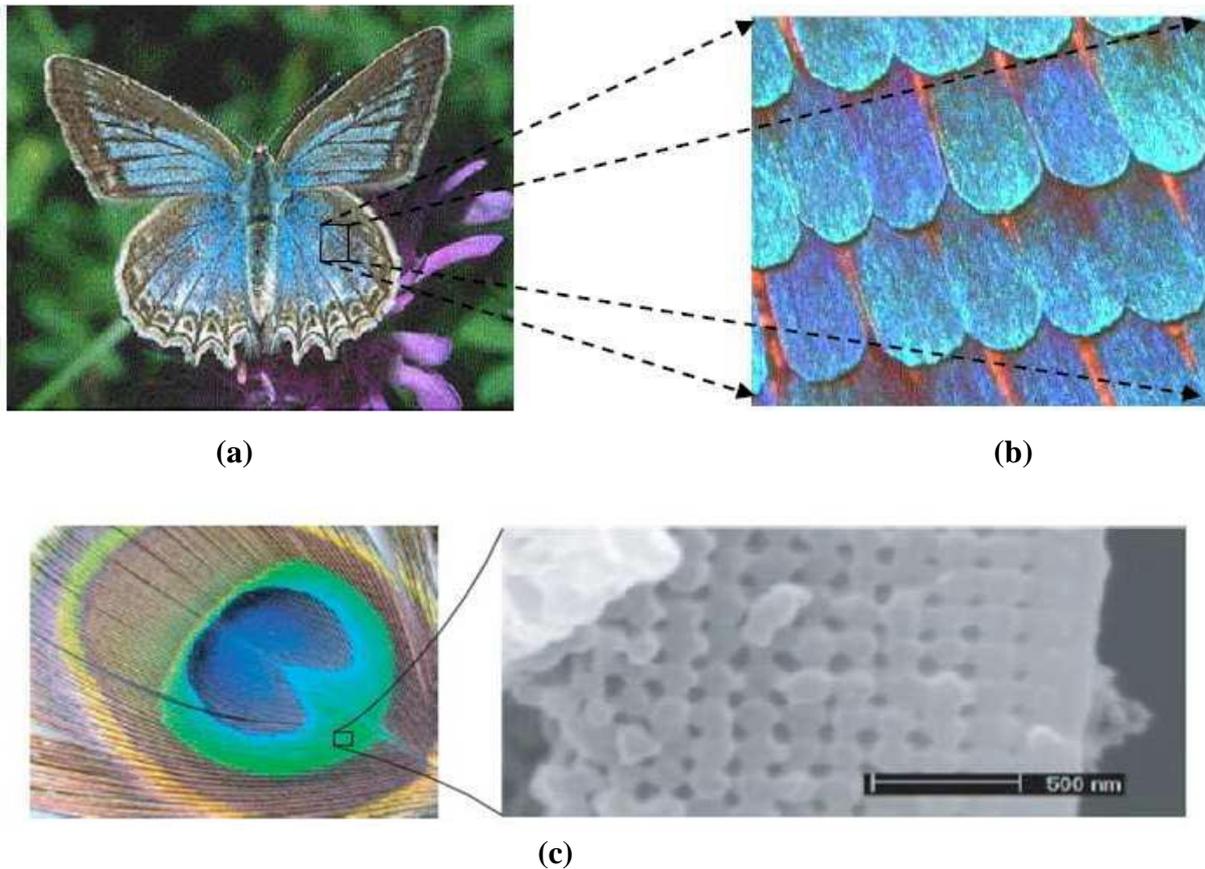


Figure I.2 : exemple des cristaux photoniques naturels : **(a)** : Aile de papillon, **(b)** : Coupe d'une aile de papillon observée au MEB, **(c)** : Plume de paon. L'encadré de droite est une image prise au microscope électronique : La structure cristal photonique 2D [1].

Un autre exemple bien connu des cristaux photoniques naturels est l'opale, qui est montrée sur la figure I.3 et composée de sphères de silice arrangées de manière périodique. En raison de cette structure périodique, l'opale présente une bande interdite photonique qui permet de réfléchir sélectivement certaines longueurs d'onde de la lumière visible, ce qui lui confère sa couleur caractéristique.

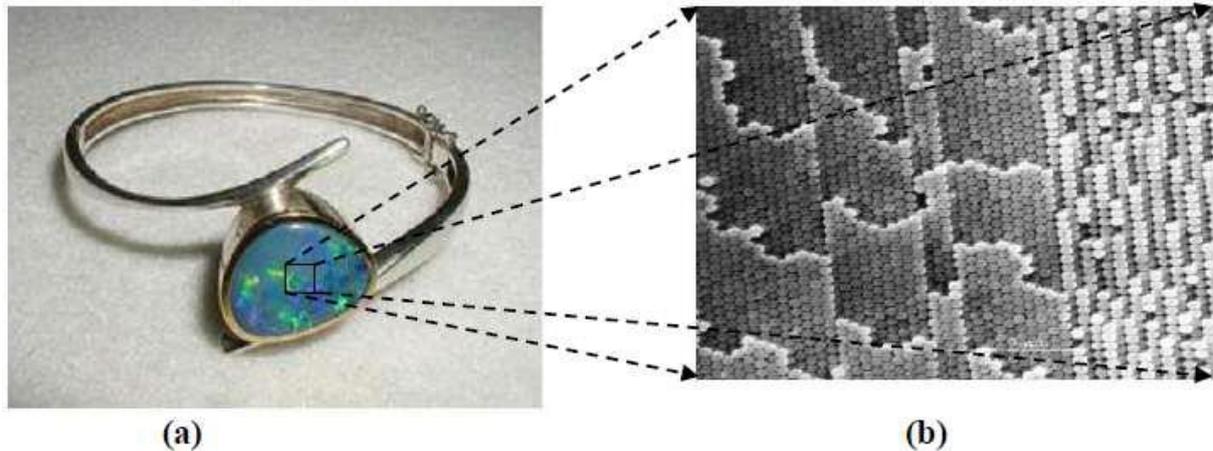


Figure I.3 : (a) Bracelet monté d'une opale naturelle quasi-périodiques bille de silice (b) Image au microscope électronique d'une opale naturelle [1].

I.4/ Types des cristaux photoniques :

Il existe différents types de cristaux photoniques, chacun ayant ses propres caractéristiques et applications, nous citons :

I.4.1/ Cristal photonique unidimensionnel 1D :

Les cristaux photoniques unidimensionnels sont des structures périodiques qui modulent la propagation de la lumière le long d'une direction spécifique, comme il est illustré sur la figure I.3. Ils sont également connus sous le nom de "miroirs de Bragg" en raison de leur similitude avec les miroirs optiques classiques. Ces cristaux photoniques unidimensionnels sont composés d'un empilement multicouche de matériaux avec des indices de réfraction alternés.

Lorsque la lumière traverse un cristal photonique unidimensionnel, elle rencontre une série d'interfaces entre deux matériaux différents. À chaque interface, une partie de la lumière est réfléchi, tandis que le reste continue de se propager à travers le cristal. Cette réflexion se produit en raison de la différence d'indice de réfraction entre les deux matériaux. La modulation périodique de l'indice de réfraction dans le cristal photonique conduit à une réflexion constructive de la lumière dans une plage spécifique de longueurs d'onde, appelée bande interdite photonique.

Les cristaux photoniques unidimensionnels offrent donc une plateforme pour manipuler et contrôler la propagation de la lumière dans une direction spécifique. Ils sont utilisés dans une variété d'applications optiques, telles que les miroirs diélectriques, les filtres optiques sélectifs en longueur d'onde, les guides d'ondes optiques et les résonateurs optiques.

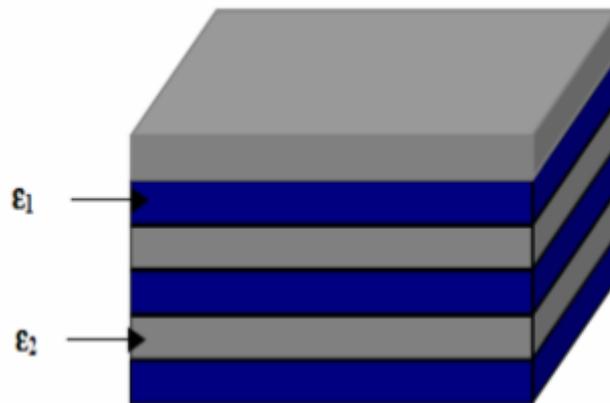


Figure I.4 : Schéma d'un miroir de Bragg constitué d'un milieu diélectrique périodique fini.

I.4.2/ Cristal photonique bidimensionnel 2D :

Les cristaux photoniques à deux dimensions (2D) sont des structures périodiques qui offrent un contrôle précis de la propagation de la lumière dans un plan bidimensionnel. Ces cristaux sont généralement réalisés en empilant des couches minces de matériaux diélectriques avec des épaisseurs précises et des indices de réfraction différents. La périodicité de ces structures permet de créer des bandes interdites photonique, où la propagation de certaines longueurs d'onde de lumière est fortement inhibée.

Les cristaux photoniques bidimensionnels offrent une gamme d'applications optiques variées. Ils sont utilisés dans la conception de filtres optiques sélectifs en longueur d'onde, de guides d'ondes optiques et de résonateurs optiques. Le contrôle précis de la propagation de la lumière dans un plan bidimensionnel permet d'obtenir des fonctionnalités optiques hautement personnalisables et adaptées à diverses applications, telles que les communications optiques, les capteurs optiques, l'imagerie optique et la photonique intégrée.

Les cristaux photoniques à deux dimensions peuvent être classés en deux types principaux en fonction de la configuration de leur structure périodique : les structures connectées et les structures déconnectées.

* **structures déconnectées** : Elles sont caractérisées par un indice de réfraction n_1 supérieur à l'indice de réfraction n_2 , comme il est montré sur la figure I.5. Ces structures sont constituées de tiges diélectriques alignées périodiquement dans un milieu diélectrique, tel que l'air [2].

* **structures connectées** : Elles sont caractérisées par un indice de réfraction n_1 inférieur à l'indice de réfraction n_2 de la matrice diélectrique environnante, comme le montre la figure I.5 [2]. Ces structures peuvent être constituées de trous d'air (ou de tout autre matériau avec un indice de réfraction plus faible) dans une membrane diélectrique (matériau avec un indice de réfraction plus élevé).

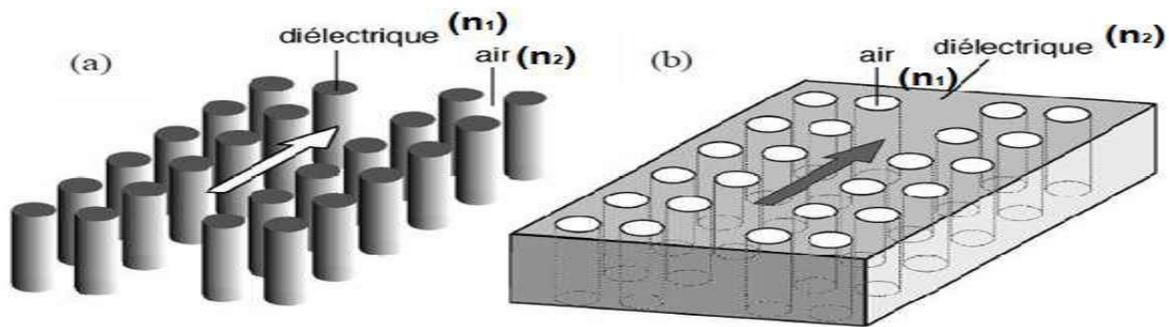


Figure I.5: (a) structure déconnectée et (b) structure connectée [3].

I.4.2.1/ Familles des cristaux photoniques 2D :

Les cristaux photoniques bidimensionnels peuvent être classés en différentes familles en fonction de la configuration de leur réseau périodique. La sélection d'une famille de cristaux photoniques dépend des besoins spécifiques de l'application, tels que la plage de longueurs d'onde, la direction de propagation de la lumière et les performances recherchées. Voici quelques exemples de familles courantes :

* **cristaux photoniques bidimensionnels à réseau carré** : Dans cette famille, les tiges ou les trous d'air sont disposés selon une grille carrée régulière, comme il est présenté sur la figure I.6.a.

* **cristaux photoniques bidimensionnels à réseau triangulaire** : Dans cette configuration, les tiges diélectriques ou les trous sont disposés selon une structure périodique de type triangle équilatéral, comme il est montré sur la figure I.6.b.

* **cristaux photoniques bidimensionnels à réseau hexagonal** : Dans cette famille, les tiges diélectriques sont disposés selon une structure hexagonale régulière, Comme le montre la figure I.6.c.

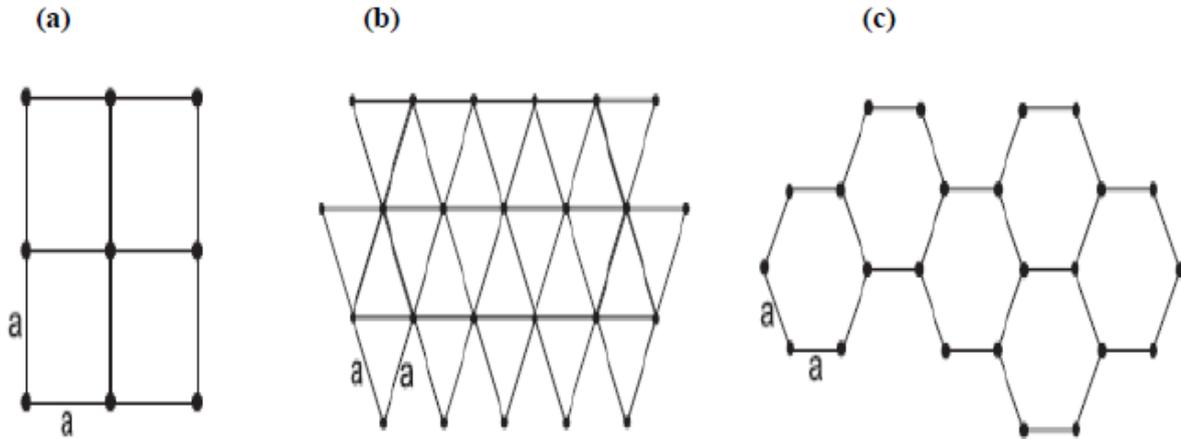


Figure I.6 : Familles des cristaux photoniques 2D : (a) réseau carré, (b) réseau triangulaire et (c) réseau hexagonal [4].

I.4.2.2/ Polarisation TE et TM :

Dans un cristal photonique bidimensionnel, les modes TE (Transverse Electric) et TM (Transverse Magnetic) font référence aux différents types de modes de polarisation transverse de la lumière qui se propage à travers la structure. Dans ces modes, les champs électriques et magnétiques oscillent dans des plans perpendiculaires à la direction de propagation de la lumière.

Dans le mode TE, le champ électrique est perpendiculaire à la direction de propagation de la lumière et oscille dans le plan du cristal photonique. Le champ magnétique quant à lui, est parallèle à la direction de propagation et oscille perpendiculairement au plan du cristal photonique. Dans le mode TM, c'est l'inverse : le champ magnétique est perpendiculaire à la direction de propagation et oscille dans le plan du cristal photonique, tandis que le champ électrique est parallèle à la direction de propagation et oscille perpendiculairement au plan du cristal photonique.

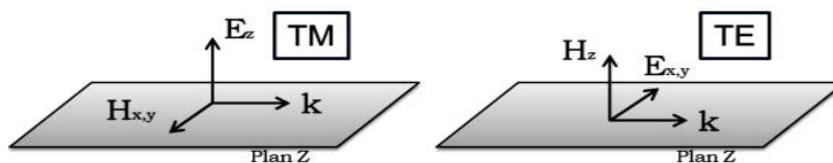


Figure I.7 : Représentation des polarisations TE et TM pour les cristaux photoniques 2D.

I.4.2.3/ Diagramme de bande :

Le cristal photonique est caractérisé par son diagramme de dispersion. La définition du diagramme de bandes ou des surfaces de dispersion consistera à reporter les courbes de dispersion $\omega_n(k)$ représentant la variation de la fréquence des modes en fonction du module du vecteur k le long des directions de haute symétrie : ΓM , ΓK et KM . Pour le réseau périodique. Donc, pour avoir la structure de bandes photoniques, il faut balayer la zone de Brouillon irréductible. Un exemple de diagramme de bandes, calculé pour un cristal de réseau triangulaire de trous d'air percés dans le silicium ($\epsilon = 12$) et pour un rapport $r/a=0.45$ avec r le rayon des trous et a la période du réseau, le diagramme de bande est représenté sur la figure I,8 les polarisations se distinguent par des traits différents. L'un des principaux résultats de cette figure concerne la différence de comportement entre les polarisations TM (Transverse magnétique : le champ E est parallèle aux tiges) et TE (Transverse électrique : le champ E est perpendiculaire aux tiges). Une large bande interdite photonique est visible apparaît pour la polarisation TE et une bande plus réduite pour la polarisation TM [5].

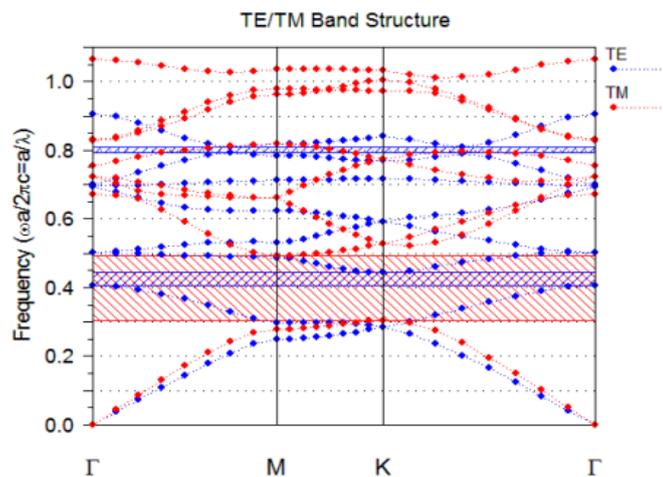


Figure I.8 : Diagramme de bande d'un cristal photonique bidimensionnel de réseau triangulaire [5].

Le diagramme de bande représente donc les modes possibles en fonction de la longueur d'onde et du vecteur d'onde. Cette étude permet de déterminer si le matériau possède une bande de fréquence interdite commune à tous les angles de propagation envisageables. C'est-à-dire que, pour chaque nombre d'onde, il existe plusieurs fréquences de propagation de chaque mode [6].

I.4.3/ Cristal photonique tridimensionnel 3D :

Les cristaux photoniques tridimensionnels sont des structures périodiques qui permettent de contrôler la lumière dans les trois dimensions de l'espace. Ils peuvent être réalisés en empilant des couches minces de matériaux diélectriques ou en utilisant des techniques de lithographie tridimensionnelles.

Les cristaux photoniques tridimensionnels ont une grande importance dans les domaines de la photonique, ils offrent des possibilités pour la création de composants optiques avancés tels que des lentilles à super-résolution, des miroirs à champ proche et des guides d'onde.

La Yablonovite (voir figure I.8) est un exemple notable de cristal photonique tridimensionnel. Elle a été créée en 1993 par E. Yablonovitch [7] en utilisant une technique de perforation de trous dans un bloc de plexiglass. Les trous sont percés selon trois angles différents de $35,26^\circ$ par rapport à la verticale. Cette structure périodique de trous dans le matériau forme une structure cristalline tridimensionnelle similaire à celle d'un cristal diamant.

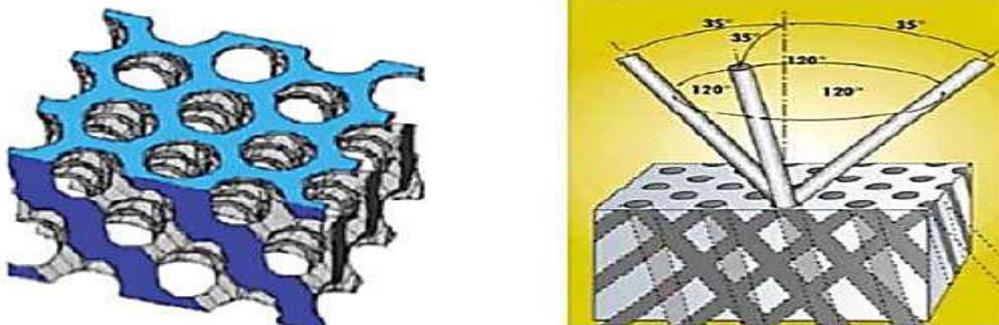


Figure I.9 : la Yablonovite [8]

Une autre structure tridimensionnelle courante est la structure de type "tas de bois" (ou "woodpile" en anglais). Cette structure (Figure I.10) présente une bande interdite complète et est relativement simple à fabriquer. Pour créer cette structure, des rubans de silicium polycristallin sont déposés en couches successives dans des tranchées de silice. Une fois la structure assemblée, la silice est ensuite gravée pour obtenir un cristal photonique tridimensionnel composé de silicium dans de l'air [9].

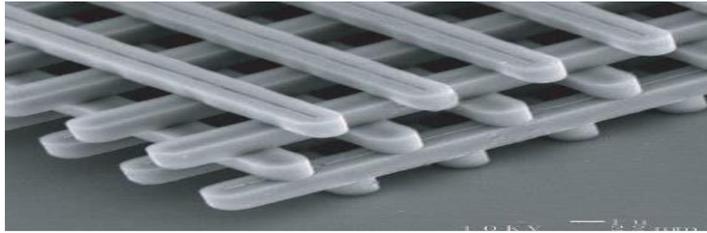


Figure I.10 : structure tas de bois [10].

I.5/ Défauts dans les cristaux photoniques :

Comme toute structure physique, les cristaux photoniques peuvent présenter des défauts qui affectent leur fonctionnement optique. Ces défauts peuvent être classés en deux types principaux : les défauts ponctuels (cavité) et les défauts linéaires (guides).

I.5.1/ Défauts ponctuels :

Egalement connus sous le nom de cavités à cristaux photoniques, sont des régions spéciales à l'intérieur d'un cristal photonique dans lesquelles sa périodicité sera localement brisée. Ces défauts peuvent être créés en omettant un seul motif de la structure ou en modifiant sa taille, comme on peut le voir sur la figure I.11. La présence de ces défauts permet de créer des régions où les propriétés optiques du cristal sont modifiées. Les photons peuvent être piégés à l'intérieur de ces cavités, ce qui crée des modes de résonance dans la bande photonique interdite du cristal photonique.

Les modes de résonance formés dans les cavités photoniques peuvent avoir des fréquences de résonance très précises et des facteurs de qualité élevés. Cela signifie qu'ils peuvent avoir une réponse très sélective à certaines fréquences de lumière et présenter une faible atténuation des signaux optiques qui les traversent. En conséquence, les cavités photoniques sont utilisées dans de nombreuses applications optiques, telles que les lasers et les filtres optiques.

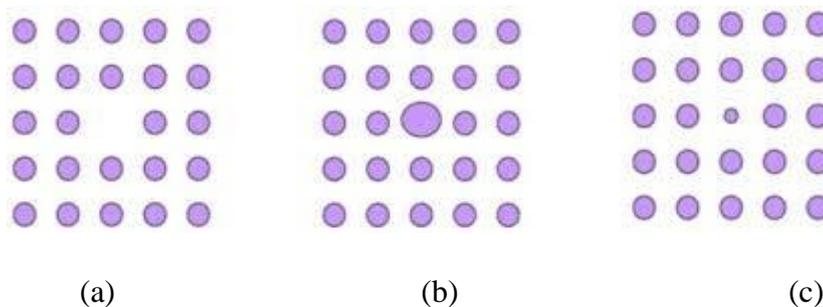


Figure I.11 : Exemple de défauts ponctuels : (a) défaut lacunaire, (b) et (c) défauts de substitution.

I.5.2/ Défauts linéaires :

Egalement connus sous le nom de guides d'ondes à cristaux photoniques, sont des régions dans lesquelles la périodicité de la structure cristalline est perturbée selon une ligne spécifique. Ces guides permettent de contrôler et de manipuler la propagation de la lumière, offrant ainsi des fonctionnalités importantes dans les dispositifs photoniques. Le défaut linéaire peut être réalisé en supprimant une seule ligne de motifs du cristal photonique ou en modifiant leurs tailles, comme le montre la figure I.12.

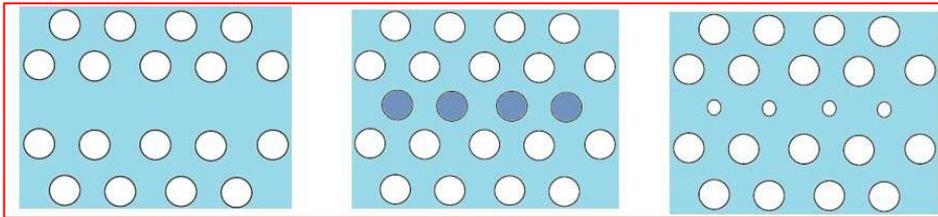


Figure I.12 : Exemples de défauts linéaires dans un cristal photonique 2D créés (a) en omettant une seule rangée de motifs, (b) en modifiant l'indice de réfraction d'une seule rangée de motifs et (c) en variant le rayon d'une seule rangée de motifs de la structure [9].

I.6/ Applications des cristaux photoniques :

Les cavités résonantes et les guides d'ondes à cristaux photoniques ont été largement étudiés en raison de leur importance en tant que composants de base des circuits photoniques intégrés. Sur la base de ces composants, de nombreux dispositifs ont été proposés et démontrés au cours des dernières années dans différents domaines disciplinaires [15-25]. La Figure I.13 illustre quelques exemples de ces dispositifs. Ces dispositifs ont ouvert de nouvelles perspectives pour la conception de circuits photoniques intégrés avancés et de systèmes optiques performants. Ils offrent des avantages tels que des performances optiques élevées, une miniaturisation, une faible consommation d'énergie et une intégration facile avec d'autres composants optoélectroniques.

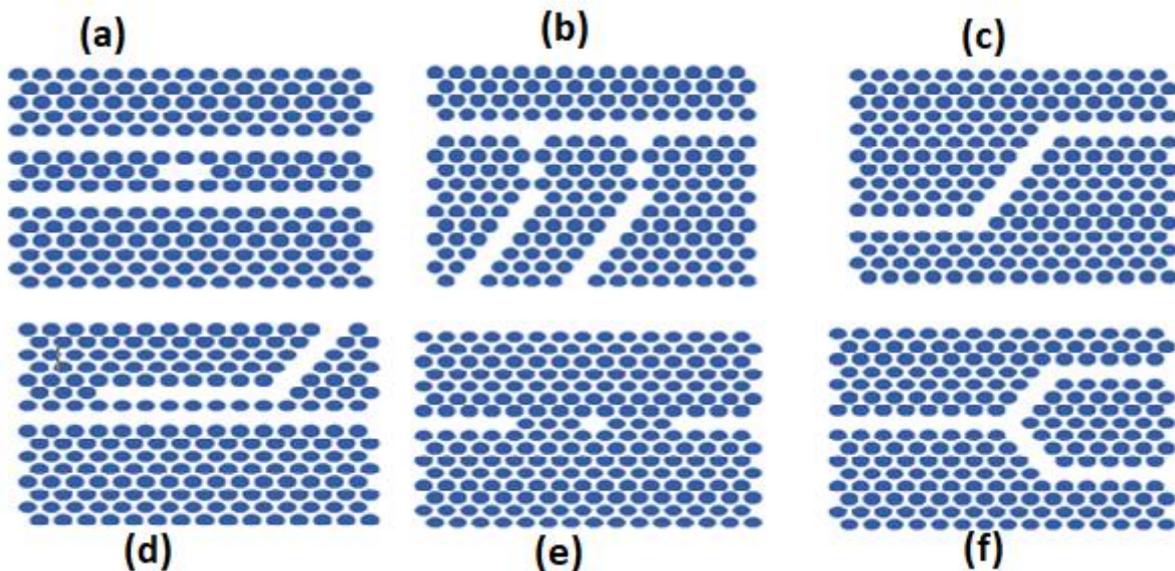


Figure I.13 : Dispositifs à base de cristaux photoniques 2D : (a) filtre ; (b) démultiplexeur; (c) double virage; (d) coupleur directionnel ; (e) biocapteur ; (f) diviseur de puissance [11].

I.7/ Technologie et matériaux :

La technologie de fabrication des cristaux photoniques a également évolué pour produire des cristaux photoniques de haute qualité avec des structures plus complexes et précises.

Les cristaux photoniques sont fabriqués à partir de différents matériaux, tels que les cristaux de silicium, les polymères, les semi-conducteurs, les céramiques, les métaux.

Pour fabriquer des cristaux photoniques pour la lumière visible ou proche infrarouge, il est nécessaire d'utiliser des matériaux transparents dans ces gammes de longueurs d'ondes et ayant une constante diélectrique élevée. Les semi-conducteurs sont adaptés à cette fin, en particulier les semi-conducteurs III-V qui ont de bonnes propriétés optiques grâce à leur gap électronique direct. Ils sont couramment utilisés pour les structures actives telles que les émetteurs de lumière, mais peuvent également être utilisés pour les appareils passifs. Leur principal inconvénient est leur coût élevé, bien que des recherches soient en cours pour les rendre plus abordables en les reportant sur un substrat de silicium [12].

En revanche, les semi-conducteurs IV-IV sont moins coûteux et mieux maîtrisés technologiquement grâce aux progrès de la microélectronique. Cependant, ils ne sont pas très adaptés à la fabrication de dispositifs actifs en raison de leur gap indirect et de leurs propriétés médiocres en termes d'émission de lumière. Néanmoins, les boîtes et puits quantiques d'alliages SiGe sont prometteurs [13]. Les progrès récents ont été réalisés dans l'émission de lumière du

silicium à température ambiante [14, 15, 16] rendant les semi-conducteurs IV-IV de plus en plus attractifs.

I.8/ Techniques de modélisation :

Les techniques de modélisation des cristaux photoniques sont des outils essentiels pour comprendre et prédire le comportement optique de ces structures périodiques. Deux techniques principales sont couramment utilisées : la méthode des différences finies dans le domaine temporel (Finite Difference Time Domain, FDTD) et la méthode des ondes planes (Plane Wave Expansion, PWE).

I.8.1/ Méthode des ondes planes (PWE) :

C'est la première méthode utilisée pour calculer les structures de bande d'énergie des cristaux photoniques [17, 18, 19, 20]. Cette méthode consiste à représenter le champ électromagnétique dans la structure périodique comme une somme d'ondes planes (ou ondes harmoniques) ayant des fréquences et des directions spécifiques. L'écriture des équations de Maxwell dans cette base conduit à une équation aux valeurs propres dont la résolution permet d'obtenir les relations de dispersion reliant la fréquence au vecteur d'onde [17, 21, 22]. Les avantages de cette méthode sont sa rapidité et sa précision de calcul.

I.8.2/ la méthode FDTD :

La technique FDTD est une méthode numérique qui a été initialement proposée par Kane S. Yee en 1966 [23] pour résoudre les problèmes impliquant les équations de Maxwell dans les milieux isotropes avec les conditions aux limites. Cette méthode permet de résoudre numériquement les équations de Maxwell pour une large gamme de structures et de géométries [24]. Cette méthode est souvent utilisée pour simuler la propagation de la lumière dans les cristaux photoniques qui sont des structures périodiques qui modifient le comportement de la lumière en fonction de leur géométrie et de leurs propriétés optiques.

Dans la technique FDTD, on discrétise l'espace et le temps en petites cellules, puis on approxime les équations de Maxwell en utilisant des différences finies. Cette technique présente plusieurs avantages, notamment leur simplicité, leur flexibilité et leur capacité à modéliser des structures complexes.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé plusieurs aspects des cristaux photoniques. Nous avons commencé par discuter des généralités des cristaux photoniques, mettant en évidence leur nature périodique et leur capacité à moduler la propagation de la lumière. Ensuite, nous avons exploré la possibilité d'introduire des défauts dans la structure des cristaux photoniques. Ces défauts, tels que les cavités résonantes et les guides d'ondes, perturbent la périodicité du cristal et permettent de guider et de contrôler la propagation de la lumière. Enfin, nous avons mentionné quelques exemples d'applications des cristaux photoniques. Nous avons souligné leur utilisation dans des domaines tels que l'optique, la photonique et les télécommunications.

Références bibliographiques

- [1] M. Yannick, « Etude de la dispersion électromagnétique dans les matériaux périodiques diélectriques bidimensionnels », thèse de doctorat, université de limoges, 2003.
- [2] B. Lombardet. « Étude Et Réalisation De Cristaux Photoniques Pour L'optique intégrée ». Thèse De Doctorat, École Polytechnique Fédérale De Lausann, 2005
- [3] F.Lallam, « Conception de Nouvelles topologies des Démultiplexeurs Sèlectifs à plusieurs canaux el longueurs d'ondes à base de Cristaux Photoniques Bidimensionnels», Thèse de doctorat, Université De Tlemcen, Avril 2019.
- [4] A.Amirouche ,«Contribution à l'étude des microcavités à base des cristaux photoniques», thèse de doctorat, Université Mohamed Seddik Ben Yahiya–Jijel,2017
- [5] A. Benmerkhi, M. Bouchemat, T. Bouchemat, N. Paraire, Efficient coupling between a high-Q cavity and a waveguide based on two-dimensional photonic crystal, J. Physica Scripta, vol. 151, pp. 14065–14069, 2012.
- [6] R.Mokhtari, « Contribution à L'étude et La Conception Des Cavités à Cristaux Magnéto Photoniques » .These de Doctorat, Université de Mohamed Boudiaf de M'sila ,2018
- [7] E. Yablonovitch, « Photonic band-gap structures », J. Opt. Soc. Am. B, vol. 10, pp. 283–295, 1993.
- [8] C.J.M. Smith t al, « Coupled guide and cavity in a two-dimensional photonic crystal ». Applied physics letters 2001.
- [9] R.Bendjelloul « Etude et caractérisation de circuits photoniques à base de cristaux photoniques de micro piliers : Application aux filtres à base de résonateurs », Thèse de Doctorat, Université de Constantine, juillet 2017.
- [10] S.Y. Lin, J. G. Fleming, D. L. Hetherington, B. K. Smith, R. Biswas, K. M. Ho, M. M. Sigalas, W. Zubrzycki, S. R. Kurtz, J. Bur, « A three-dimensional photonic crystal operating at infrared wavelengths, » Nature, vol. 394, pp. 251–253, 1998
- [11] D.Neel, « Etude en champ proche optique de guides à cristaux photoniques », Thèse de Doctorat, L'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2006.

- [12] C. Monat, C. Seassal, X. Letartre, P. Regreny, M. Gendry, P. Rojo-Romeo, P. Viktorovitch, M. Le Vassor
- [13] S. David, « Etude de composants à cristaux photoniques dans la filière silicium pour les longueurs d'ondes des télécommunications optiques », Thèse de doctorat, Université Paris XI 2003.
- [14] W. L. Ng, M. A. Lourenço, R. M. Gwilliam, S. Ledain, G. Shao et K. P. Homewood, An efficient roomtemperature silicon-based light-emitting diode, *Nature* 410, p. 192 ,2001.
- [15] T. Trupke, J. Zhao, A. Wang, R. Corkish et M. A. Green, Very efficient light emission from bulk crystalline silicon, *Applied Physics Letters* 82, p. 2996 , 2003.
- [16] D. Sotta, « Milieux émetteurs de lumière et microcavité optique en silicium monocristallin sur isolant »,Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier - Grenoble 1,2002.
- [17] K. M. Leung and Y. F. Liu, « Photonic Band Structures : the Plane-Wave Method » *Phys. Rev. B*, 41, p.10188,1990.
- [18] P. R. Villeneuve and M. Piche, « Photonic band gap of transverse-electric modes in two dimensionally periodic media », *Journal of optical society of America A*8,1296,1991.
- [19] M. Sigalas, C. M. Soukoulis, E. N. Economou, C. T. Chan, and K. M. Ho, « Photonic band gaps and defects in two dimensions: Studies of the transmission coefficient », *Phys. Rev. B* 48, p.14121,1993.
- [20] R. D. Meade, Karl D. Brommer, Andrew M. R, and J. D. Joannopoulos, « Photonic bound states in periodic dielectric materials », *Phs. Rev. B*, 44, pp13772-13774,1991.
- [21] K. M. Leung and Y. F. Liu, « Full vector wave calculation of photonic band structures in the face-centred-cubic dielectric media », *Phys. Rev. Lett.* 65, 2646,1990.
- [22] K. M. Ho, C. T. Chan, and C. M. Soukoulis, « Existence of a Photonic Gap in Periodique Dielectric Structures », *Phy. Rev. Lett.* 65, p.3152,1990.
- [23] E. Yablonivitch, T. J. Gmitter, K. M. Leung, « Photonic Band Structure : The Face-centred-Cubic Case Employing Nonspherical Atoms », *Phy. Rev. Lett.*,67,p2295-2298,1991.
- [24] T. Briallat , « Définition, réalisation et caractérisation de matériaux à Bandes photoniques Interdites reconfigurables en Micro-ondes », thèse de Doctorat, Univ.de Paris X, décembre 2000.

Chapitre II
***Filtre optique à cavités
résonnantes à cristaux
photoniques***

II.1/ Introduction :

Les cristaux photoniques offrent des possibilités fascinantes pour le développement de composants optiques avancés. Leur structure périodique permet de moduler la propagation de la lumière de manière précise et contrôlée, ouvrant ainsi la voie à de nombreuses applications dans le domaine de l'optique et de la photonique.

Parmi les composants optiques les plus couramment étudiés et exploités dans les cristaux photoniques, nous trouvons les filtres optiques. Les filtres jouent un rôle essentiel dans la manipulation de la lumière en sélectionnant des longueurs d'onde spécifiques et en rejetant les autres. Ils sont utilisés dans de nombreuses applications, allant des télécommunications à l'imagerie optique en passant par les capteurs optiques.

Dans ce contexte, ce chapitre se concentre sur l'étude des filtres basés sur les cristaux photoniques. Nous explorerons les principes de fonctionnement de ces filtres, leurs caractéristiques et leurs performances. Par la suite, nous présenterons différentes configurations des filtres optiques à cristaux photoniques en détaillant les types de résonateurs utilisés. Les résonateurs peuvent être des microcavités optiques, des résonateurs en anneaux à cristaux photoniques ou d'autres structures spécifiques qui exploitent les propriétés de résonance des cristaux photoniques pour filtrer la lumière.

II.2/ Filtres à cristaux photoniques :

Les filtres à base de cristaux photoniques offrent une alternative prometteuse aux filtres conventionnels en termes de taille réduite et de performances améliorées. Leur utilisation permet de répondre aux exigences croissantes des circuits photoniques intégrés et ouvre de nouvelles perspectives pour les applications optiques avancées. Ces filtres peuvent être utilisés dans une variété d'applications, telles que les communications optiques, les systèmes de détection et les dispositifs optiques à haut débit.

Il existe de nombreuses configurations de filtres à base de cristaux photoniques dans la littérature. Une conception courante de ces filtres utilise des résonateurs optiques pour sélectionner une seule fréquence spécifique correspondant à la fréquence de résonance du résonateur. Un résonateur est un dispositif qui permet de confiner l'énergie d'une onde électromagnétique à certaines fréquences. En utilisant les propriétés des cristaux photoniques, il est possible de concevoir des résonateurs optiques à petite échelle, ce qui permet de réduire

considérablement la taille des filtres. Ces résonateurs peuvent être basés sur différentes structures, telles que des cavités résonantes ou des résonateurs en anneaux. Chaque configuration offre des avantages spécifiques en termes de sélectivité, de facteur de qualité et de facilité de fabrication.

II.3/ Cavités à cristaux photoniques :

Une cavité optique est généralement constituée de deux miroir hautement réfléchissants placés face à face et espacés d'une certaine distance. Lorsqu'un faisceau de lumière est envoyé dans la cavité, il est réfléchi d'avant en arrière entre les deux miroirs, créant une résonance optique. Cette résonance peut être utilisée pour amplifier la lumière dans un laser ou pour filtrer des longueurs d'ondes spécifiques dans un filtre optique.

Dans le contexte des cristaux photoniques, La cavité photonique peut être créée en brisant la périodicité du cristal photonique. Cela peut se faire en modifiant la taille, la forme ou l'indice de réfraction d'un ou plusieurs motifs (trous ou tiges) du cristal photonique. La formation d'une cavité photonique permet de créer des modes de défauts qui sont caractérisés par des fréquences spécifiques, appelées fréquences de résonance, situées dans la bande interdite photoniques. Historiquement, les premières cavités ont été réalisées à partir de structures unidimensionnelles en 1996 [1], et en 1997 avec des cristaux photoniques bidimensionnels [2]. La figure II.1 montre quelques exemples de cavités à cristaux photoniques.

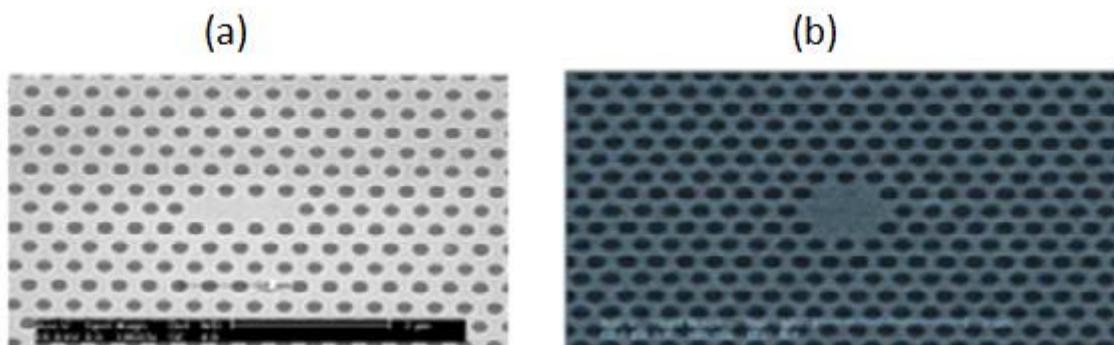


Figure II.1 : Types de cavités : (a) une cavité L3 et (b) une cavité H2.

Les cavités photoniques sont largement utilisées dans de nombreux dispositifs optiques, tels que les lasers, les filtres optiques et les capteurs optiques. En exploitant les propriétés de confinement et de résonance de ces cavités, il est possible de contrôler et de manipuler la propagation de la lumière à des échelles nanométriques et d'obtenir des fonctionnalités avancées dans les dispositifs optiques.

II.4/ Propriétés des cavités à cristaux photoniques :

Les cavités à cristaux photoniques offrant un confinement intense de la lumière sont très utilisées dans le domaine de l'optique intégrée. Dans de telles applications, il est essentiel de réaliser des cavités à cristaux photoniques présentant à la fois un facteur de qualité (Q) élevé et un volume modal (V) réduit.

Un facteur de qualité Q est une mesure de l'efficacité de confinement de la lumière dans la cavité. Il est donc défini comme le rapport entre l'énergie W stockée à l'intérieur et la puissance ρ dissipée à partir de la cavité pendant une oscillation du champ à la pulsation ω₀ [3].

$$Q = \omega_0 W / \rho \tag{II.1}$$

On peut aussi mesurer le facteur de qualité tel que représenté sur la figure II.2, en calculant le rapport entre la longueur d'onde centrale de résonance λ_r et la largeur de la résonance à mi-hauteur Δλ (full width at half maximum, FWHM). Il s'exprime comme suit [4,5,6] :

$$Q = \lambda_r / \Delta\lambda \tag{II.2}$$

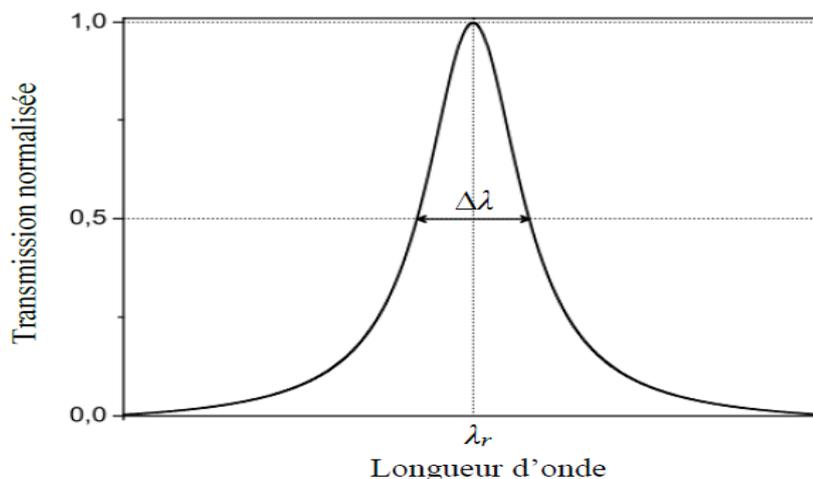


Figure II.2 : Réponse spectrale d'une cavité [7].

Le volume modal (V) est la taille effective de la cavité où la lumière est confinée. Dans une cavité à cristaux photoniques, le volume modal est considérablement plus petit que le volume de la cavité physique, ce qui permet une amplification plus importante de la lumière. Il peut être ajusté en modifiant la structure périodique des cristaux photoniques [8].

Les cavités à cristaux photoniques présentant à la fois un Q élevé et un V réduit trouvent des applications dans de nombreux domaines, notamment les lasers à cristal photonique à faible seuil, les filtres optiques sélectifs à haute résolution, les capteurs optiques ultrasensibles, les modulateurs optiques à faible puissance et les dispositifs de manipulation de la lumière à l'échelle nanométrique. Ces avancées ouvrent la voie à une nouvelle génération de dispositifs optiques intégrés performants et compacts.

II.5/ Géométrie des cavités :

Depuis une dizaine d'années, l'étude de l'impact des géométries des cavités de cristal photonique sur les modes est un sujet qui suscite un grand intérêt.

La géométrie des cavités a cristaux photoniques est une branche de la photonique qui étudie les propriétés optiques des cristaux photoniques. Elle consiste à fabriquer des structures en forme de cavités dans les cristaux photoniques afin de créer des modes de résonance optique à l'intérieur de la cavité.

La conception de microcavité à base de cristaux photoniques 2D offre de nombreux choix de configurations possibles, ce qui ouvre un grand nombre de possibilités en termes de degrés de liberté. En particulier, il est possible, pour un type de réseau choisi, d'ajuster le paramètre de maille [9], et le facteur de remplissage [9]. Les paramètres qui contrôlent la position spectrale et le facteur de qualité des modes résonants ont un impact direct sur les propriétés de la structure, en particulier sur la plage de longueurs d'onde fonctionnelle associée. Ces paramètres jouent un rôle déterminant dans la détermination de la bande associée et de ses propriétés. Les modifications en question de facteur de qualité élevé sont principalement liées à la position et la forme des trous situés aux bords de la cavité [10].

La forme, la nature et la taille [11, 12] du défaut formant la cavité, sont responsables de la répartition électromagnétique, de l'énergie et du nombre de modes admis dans la cavité.

II.6/ les types de cavités à cristaux photoniques bidimensionnels :

Ces dernières années, les cavités à cristaux photoniques 2D avec un réseau triangulaire de trous d'air ont suscité l'intérêt de nombreux chercheurs. Ces cavités peuvent être classées en deux grandes catégories en fonction de leur structure géométrique : les cavités à défauts ponctuels de géométrie simple et les cavités à défauts couplés de géométrie complexe, il existe plusieurs types de cavités ayant un grand facteur de qualité, qui seront présentés ci-dessous.

II.6.1/ cavités à défauts ponctuels :

Les défauts ponctuels dans les cristaux photoniques sont des cavités ou des perturbations dans la structure périodique des cristaux photoniques. En ajustant la taille et la position des trous environnants, il est possible d'optimiser les propriétés des cavités présentant des défauts ponctuels, notamment leur facteur de qualité.

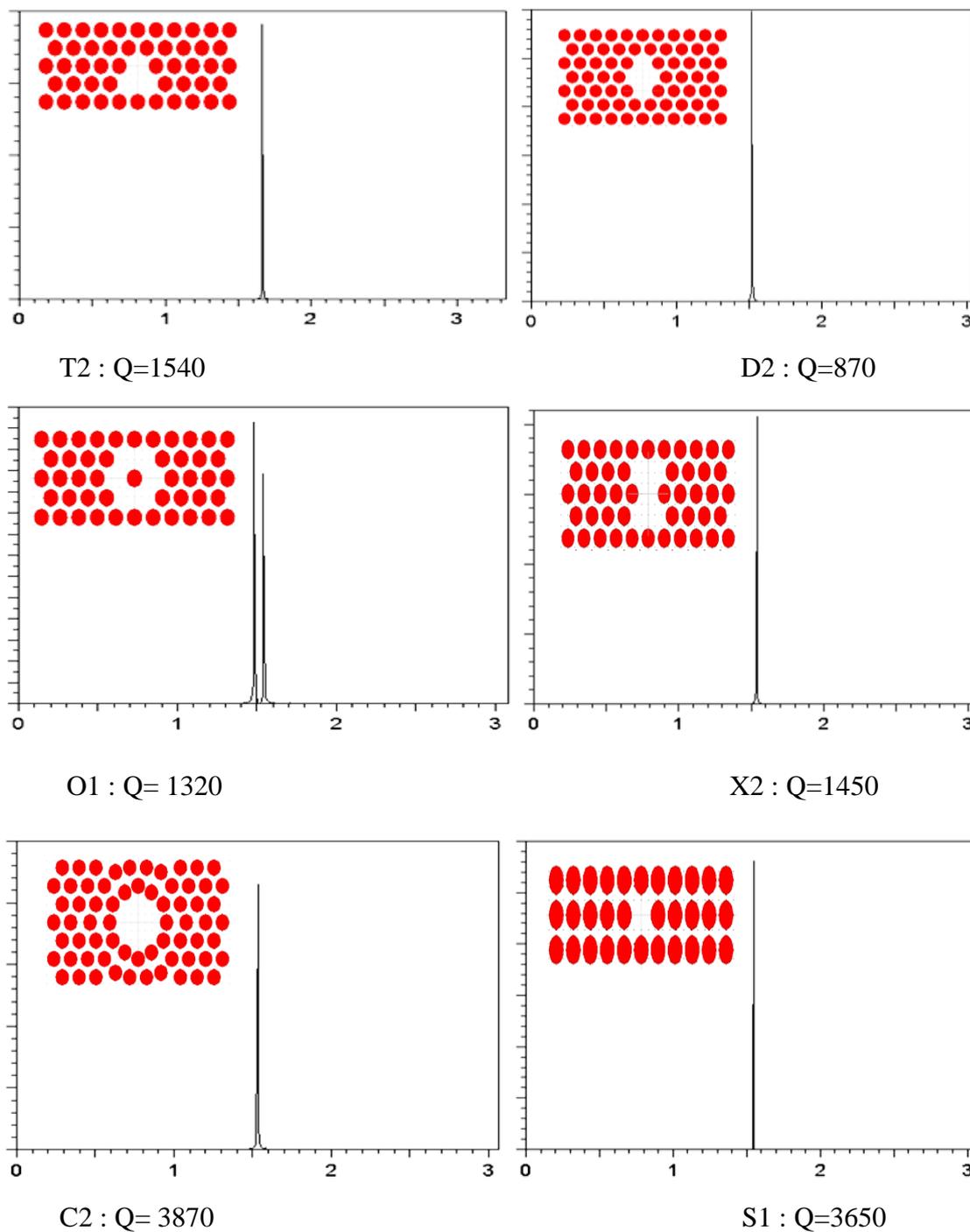


Figure II.3 : Quelques exemples de types de cavités à défaut ponctuel [8].

Ces défauts dans les cristaux photoniques peuvent avoir des effets significatifs sur leurs propriétés optiques, et les cavités à défauts ponctuels H_n et L_n sont des exemples importants.

II.6.1.1 / les cavités H_n :

Les cavités de type H (ou défauts de lacunes) sont des régions de la structure cristalline qui présentent une forte concentration de lacunes. Les cavités H_n correspondent à l'omission d'un hexagone de n trous de côté, comme il est représenté dans la Figure II.4. Les cavités connues sous le nom H_0 et H_1 sont des structures intéressantes car elles ne présentent qu'une seule fréquence de résonance correspondant à deux modes dégénérés. Les méthodes d'optimisation du facteur de qualité pour ces deux types de cavité sont similaires. En déplaçant les trous au bord de la cavité à une distance appropriée, on peut obtenir un facteur de qualité plus élevé qu'avec la structure originale. De nombreuses études ont été consacrées à son comportement [13,11,14].

Dans un cristal triangulaire, les cavités hexagonales, dont les côtés sont les rangées denses, constituent une série de cavités canoniques. Il est commode de les nommer par le nombre de périodes le long de chaque côté. Ainsi, un seul trou manquant correspondra à H_1 , sept trous manquants à H_2 , etc. [15]. Les cavités de type H_n , de forme hexagonale, n étant le nombre de rangées manquantes par côté de l'hexagone sont les plus étudiées [16].

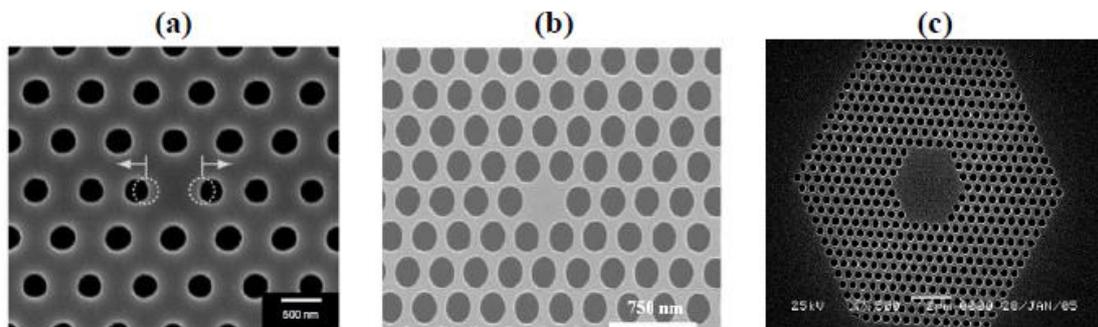


Figure II.4 : Exemples de cavités de types H_n : (a) cavité H_0 [17], (b) cavité H_1 [18], (c) cavité H_4 [19].

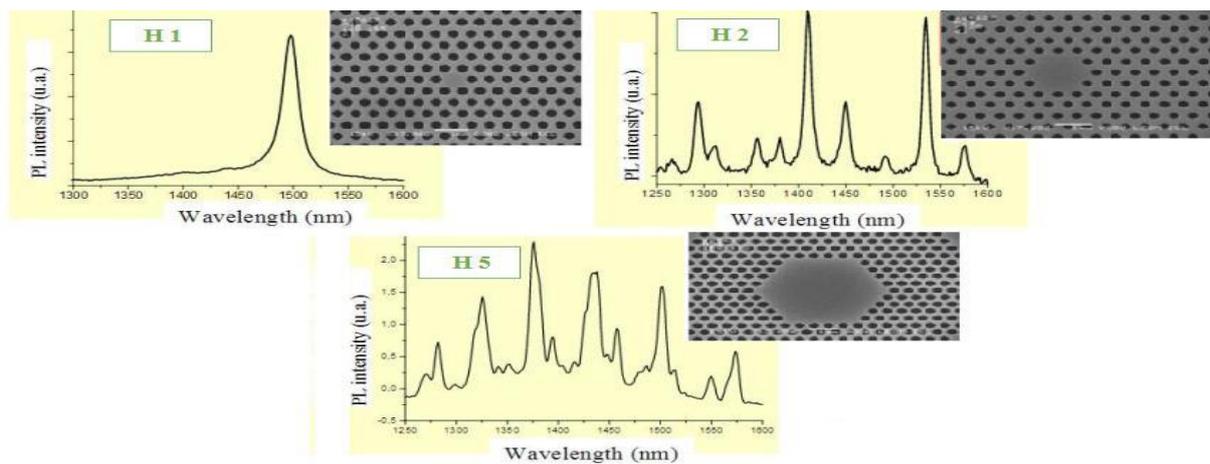


Figure II.5 : Réponses spectrales des cavités hexagonales [20].

II.6.1.2/ les cavités L_n :

Les défauts de types L (ou défauts interstitiels) sont des atomes supplémentaires qui se trouvent dans des sites cristallins interstitiels, ou il n'y a pas d'atome normalement présent.

Les défauts linéaires, également connus sous le nom de défauts étendus, ont la capacité de servir de guides d'ondes. Les cavités L_n sont des exemples de ces défauts linéaires, ou ils se composent par l'omission de n trous alignés sur une même rangée dans la direction Γk . La figure II.6 présente quelques exemples de cavité L_n à cristaux photoniques 2D [21].

Les cavités de types L_3 ont des modes dont les facteurs de qualité ne dépassent pas quelques milliers. Toutefois il est possible d'obtenir de forts facteurs de qualité avec ce type de cavités, surtout depuis les travaux d'Akabane et al qui ont démontré l'importance d'un confinement progressif de la lumière grâce à l'optimisation de la position des trous aux extrémités de la cavité [13]. Grâce à cela ils ont également exploré la piste des cavités linéiques modifiées, qui permettent de multiplier par 9 le facteur de qualité par rapport aux cavités linéiques simples (45 000 par rapport à 5000) [22]. Une structure optimisée de ces cavités pourrait atteindre théoriquement un facteur de qualité de 550 000 pour une microcavité linéique L_2 [23], et $1.8741 \cdot 10^7$ en silicium pour la cavité linéique L_3 [24]. Théoriquement, une version très optimisée de ces cavités permettrait d'atteindre des facteurs de qualité de $2.95 \cdot 10^{11}$ avec des cavités en Tellerium [25].

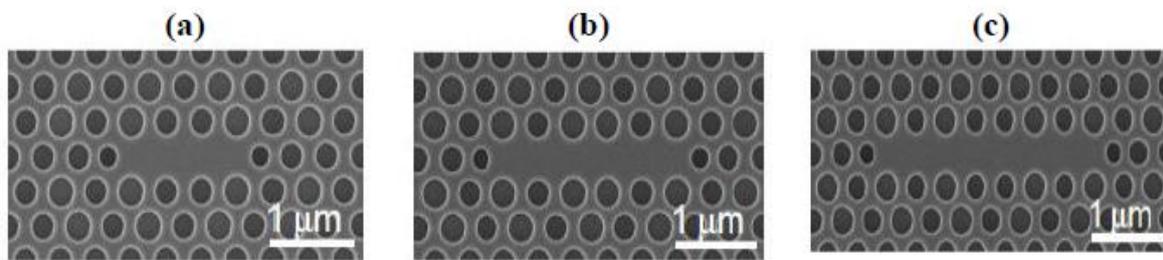


Figure II.6 : Exemples de cavités de types L_n [26] : (a) cavité L_3 , (b) cavité L_5 , (c) cavité L_7 .

II.6.2/ cavités à défauts couplés :

Les défauts couplés sont des défauts qui sont proches les uns des autres et qui peuvent interagir entre eux. Lorsque deux défauts sont suffisamment proches, ils peuvent se coupler et former un système de résonance couplés. Ce système peut engendrer des modes de résonance supplémentaires qui ne sont pas présents dans la structure sans défauts, et qui peuvent influencer la transmission de la lumière à travers la structure. Ces défauts peuvent être utilisés pour la conception des dispositifs photoniques tels que les filtres optiques.

Il existe plusieurs types de cavités à défauts couplés dans les cristaux photoniques tels que les cavités à hétéro-structures :

II.6.2.1/ les cavités à hétéro-structures :

En 2005, l'équipe de *Noda* introduit le concept de cavités à double hétéro-structure [27]. Ces cavités sont des structures semi-conductrices formées en empilant des couches de matériaux semi-conducteurs ayant des bandes interdites différentes. La structure géométrique correspondante est schématiquement montrée sur la Figure. II.7.

Le fondement de la cavité à double hétéro-structure est un guide d'onde à cristaux photoniques qui présentent une absence de rangée. Le cristal photonique $PC1$ à une structure de réseau triangulaire avec une constante de réseau a_1 . Le cristal photonique $PC2$ a une structure de réseau triangulaire déformée en un réseau rectangulaire à faces centrées avec une constante $a_2 > a_1$ dans la direction du guide d'onde. Il a la même constante que celle du cristal photonique $PC1$ dans la direction orthogonale afin de satisfaire les conditions d'adaptation de maille.

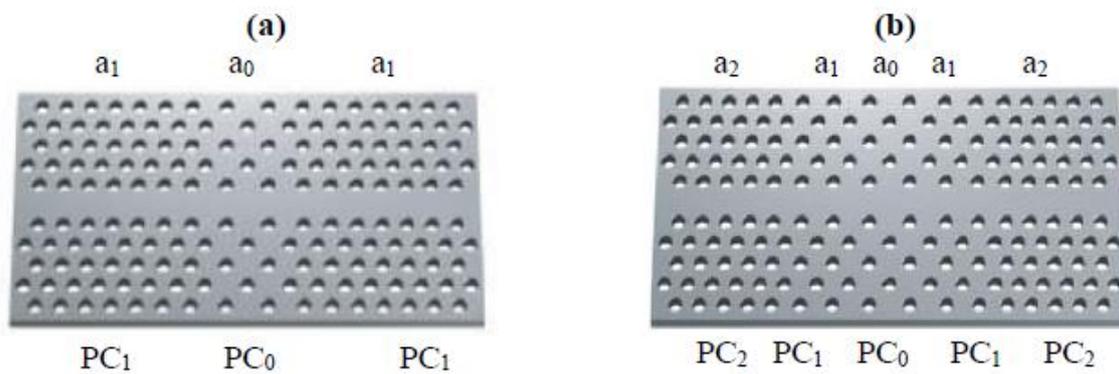


Figure II.7: (a) Cavité à double hétéro-structure réalisée en connectant les structures basiques à cristaux photoniques PC0 et PC1, (b) Cavité à multi hétéro structure réalisée en connectant les structures basiques à cristaux photoniques PC0 et PC1, PC2 [28].

Dans une étude en 2005, le facteur de qualité a atteint $6 \cdot 10^5$. Si l'on optimise la structure de ces cavités, il serait théoriquement possible d'atteindre un facteur de qualité de $2 \cdot 10^7$ [28]. Récemment, le groupe de Noda a obtenu des valeurs record de l'ordre de 10^9 pour ce type de cavités en utilisant du silicium [29].

II.7/ Influence de la modification des paramètres géométriques d'une cavité sur sa résonance :

Les cavités résonnantes sont des structures qui ont la propriété de résonner à une fréquence spécifique appelée fréquence de résonance. La fréquence de résonance dépend de plusieurs facteurs tels que la dimension et la forme de la cavité, les propriétés électromagnétiques du matériau qui compose la cavité. Lorsque les dimensions d'une cavité résonante sont modifiées, cela peut avoir un effet important sur sa longueur d'onde de résonance. Par exemple, une réduction de sa taille entraînera une augmentation de la fréquence de résonance, tandis qu'une augmentation de taille la réduira. Les changements dimensionnels affectent principalement les hautes fréquences en raison de la courte longueur d'onde. Cependant, cela peut également impacter la largeur de bande de résonance, qui détermine la plage de fréquences pour laquelle la cavité résonne. L'impact sur la largeur de bande dépend des propriétés électromagnétiques et de la forme de la cavité.

II.8/Quelques topologies des filtres à base de cavités à cristaux photoniques :

II.8.1/ Première topologie :

En 2014, l'auteur de l'article [30] a proposé un filtre optique constitué de deux guides d'onde horizontaux, basé sur un cristal photonique bidimensionnel. Pour concevoir ce filtre il a introduit une cavité résonante linéique L3 entre les guides d'onde d'entrée et de sortie. Dans son travail, il a étudié l'impact de différents paramètres sur les caractéristiques du dispositif en utilisant la méthode des différences finies dans le domaine temporel. Le filtre proposé est capable de sélectionner la longueur d'onde $\lambda = 1555$ nm, avec une efficacité de transmission d'environ 100% et un facteur de qualité $Q = 1943$. La structure de ce filtre et son spectre de transmission sont illustrés sur la figure II.8

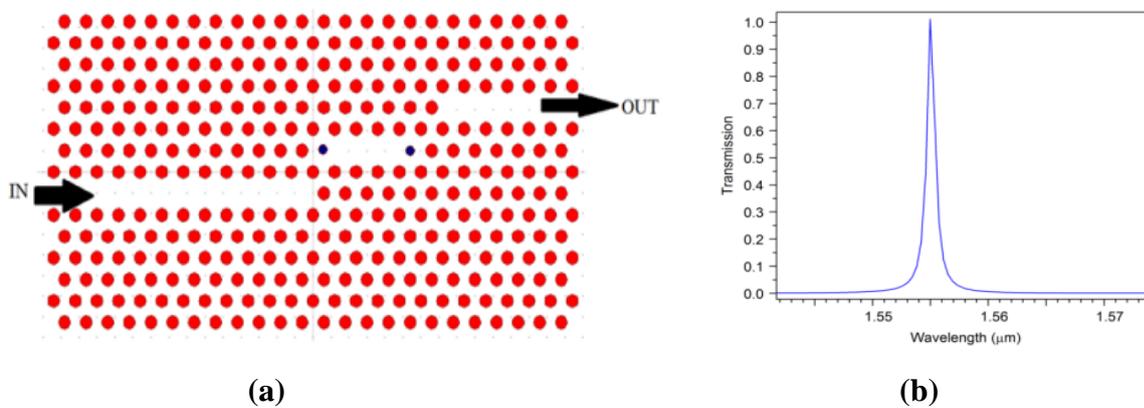


Figure II.8 : (a) structure du filtre proposé par [30], et (b) son spectre de transmission.

II.8.2/ Deuxième topologie :

En 2014, une nouvelle conception de filtre optique, composée d'un guide d'onde d'entrée horizontale et un guide d'onde de sortie verticale, est proposée par les auteurs de la référence [31]. Pour concevoir ce filtre, ils ont introduit une cavité résonante linéique L₃ entre les deux guides d'onde. La structure de ce filtre et son spectre de transmission sont montrés sur la figure II.9. Leur résultats montrent que le filtre conçu permet la sélection de la longueur d'onde $\lambda = 1558$ nm avec un taux de transmission qui peut atteindre 84%.

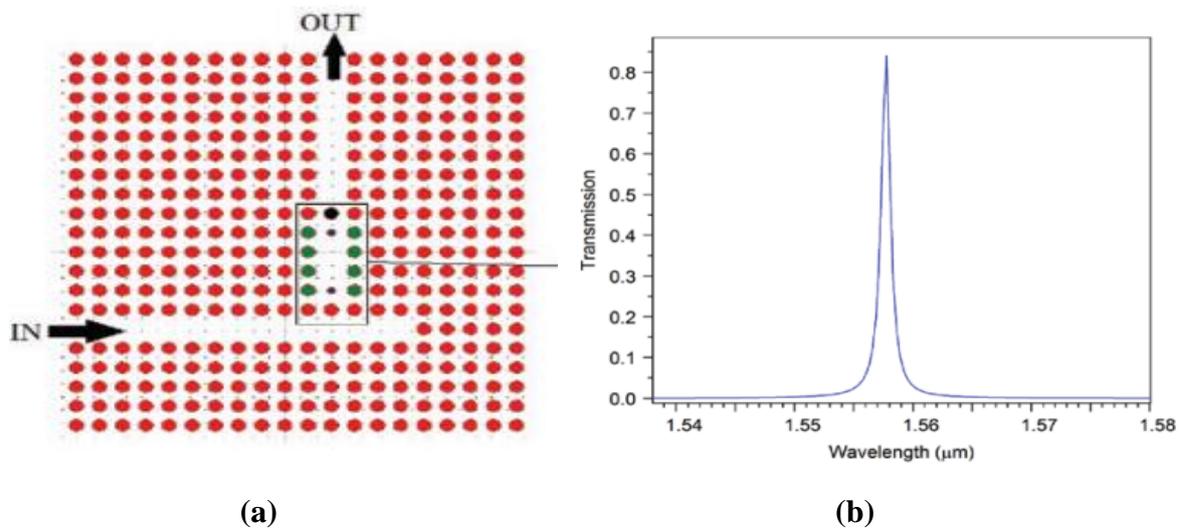


Figure II.9 : (a) structure du filtre proposé par [31], et (b) son spectre de transmission.

II.9/ Applications des filtres à base de cavités à cristaux photoniques :

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

II.9.1/ Démultiplexeurs en longueur d'onde :

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

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

De nombreux chercheurs se sont concentrés sur la conception et le développement de différents types de démultiplexeurs à cristaux photoniques. Ces travaux de recherche visent à améliorer les performances, l'efficacité et la fonctionnalité des démultiplexeurs, en offrant de nouvelles approches et des caractéristiques innovantes. Par exemple, en 2015 [32], une équipe de chercheurs a proposé un démultiplexeur compact à cinq canaux utilisant des cavités hexagonales à cristaux photoniques 2D. Ce démultiplexeur est composé d'un guide d'onde d'entrée vertical et de guides de sortie courbés. Afin d'améliorer les performances du démultiplexeur, les chercheurs ont modifié le rayon et l'indice de réfraction des tiges internes et des tiges de couplage. La structure du démultiplexeur et son spectre de transmission sont représentés sur la figure II.10. Les résultats de calcul ont révélé un facteur de qualité moyen de 6236 et une transmission de 95.98 %.

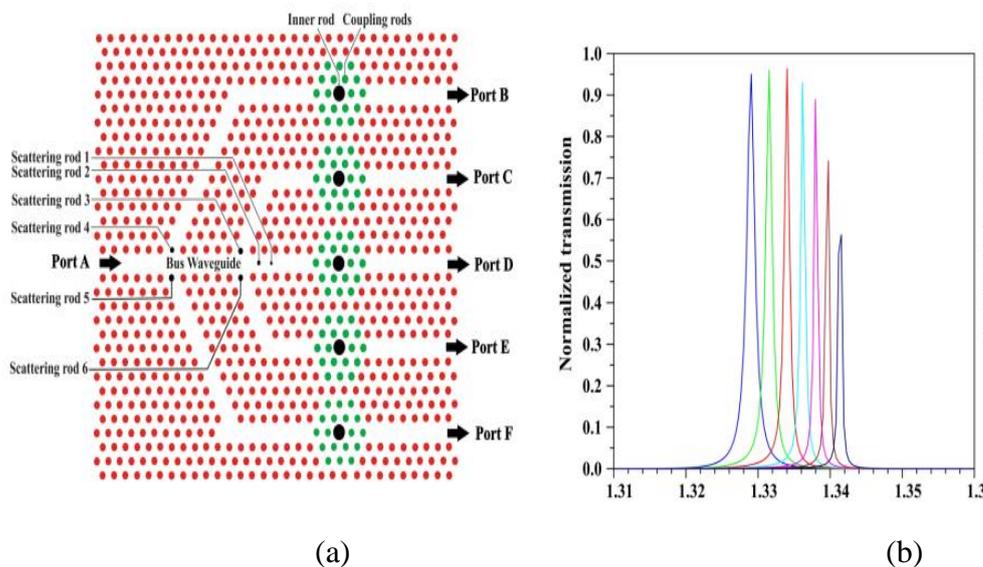


Figure II.10 : (a) structure du démultiplexeur proposé par [32], et (b) son spectre de transmission.

Une autre étude [33] vise à concevoir et simuler un nouveau type de démultiplexeur utilisant des cristaux photoniques 2D, la structure proposée se compose d'un guide d'onde d'entrée et de huit canaux de sortie, entre lesquels sont positionnés des cavités linéiques. La structure du démultiplexeur réalisé et son spectre de transmission sont montrés sur la figure II.11. Les résultats de simulation indiquent que le facteur de qualité moyen est de 3602 et l'efficacité de transmission est égale à 98 %.

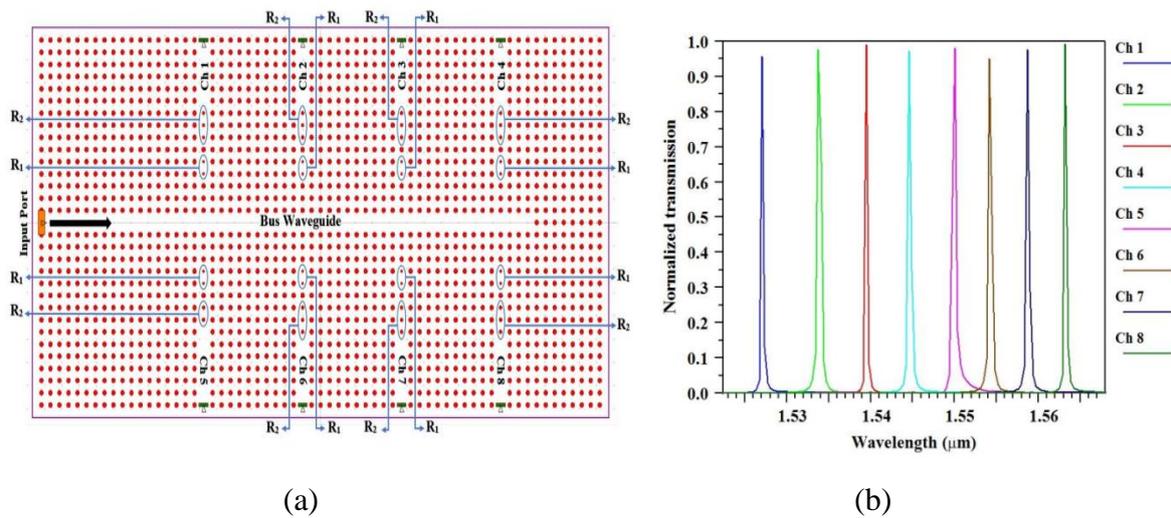


Figure II.11 : (a) Structure du démultiplexeur proposé par [33], et (b) son spectre de transmission.

Conclusion :

Au cours de ce chapitre, nous avons étudié les cavités à cristaux photoniques bidimensionnels et leurs principales caractéristiques telles que la longueur d'onde de résonance, le facteur de qualité et le volume modal, ainsi que les filtres optiques associés. Nous avons également examiné les types de défauts qui peuvent être présents dans ces cavités, à savoir les défauts ponctuels et les défauts couplés. Ensuite, nous avons discuté de l'impact des modifications de dimensions sur les cavités résonantes, et enfin, nous avons présenté les différentes topologies de filtres à base de cavités à cristaux photoniques.

Références bibliographiques

- [1] T.F.Krauss,R.M.De La Rue, « Optical characterisation of wave guide based photonic microstructure », J. applied Physics Lettres, vol. 68,pp.1613-1615,1996.
- [2] D.Labilloy,H.Bénisty, C.Weisbursh, T.F.Krauss, V.Bardinal,U.osterle, « Démonstration of cavity mode between two-dimensional-crystal mirrors » , J. Electronics Lettres , Vol.33,pp.1978-1980-1997.
- [3] J. Q. Yao, et Y. Z. Yu., « Optoelectronic Technology », Higher Education Press, 2006.
- [4] A. Ramier, « Intégration de guides d'onde et micro résonateurs à mode de galerie par assemblage à puce retournée », Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master en sciences appliquées, Université de Montréal, Canada, 2014.
- [5] L. Ghisa, « Couplage de micro résonateurs. Applications aux fonctions optiques de traitement du signal ». Thèse de Doctorat, Université de RennesI, Rennes, 2008
- [6] P.H. Merrer, « Élaboration de sources hyperfréquences à haute pureté spectrale à base de résonateurs optiques ». Thèse de Doctorat, Université Toulouse III, Toulouse, 2009.
- [7] R.Bendjelloul, « Etude et caractérisation de circuits photoniques à base de cristaux photoniques de micro piliers : Application aux filtres à base de résonateurs », Thèse de Doctorat, Université de Constantine, 2017.
- [8] R.Mokhtari, « Contribution à L'étude et La Conception Des Cavités à Cristaux Magnéto Photoniques ». These de Doctorat, Université de Mohamed Boudiaf de M'sila ,2018
- [9] Z. Zhang, T. Yoshie, X. Zhu, J. Xu, A. Scherer. « Visible two-dimensional photonic crystal slab laser, J. Applied Physics Letters, vol. 89, pp. 071102–071105, 2006.
- [10] Y. Akahane, T. Asano, B. S. Song, S. Noda, « High-Q photonic nanocavity in a two-dimensional photonic crystal », J. Nature, vol.425, pp.944–947, 2003.
- [11] D. Wang, Z. Yu, Y. Liu, X. Guo, C. Shu, S. Zhou, J. Zhang, « Ultrasmall modal volume and high Q factor optimization of a photonic crystal slab cavity », J. Optic. Vol. 15, pp.125102 125109, 2013.

- [12] C. Sauvan, G. Lecamp, P. Lalanne, J. P. Hugonin, « Modal-reflectivity enhancement by geometry tuning in photonic crystal microcavities », *J. Optics Express*, vol. 13, pp. 245–255, 2005.
- [13] Y. Akahane, T. Asano, B. S. Song, S. Noda, « Development of High-Q Photonic Nanocavity Using Two-Dimensional Photonic Crystal Slabs », *J. Information And Communication Systems*, vol. 59, pp. 21-26, 2005.
- [14] H.Takagi, Y.Ota, N.Kumagai, S.Ishida, S. Iwamoto, Y.Arakawa, « High Q H1 photonic crystal nanocavities with efficient vertical emission », *J.Optics Express*, vol.20, pp.28292-28300,2012.
- [15]J.R.wendit,G.A.vawter,P.L.Gourley, T.M.Brennan,B.E.Hammons, « Nanofabrication of photonic Lattice structures in GaAs/AlGaAs », *J. Vacuum Science & Technology*, vol. 11,pp. 2637-2640,1993.
- [16] D.Xiao ,K.W.kim, G.Lazzy, J.M.Zavada , « turable wave guiding in electrically programmable V 02-based photonic crystals », *J.Applied physics* , vol.99,pp. 113106-113110, 2006.
- [17]K.Nozaki,T.Ide,J.Hashimoto,T.Baba, « photonic crystal point-shift nanolaser with ultimate small modal volume », *J.Electronics lettres*, vol.41,pp.843-845,2005.
- [18] A.Tandaechanurat, S.Iwamoto, M.Nomura, N.kumagai, Y.Arakawa, « Increase of Q-factor in photonic crystal H1 defect nanocavités After closing of photonic bandgap with optimal slab thikness », *J.optics Express*, vol.16,pp.448-455,2008.
- [19] C.J.M Smith, H.Benisty, D.Labilloy, U. Ostrelo,R.Houdré, T.F. Krauss, R.M De La Rue, C.weibsursh « Near-infrared microcavités confined by two-dimensional- photonic-crystal », *J. Electronics Letters* , vol.35,pp. 228-229, 1999.
- [20]M.Fillaly , « Etude et Conception d’un démultiplexeur 8 canaux à cristaux photoniques bidimensionnels », mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf M’sila,2018.
- [21] G.tayeb, D.Maystre, « Rigoureuse theoritical study of finite size two dimensionnal photonic crystals doped by microcavités », *J.optical society of America A*, vol.14,pp. 3323-3332,1997.
- [22] Shruti, R.K. Sinha, R. Bhattacharyya, « Photonic crystal slab waveguide based infiltrated liquid sensors : design and analysis », *J. Nanophotonics*, vol. 5, pp. 53505–53515, 2011.

- [23] A. Benmerkhi, M. Bouchemat, « Design of high-Q cavities in 2D photonic crystals air holes filled with polymer », *J. Optic*, vol. 125, pp. 6223–6226, 2014.
- [24] A. Benmerkhi, M. Bouchemat, T. Bouchemat, « Ultrahigh-Q of the L3 photonic crystal microcavity », *J. Optic*, vol. 124, pp. 5719–5722, 2013.
- [25] O. Bouleghimat¹, A. Hocini, « Ultrahigh-Q modes in anisotropic 2D photonic crystal », *J. Physica Scripta*, vol. 89, pp. 105502–105507, 2014.
- [26] S. L. Portalupi, M. Galli, C. Reardon, T. F. Krauss, L. O’Faolain, L. C. Andreani, D. Gerace, « Planar photonic crystal cavities with far-field optimization for high coupling efficiency and quality factor », *J. Optics Express*, vol. 18, pp. 16064–16073, 2010
- [27] B. S. Song, S. Noda, T. Asano, Y. Akabane. « Ultra-High- $\{Q\}$ photonic double heterostructure nanocavity ». *J. Nature Materials*, vol. 4, pp. 207–210, 2005.
- [28] H. Sekoguchi, Y. Takahashi, T. Asano, S. Noda. « Photonic crystal nanocavity with a q-factor of 9 million », *J. Optics Express*, vol. 22, pp. 916–924, 2014.
- [29] M. Arjmand, R. Talebzadeh. « Optical filter based on photonic crystal resonant cavity », No. 1-2, Vol. 9, pp. 32 – 35, 2015
- [30] M. Zavary, « design of photonic crystal-Based Demultiplexeur with High-Quality Factor For DWDM Applications, *J. Optics Communications*, 2017
- [31] A. Vaisi, M. Soroosh and A. Mahmoudi, « Low Loss and High-Quality Factor Optical Filter Using Photonic Crystal-Based Resonant Cavity, *J. Optics Communications*, vol. 39, pp. 285–288, 2018
- [32] M. Mohammadi¹, M. Seifouri¹, S. Olyaei², M. Karamirad³, « Optimization and realization all-optical compact five-channel demultiplexer using 2D photonic crystal based hexagonal cavities, *J. computational electronic*, vol. 20, pp. 984–992, 2021
- [33] M. Azadiv, M. Mohammadi, S. Olyaei and M. seifouri. « Improved low crosstalk, high transmission and quality factor eight channel demultiplexer based on photonic crystal, 2022

Chapitre III
Résultats et interprétations

III.1/ Introduction

Lors de la réalisation d'une étude ou d'un projet impliquant des systèmes optiques, les simulations jouent un rôle crucial dans la compréhension des résultats et la prise de décision. Les simulations permettant de prédire le comportement du système avant sa construction physique, d'optimiser sa conception et de détecter les éventuels problèmes qui pourraient survenir.

L'objectif de ce chapitre est d'optimiser la structure des cristaux photoniques pour améliorer la performance des filtres en termes de sélectivité spectrale et d'efficacité de transmission. Les résultats de cette simulation pourraient aider à améliorer la technologie des filtres optiques à cavités résonnantes et à concevoir des dispositifs optiques plus performants.

III.2/ Présentation du logiciel RSOF T :

RSOF T est un logiciel de simulation optique puissant et polyvalent conçu spécialement pour aider les ingénieurs et les chercheurs à concevoir et simuler des systèmes optiques complexes avec une grande précision et efficacité. Ce logiciel utilise une variété de technique de simulation avancées, telles que la méthode des éléments finis et la méthode de propagation des modes, pour modéliser de manière réaliste le comportement de la lumière à travers les systèmes optiques. Les utilisateurs peuvent ainsi visualiser et analyser les performances de leurs dispositifs optiques, tels que les filtres et les fibres optiques, afin de les améliorer et d'optimiser leur fonctionnement.

L'interface utilisateur RSOF T CAD est montrée sur la figure III.1. Il est composé de plusieurs outils de conception et de simulation optique qui facilitent l'utilisation du logiciel. En haut, se trouve une barre de menu qui permet d'accéder à toutes les fonctionnalités de RSOF T CAD. A gauche, se trouve une barre d'outils qui porte plusieurs icônes pour les fonctions les plus courantes. En bas se trouve une barre d'état qui donne des informations sur l'état de la simulation en cours.

Dans le domaine de l'optique, Bandsolve et Fullwave sont deux simulateurs couramment utilisés. Ces simulateurs font partie des outils proposés par RSOF T, qui offre une gamme d'outils et de fonctionnalités pour la modélisation et la simulation optique.

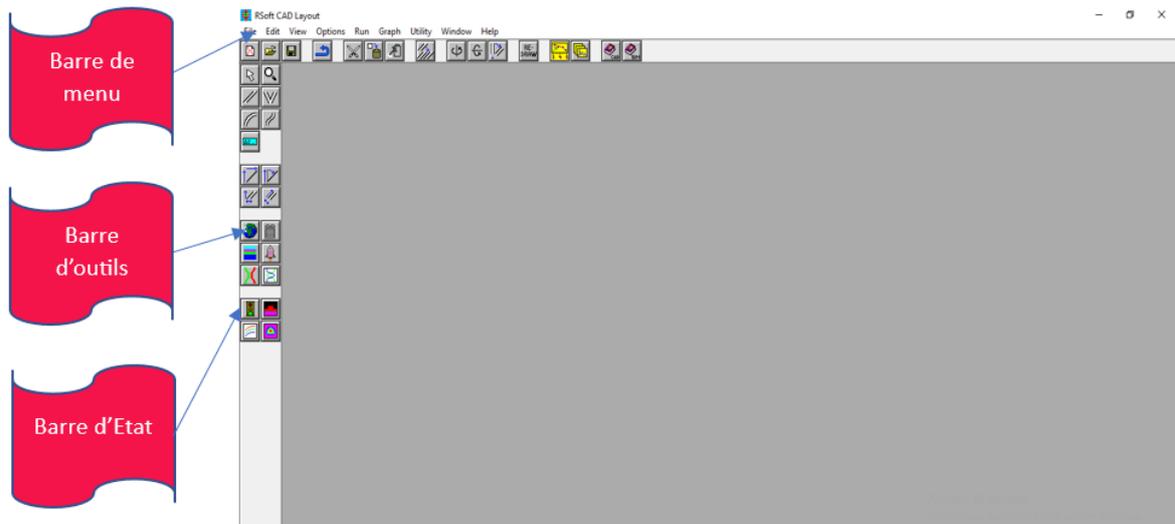


Figure III.1 : Fenêtre du logiciel RsoftCad.

III.2.1/ Simulateur Bandsolve :

Bandsolve est un simulateur puissant largement utilisé dans l'analyse des bandes interdites et des diagrammes de dispersion dans les cristaux photoniques. Il est basé sur la méthode des ondes planes en utilisant une approche numérique avancée des équations de Maxwell dans le domaine fréquentiel. Ce simulateur fournit une résolution précise des modes de propagation et des relations de dispersion des dispositifs optiques. La fenêtre principale de Bandsolve est présentée sur la figure III.2.

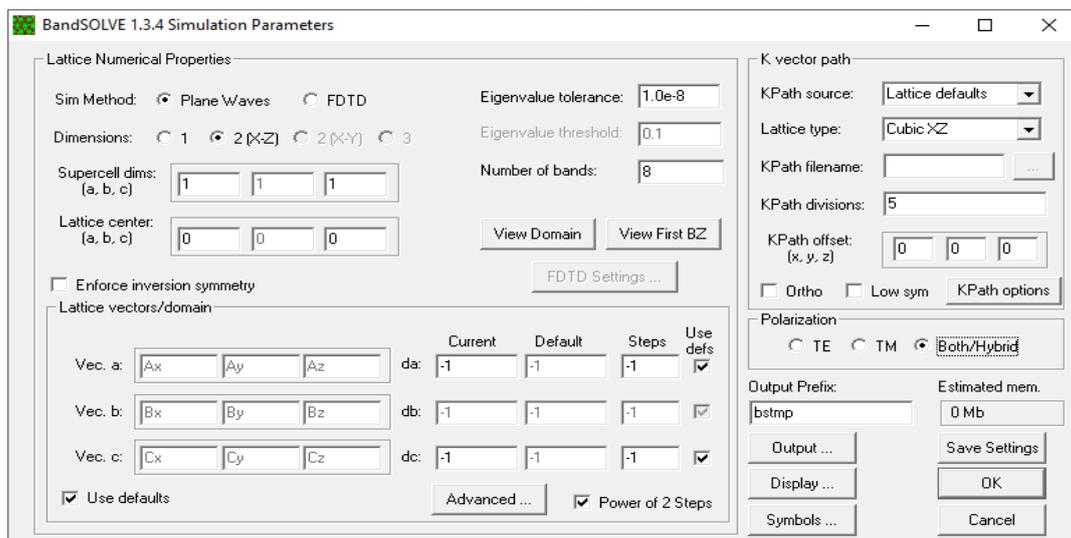


Figure III.2 : Fenêtre du simulateur BANDSOLVE.

III.2.2/ Simulateur Fullwave :

Fullwave est un simulateur électromagnétique avancé qui offre une analyse détaillée des interactions entre la lumière et la matière dans les composants photoniques. Il se base sur la méthode des différences finies dans le domaine temporel, également connue sous le nom de FDTD (Finite-Difference-Time-Domain). Grâce à cette approche, il est possible de modéliser avec précision les phénomènes électromagnétiques en suivant leur évolution dans le temps. Fullwave permet aussi de simuler et d'optimiser divers dispositifs tels que les filtres optiques, les guides d'onde, La fenêtre principale de Fullwave est montrée sur la figure III.3.

Ces deux simulateurs sont intégrés dans RSOFT CAD pour offrir des fonctionnalités complètes de modélisation, de conception et de caractérisation des composants photoniques.

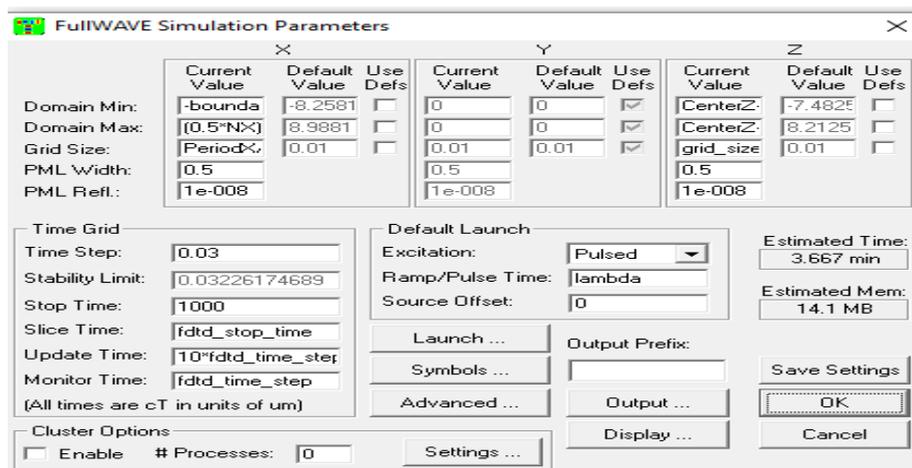


Figure III.3 : Fenêtre du simulateur fullwave.

III.3/ Structure d'étude :

La structure initiale utilisée pour la conception du filtre proposé est représentée sur la figure III.4, Elle contient des tiges en Silicium immergées dans l'air, réparties selon un réseau carré. Le nombre de tiges dans la direction X et Z est 20. L'indice de réfraction de ses tiges est $n_{\text{Si}}=3.46$ et leurs rayons est $r = 0.219 \mu\text{m}$. Le pas du réseau est $a = 0.73 \mu\text{m}$. Avant de concevoir ce filtre nous devons tracer le diagramme de bandes du cristal photonique et déterminer sa bande interdite photonique (BIP). Pour cet effet, nous avons utilisé le simulateur Bandsolve basé sur la méthode des ondes planes (PWE). Le diagramme de bandes obtenu est montré sur la figure III.5.

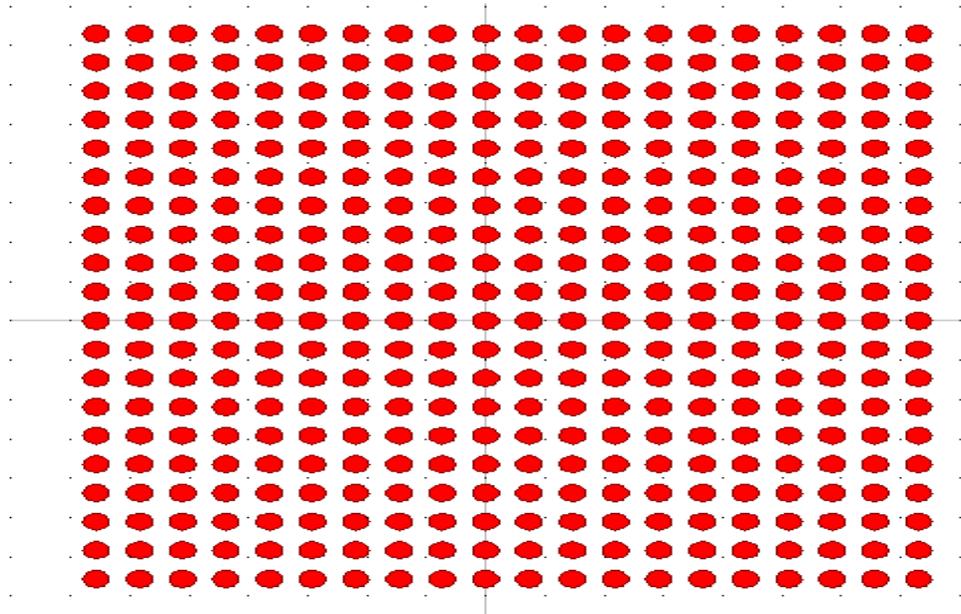


Figure III.4 :Représentation schématique de la structure étudiée.

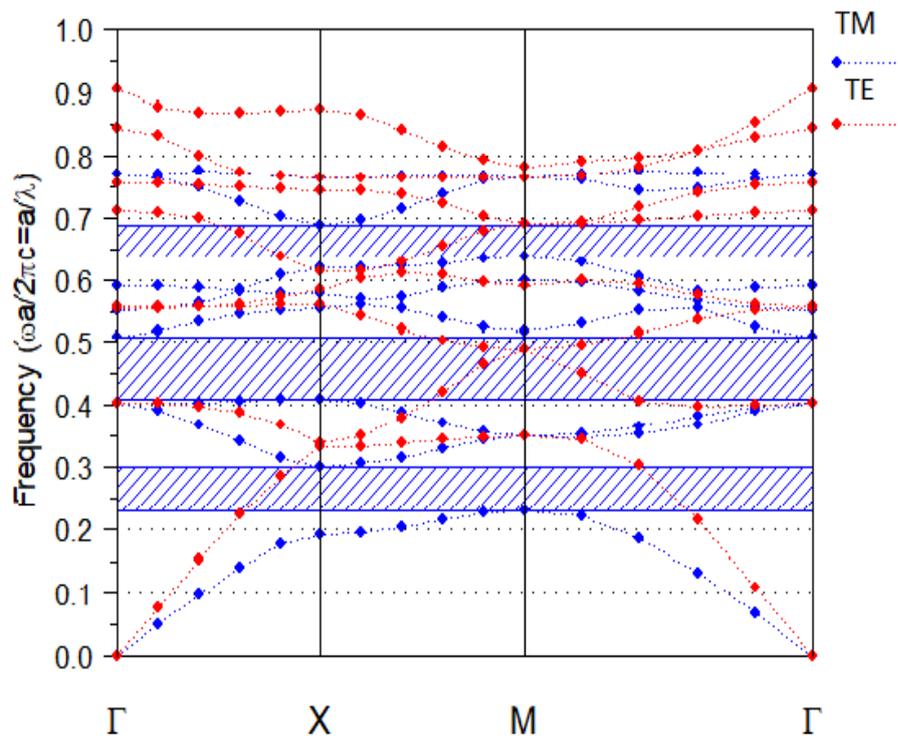


Figure III.5 : Diagramme de bande de la structure d'étude.

La structure étudiée présente trois bandes interdites photoniques en polarisation TM. Parmi celles-ci, une bande se distingue par sa largeur importante qui s'ouvre pour des fréquences normalisées entre $0.405 < a/\lambda < 0.504$ correspondant aux longueurs d'onde

$1.448\mu\text{m} < \lambda < 1.802\mu\text{m}$. Tandis que les deux autres bandes sont plus étroites et se situent à des fréquences normalisées qui n'ont pas d'importance pour notre travail.

Notre attention s'est portée sur la bande interdite TM la plus large, qui offre la capacité d'empêcher la propagation des ondes électromagnétiques dans la gamme des longueurs d'onde des télécommunications.

III.4/ Filtre à cristaux photoniques :

III.4.1/ Structure de base :

Dans le cadre de notre étude, nous avons choisi de concevoir un filtre optique en utilisant une configuration de cavités résonantes à base de cristaux photoniques [1]. Le filtre conçu contient deux guides d'ondes, entre lesquels est positionnée une cavité linéique. Pour la création des guides d'onde, nous avons supprimé 15 tiges dans la direction horizontale pour le guide d'entrée, et 10 tiges dans la direction verticale pour le guide de sortie. La cavité, quant à elle, est formée par la diminution du rayon de deux tiges de la structure ($r_t = 0.0306\mu\text{m}$). La distance entre les deux guides et la cavité est d'une seule tige ($D_c = 1$), tandis que la longueur du réflecteur est choisie égale à $L = 5$ tiges.

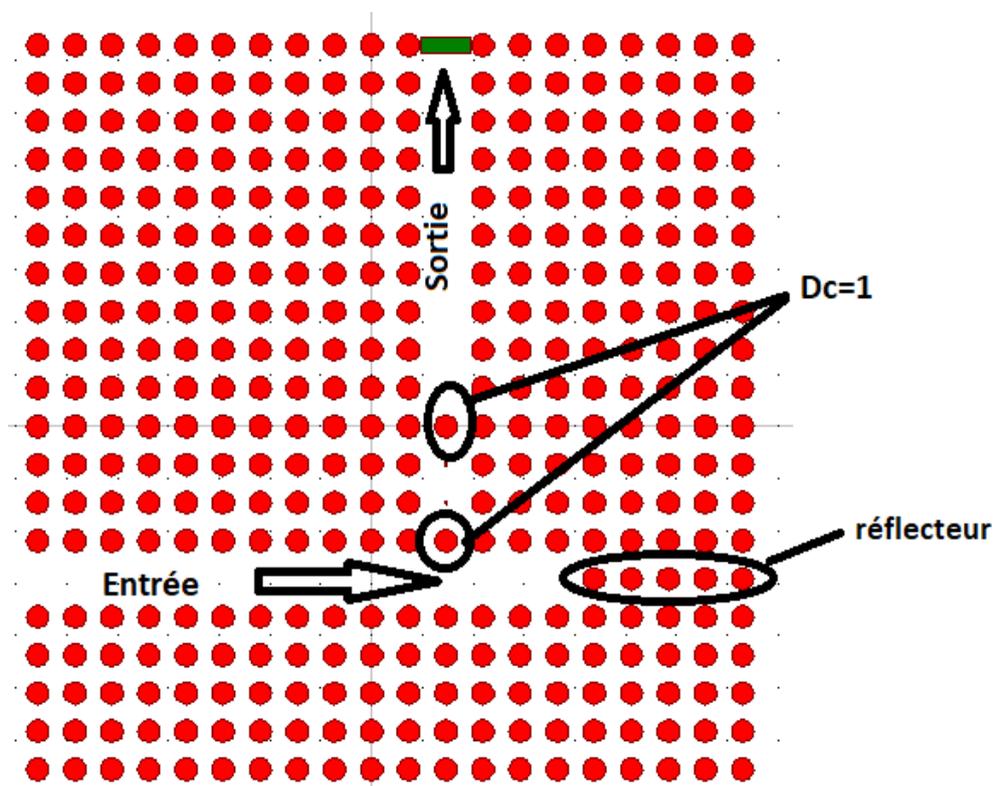


Figure III.6 : Représentation schématique du filtre proposé.

Nous avons simulé la structure et calculé son spectre avec logiciel fullwave basé sur la méthode FDTD. Le résultat obtenu est représenté sur la figure III.7. Sur cette figure nous remarquons un pic résonant à la longueur d'onde $\lambda = 1.5493 \mu\text{m}$ avec un taux de transmission de 81.69% et un facteur de qualité égale à 119.17. Le résultat obtenu n'est pas satisfaisant car il présente une transmission moyenne et un facteur de qualité très faible.

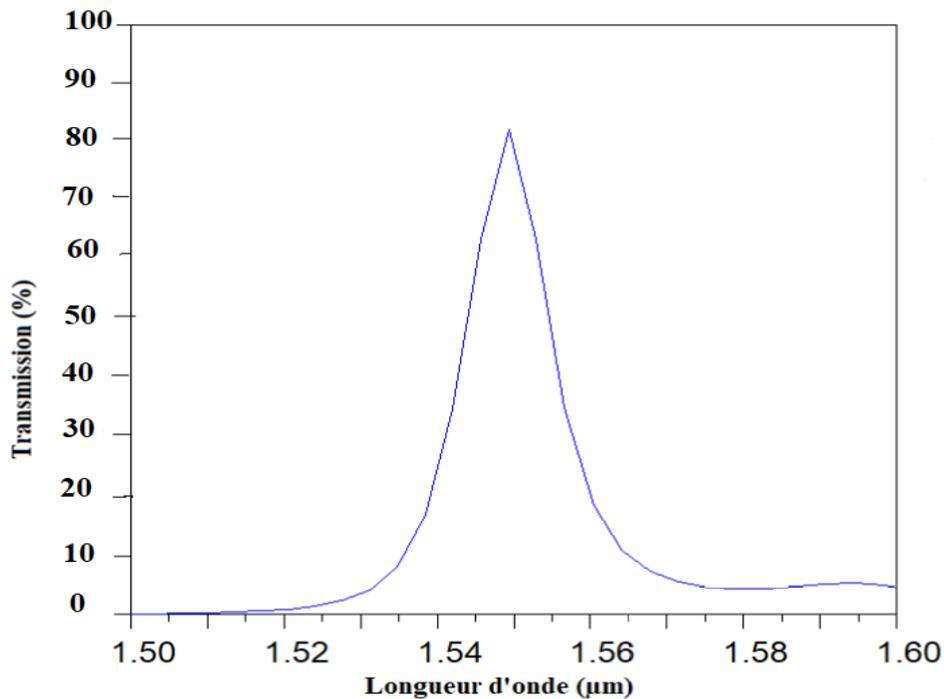


Figure III.7 : Spectre de transmission du filtre proposé.

III.4.2/ Structure modifiée :

Afin d'améliorer la transmission et le facteur de qualité de notre filtre nous avons modifié quelques paramètres de la structure :

III.4.2.1/ Modification de la longueur du réflecteur :

Pour étudier l'influence de la longueur du réflecteur sur les caractéristiques du filtre nous avons simulé la structure pour différentes longueurs du réflecteur. Le résultat est résumé dans le tableau III.1 :

Longueur du réflecteur (L)	Transmission (%)	Facteur de qualité Q
1	56.56	119.18
2	43.94	134.72
3	12.12	123.49
4	65.93	114.76
5	81.69	119.17
6	60.2	111.35
7	39.47	119.17
8	99.2	93.89

Tableau III.1 : Caractéristiques du filtre pour différentes longueurs du réflecteur.

D’après ce tableau, nous remarquons que la variation de la longueur du réflecteur influe sur les caractéristiques du filtre. Dans notre cas, on retient la longueur $L=8$ comme résultat optimal, pour laquelle on note une transmission de 99.2% et un facteur de qualité de 93.89. La structure du filtre avec la longueur optimale et son spectre de transmission sont reportés sur les figures III.8 et III.9.

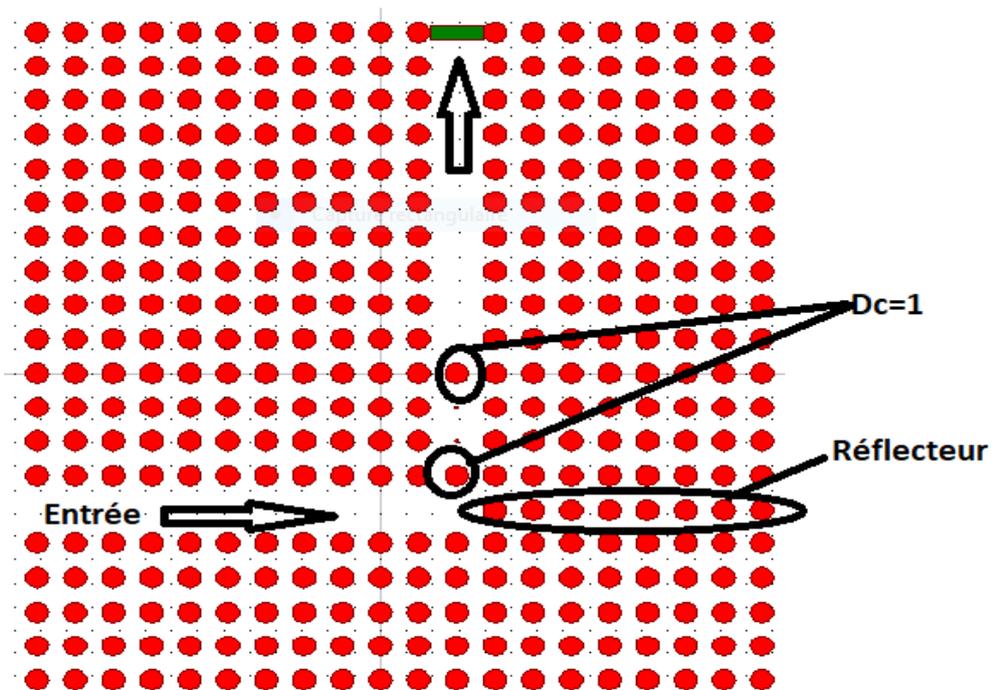


Figure III.8 : Représentation schématique du filtre pour $L=8$.

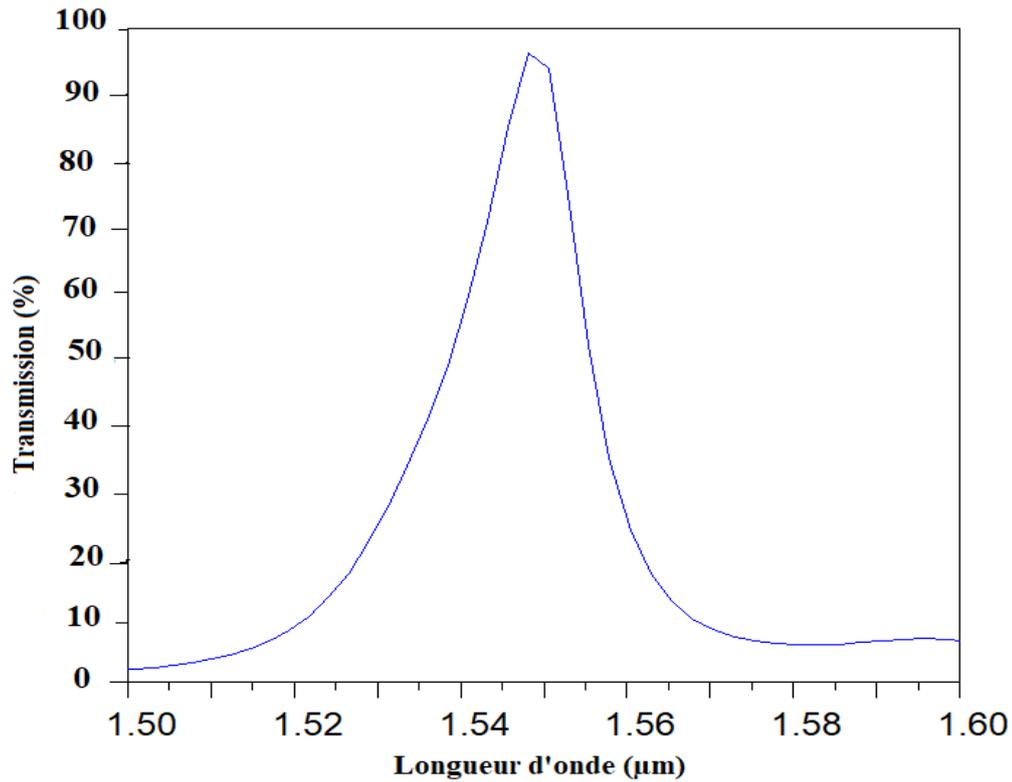


Figure III.9 :Spectre de transmission du filtre pour L=8

III.4.2.2/ Modification de la distance de couplage :

La distance de couplage est un paramètre important dans les filtres à cristaux photoniques et peut être modifiée pour contrôler ces performances. Elle fait référence à la séparation entre la cavité et les guides d'onde. Cette distance joue un rôle crucial dans le couplage de la lumière entre les différentes régions du dispositif.

III.4.2.2.1/ Pour $D_c=2$:

Pour étudier l'impact de la distance de couplage sur les caractéristiques du filtre nous avons pensé à ajouter une autre tige de couplage à la structure ($D_c=2$). Le résultat est montré sur la figure III.10 :

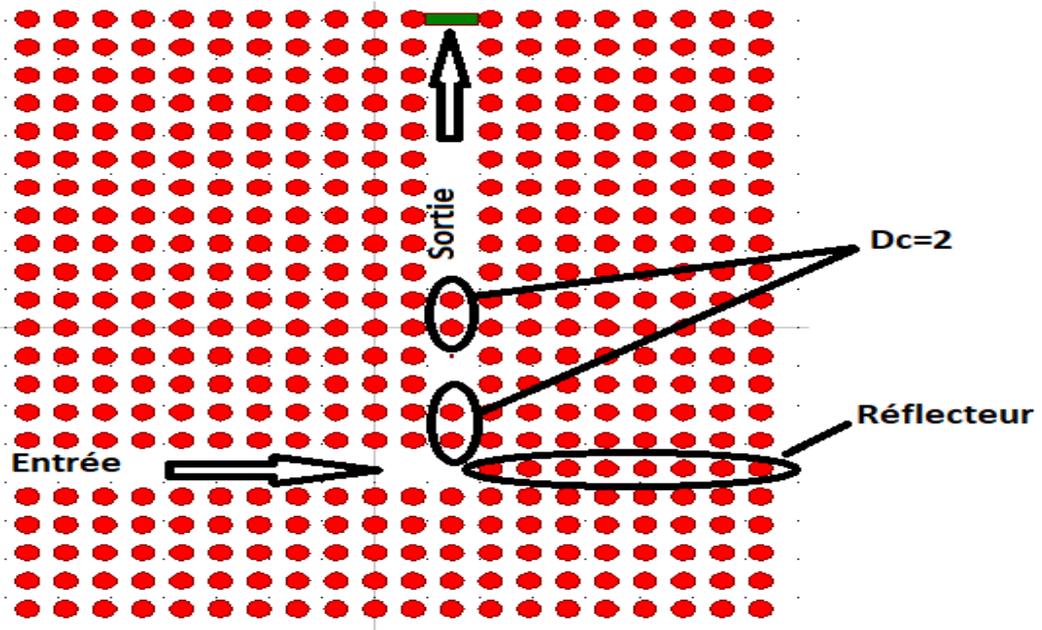


Figure III.10 : Représentation schématique du filtre pour $D_c=2$

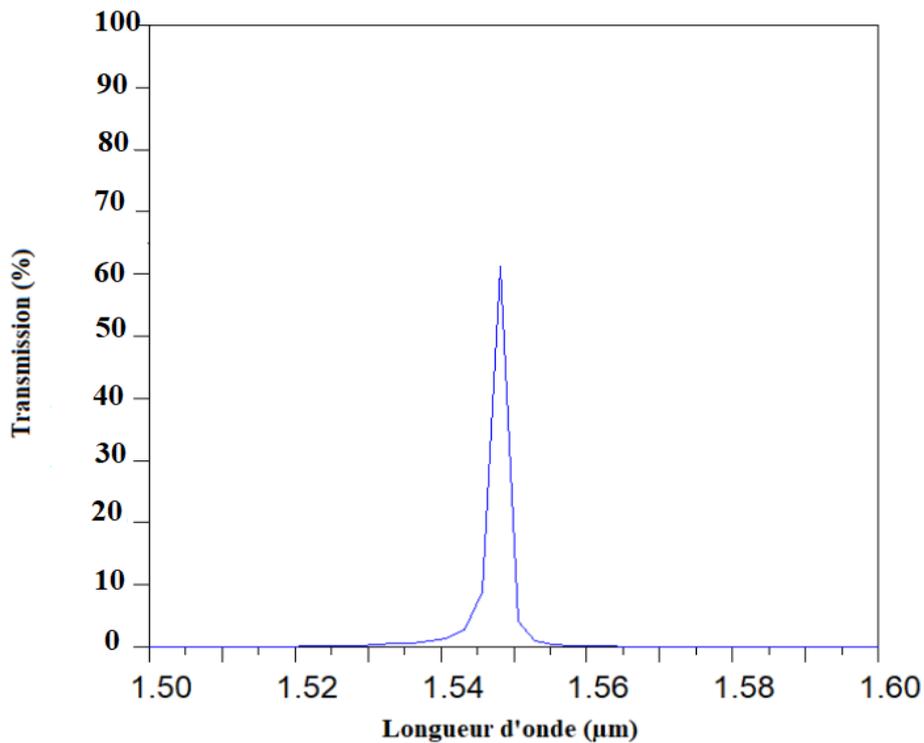


Figure III.11 : Spectre de transmission du filtre pour $D_c=2$.

Les résultats obtenus montrent une amélioration significative du facteur de qualité du filtre ($Q=516.31$), ce qui témoigne d'une meilleure sélectivité de notre dispositif. Cependant, il est important de noter que le taux de transmission relevé est relativement faible (62.39%).

III.4.2.2 / Pour $D_c=3$:

Dans cette partie, nous proposons de modifier la distance de couplage en rajoutant une autre tige ($D_c=3$). La structure schématique du filtre et les résultats de simulation sont montrés sur les figures III.12 et III.13, respectivement.

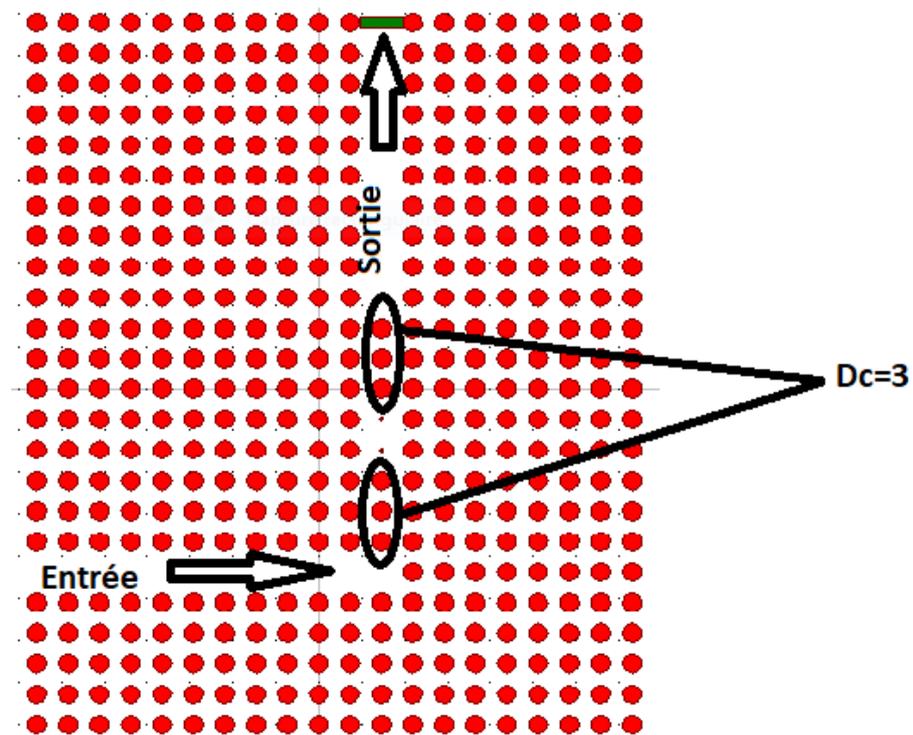


Figure III.12 : Représentation schématique du filtre pour $D_c=3$.

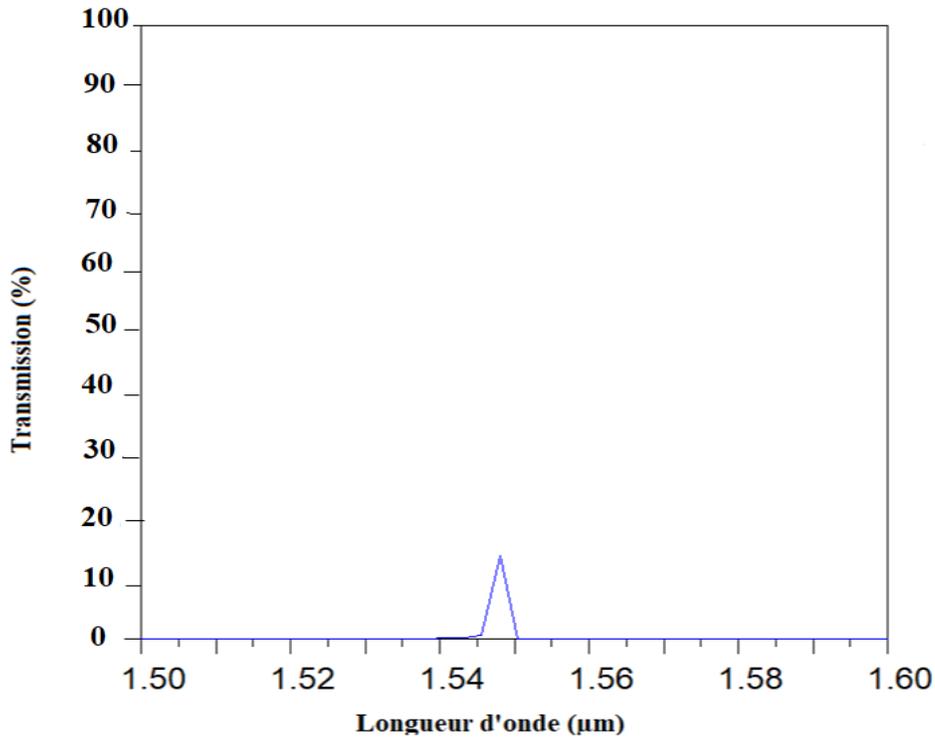


Figure III.13 : Spectre de transmission du filtre pour $D_c=3$.

En analysant les résultats obtenus, il est clair que la configuration avec une distance de couplage de $D_c=3$ ne répond pas à nos exigences en termes de transmission. Il est donc judicieux de ne pas prendre cette configuration en considération pour notre application.

Les résultats obtenus précédemment sont résumés dans le tableau III.2. En se basant sur ces résultats, nous avons choisi comme résultat optimal la distance $D_c=2$, en raison de son facteur de qualité élevé. La transmission quant à elle est relativement faible, et peut être améliorée en ajustant le rayon des tiges situés au bord de la cavité.

Distance de couplage (D_c)	Transmission (%)	Facteur de qualité
1	99.2	93.89
2	62.39	511.2
3	14	638.01

Tableau III.2: Caractéristiques du filtre pour $D_c=1$, $D_c=2$ et $D_c=3$.

III.4.3/ Modification du rayon des tiges de couplage pour $D_c=2$:

En modifiant le rayon des tiges de couplage, situées aux bords de la cavité, il est possible d'optimiser le couplage entre la cavité et les guides d'ondes, ce qui peut entraîner une amélioration de la transmission. Les résultats obtenus sont montrés sur le tableau III.3.

Rayon des tiges de couplage R_c (μm)	Longueur d'onde λ (μm)	Transmission (%)	Facteur de qualité (Q)
0.185	1.5170	85.9	223.09
0.192	1.5264	77.01	318.01
0.194	1.5288	85.96	424.68
0.198	1.5336	92.22	511.2
0.204	1.5384	84.22	84.22
0.218	1.5493	36.45	336.8

Tableau III.3: Caractéristiques du filtre pour différentes valeurs du rayon des tiges de couplage.

D'après les données présentées dans le tableau III.3, nous remarquons que la modification du rayon des tiges de couplage a un impact sur les propriétés du filtre. Dans notre cas, la valeur optimale retenue est $R_c = 0.198 \mu\text{m}$. Cela nous a permis d'obtenir une transmission de 92.22% et un facteur de qualité $Q=511.2$.

Nous venons donc de voir la possibilité de concevoir un filtre à cristaux photonique constitué de deux guides d'onde entre lesquels est positionnée une cavité linéique. Dans les conditions optimales ($L = 8$ tiges, $D_c = 2$, $R_c = 0.198 \mu\text{m}$) (figure III.14), 92.22 % de la lumière du guide d'onde d'entrée est efficacement transférée au guide d'onde de sortie au mode résonant situé à $\lambda = 1.5336 \mu\text{m}$, avec un bon facteur Q égal à 511.2 (figure III.15).

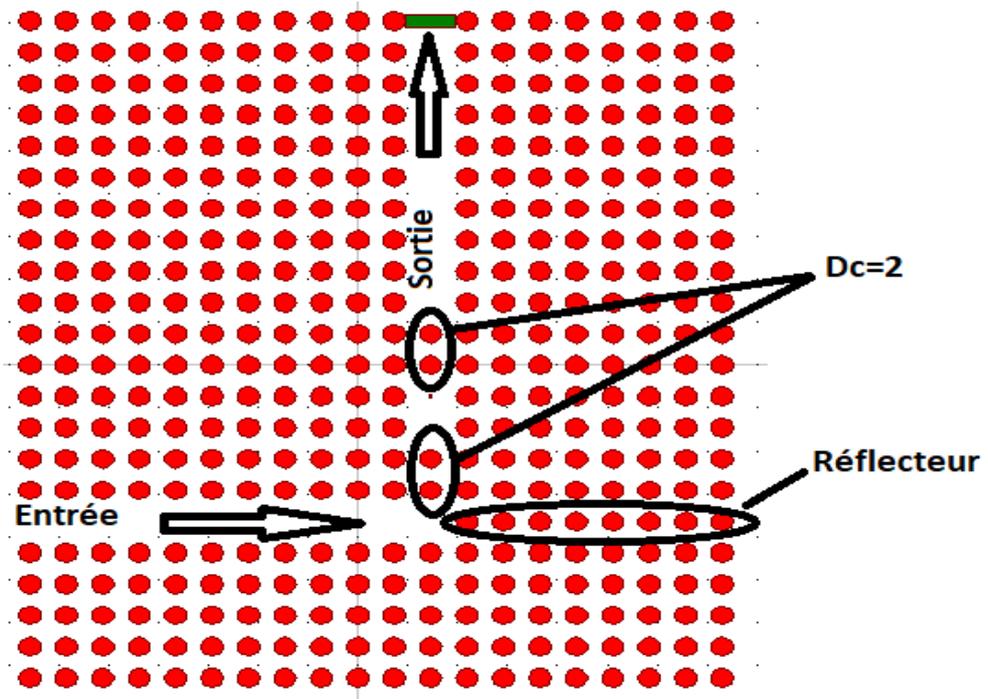


Figure III.14 : Représentation schématique de la structure finale du filtre.

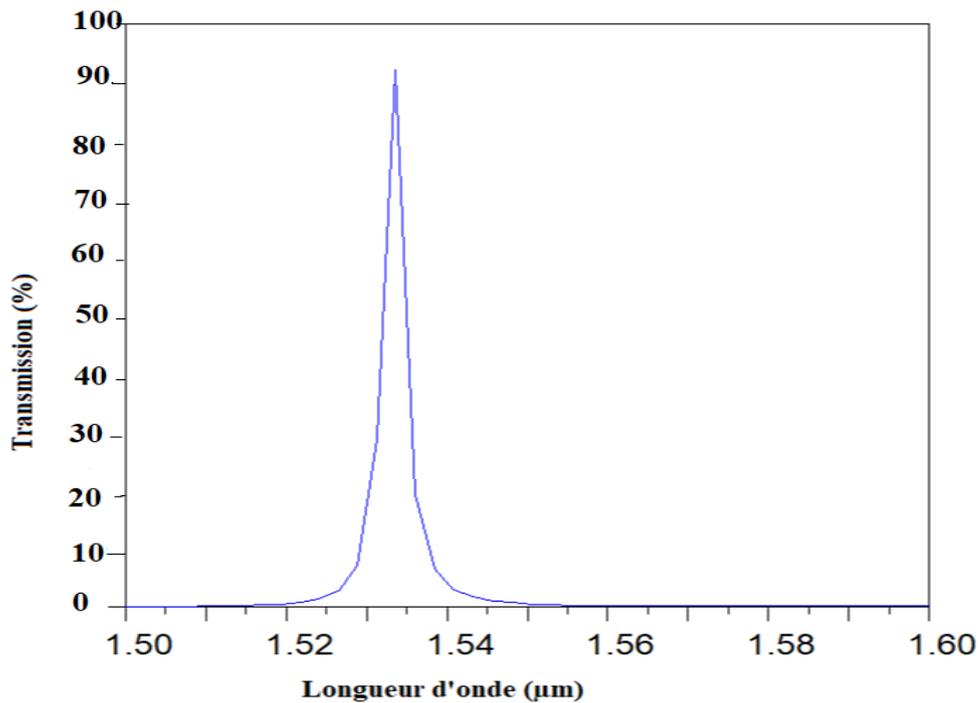


Figure III.15 : Spectre de transmission de la structure finale du filtre.

Afin de démontrer la faisabilité de notre filtre, nous avons simulé le champ à la longueur d'onde $\lambda=1.5336\mu\text{m}$. Le résultat est montré sur la figure III.16. D'après cette figure, nous

remarquons que la lumière est transmise du guide d'entrée vers le guide de sortie à travers la cavité.

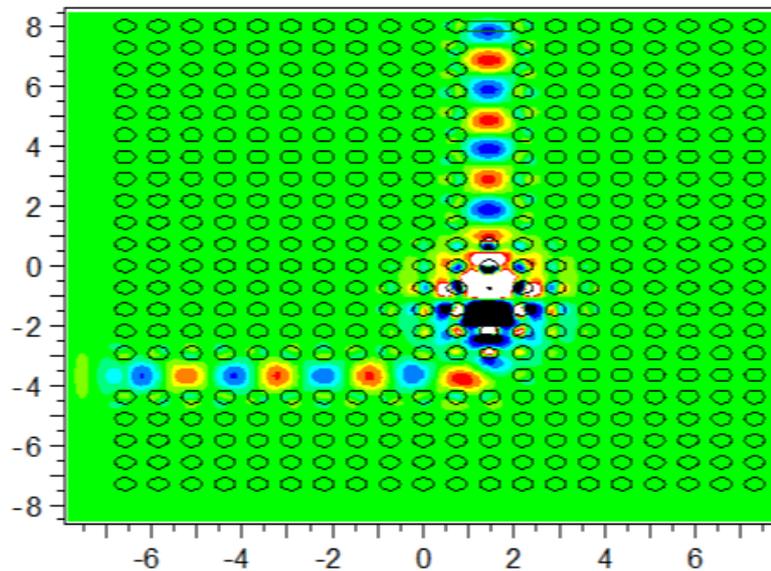


Figure III.16 : Répartition du champ dans le filtre pour $\lambda=1.5336 \mu\text{m}$.

III.5/ Démultiplexeur à cristaux photoniques :

En utilisant le filtre étudié précédemment, il est possible de concevoir un démultiplexeur à cristaux photoniques. La structure du démultiplexeur proposé est représentée sur la figure III.17. Ce démultiplexeur est conçu pour séparer quatre longueurs d'onde spécifiques. Il est composé d'un guide d'onde d'entrée et de quatre canaux de sortie, entre lesquels sont positionnées quatre cavités à cristaux photoniques. La sélection de la longueur d'onde de sortie pour chaque canal est réalisée en ajustant le déplacement des tiges situées aux bords de chaque cavité. Les déplacements considérés sont $d=0 \mu\text{m}$, $d=0.02 \mu\text{m}$, $d=0.04 \mu\text{m}$ et $d=0.06 \mu\text{m}$, pour les canaux 1, 2, 3 et 4, respectivement. Initialement, la distance entre les canaux et la longueur du réflecteur sont choisis égaux à $D=8$ tiges et $L=8$ tiges, respectivement.

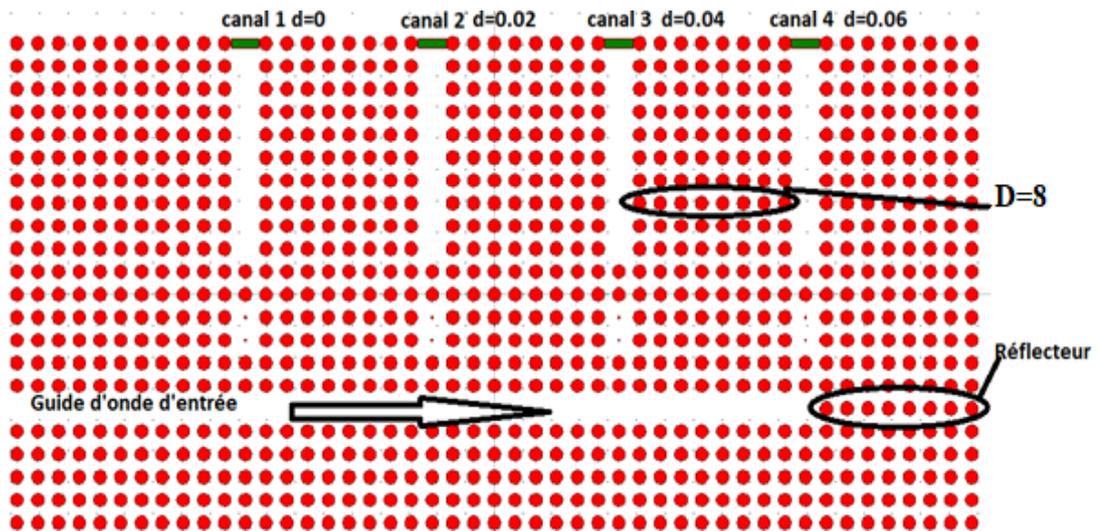


Figure III.17 : Représentation schématique du démultiplexeur proposé.

Nous avons simulé la structure avec le logiciel fullwave basé sur la méthode FDTD. Le résultat obtenu est représenté sur la figure III.18. La simulation effectuée révèle la présence de quatre pics résonants distincts à la sortie des quatre canaux 1, 2, 3, 4 avec des taux de transmission de $T_1=26\%$, $T_2=41\%$, $T_3=19\%$ et $T_4=79\%$ correspondant aux longueurs d'ondes $\lambda_1 = 1.5336\mu\text{m}$, $\lambda_2 = 1.5432\mu\text{m}$, $\lambda_3 = 1.5504\mu\text{m}$ et $\lambda_4 = 1.5579\mu\text{m}$, respectivement. Ces taux de transmission ne répondent pas aux exigences et nécessitent des améliorations pour obtenir des efficacités de transmission satisfaisantes. Afin d'améliorer les caractéristiques du démultiplexeur, nous devons modifier quelques paramètres.

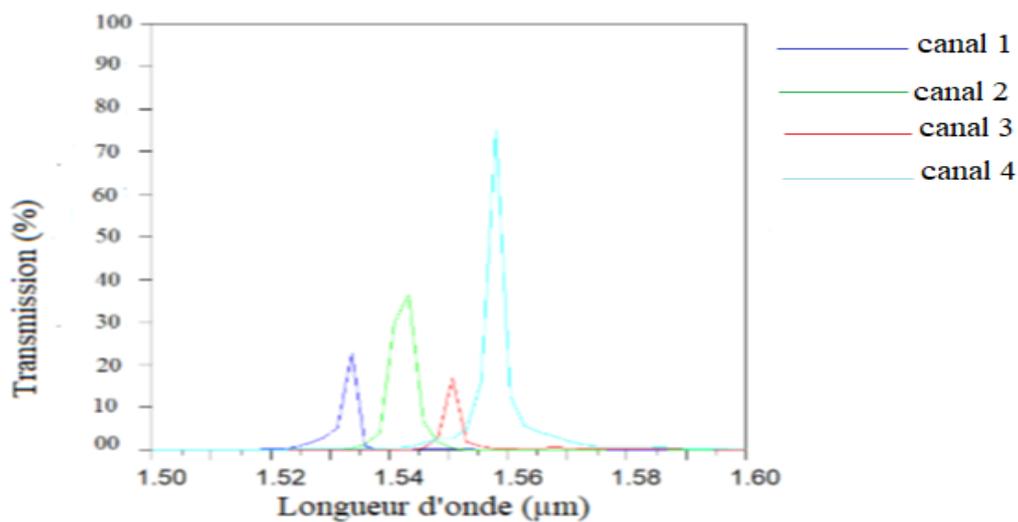


Figure III.18 : Spectre de transmission du démultiplexeur pour $D=8$ et $L=8$.

III.5.1/ Modification de la distance entre les canaux :

Dans le but d'évaluer l'impact de la distance entre les canaux sur les propriétés du démultiplexeur, nous avons simulé notre structure pour différentes valeurs de la distance. Les résultats obtenus sont résumés sur le tableau III.4:

Distance entre les canaux	D=3 tiges		D= 6 tiges		D=9 tiges	
	Longueur d'onde λ (μm)	Transmission (%)	Longueur d'onde λ (μm)	Transmission (%)	Longueur d'onde λ (μm)	Transmission (%)
Canal 1	1.5336	40.31	1.5336	16.04	1.5336	42.66
Canal 2	1.5432	24.37	1.5432	48.16	1.5432	7.33
Canal 3	1.5504	72.87	1.5504	58.32	1.5504	83.35
Canal 4	1.5579	95.23	1.5579	88.09	1.5579	85.82

Tableau III.4 : Influence de la distance entre les canaux sur les caractéristiques du démultiplexeur.

D'après les résultats obtenus dans le tableau III.4, nous remarquons que la modification de la distance entre les canaux à un impact sur les propriétés du démultiplexeur. Dans notre cas, la valeur optimale retenue est D= 3 tiges, pour laquelle nous relevons les taux de transmission 40.31 % pour le canal 1, 24.37% pour le canal 2, 72.87% pour le canal3 et 95.23% pour le canal4.

III.5.2/Modification de la longueur du réflecteur :

La longueur du réflecteur est un autre paramètre qui peut affecter les caractéristiques de notre démultiplexeur. Afin d'étudier son influence nous avons calculé la transmission des quatre canaux pour différentes valeurs.. Les résultats obtenus sont reportés sur le tableau III.5 :

longueur du réflecteur	L=2		L=5		L=8	
Caractéristique du démultiplexeur	Longueur d'onde λ (μm)	Transmission (%)	Longueur d'onde λ (μm)	Transmission (%)	Longueur d'onde λ (μm)	Transmission (%)
Canal 1	1.5336	54.7	1.5336	94.95	1.5336	40.31
Canal 2	1.5432	33.78	1.5432	40.5	1.5432	24.37
Canal 3	1.5504	42.99	1.5504	75.8	1.5504	72.87
Canal 4	1.5579	43.88	1.5579	82.5	1.5579	95.23

Tableau III.5 : Influence de la longueur du réflecteur sur les caractéristiques du démultiplexeur

L'analyse des résultats reportés sur ce tableau, nous a permis de choisir comme longueur optimal du réflecteur la valeur L=5, pour laquelle nous notons les taux de transmission 94.95% pour le canal 1, 40.5% pour le canal 2, 75.8% pour le canal 3 et 82.5% pour le canal 4. Ces résultats sont représentés sur la figure III.19.

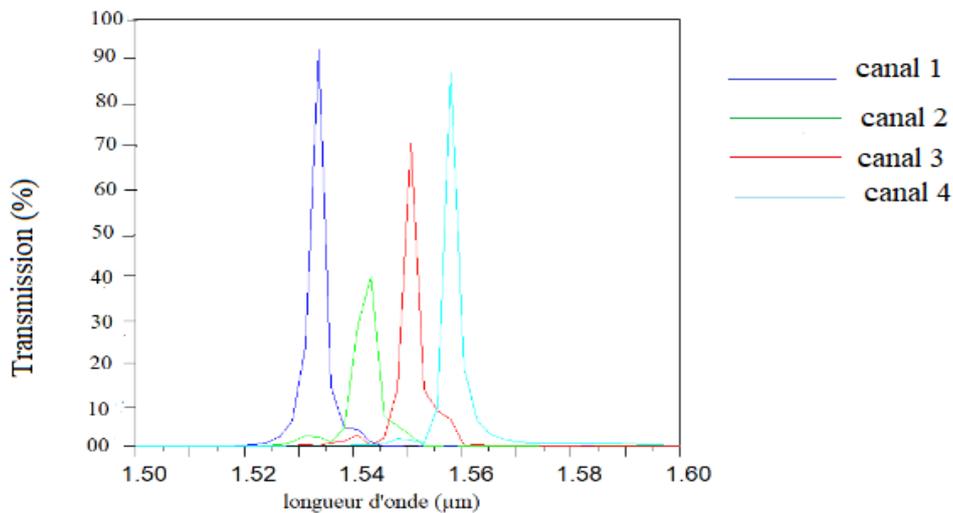


Figure III.19 : Spectre de transmission du démultiplexeur pour D=3 et L=5.

Nous avons simulé la répartition du champ dans le démultiplexeur pour les différents canaux. Le résultat est montré sur la figure III.20.

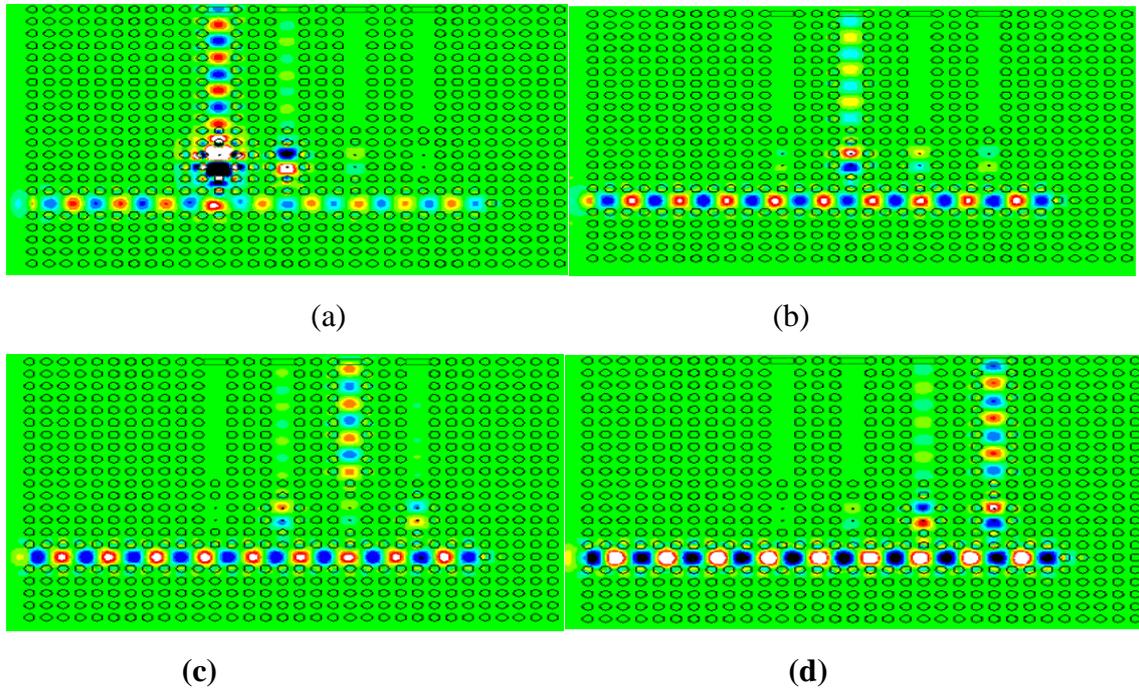


Figure III.20 : Répartition du champ dans le démultiplexeur avec $D=3$ tiges et $L=5$ tiges pour les longueurs d'onde : (a) $\lambda_1 = 1.5336 \mu\text{m}$, (b) $\lambda_2 = 1.5432 \mu\text{m}$, (c) $\lambda_3 = 1.5504 \mu\text{m}$ et (d) $\lambda_4 = 1.5579 \mu\text{m}$.

Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'étude et la conception d'un filtre à base de cavités résonantes à cristaux photoniques. L'objectif principal de cette étude était l'optimisation des caractéristiques de notre filtre en analysant l'impact de la variation de plusieurs paramètres sur ce dernier. En se basant sur les résultats obtenus, nous avons utilisé ce filtre pour concevoir un démultiplexeur à cristaux photoniques capable de séparer quatre longueurs d'ondes. Les résultats obtenus à travers nos simulations ont confirmé l'efficacité des composants conçus.

Références bibliographiques

- [1] H. Absalan « A Four-Channel Optical Demultiplexer Using Photonic Crystal-Based Resonant Cavities », *J. Opt. Commun.*, 39(4), pp. 369-373, 2018.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Les filtres optiques à cavités résonantes à cristaux photoniques sont une technologie prometteuse pour la miniaturisation et l'efficacité des dispositifs optiques et de télécommunication. La conception et l'étude des filtres optiques représentent une avancée significative dans le domaine de la photonique, ces filtres exploitent les propriétés optiques des cristaux photoniques pour produire des résonances optiques dans une cavité, ce qui permet de contrôler de manière précise la propagation de la lumière avec une bande passante étroite et une sélectivité spectrale élevée. Ces filtres présentent plusieurs avantages par rapport aux filtres optiques conventionnels, tels qu'une meilleure précision, ce qui les rend utiles dans de nombreux domaines, notamment la communication optique

Le projet a pour objectif principal l'étude et la conception d'un filtre optique basé sur des cavités résonantes à cristaux photoniques. Dans cette optique, nous avons d'abord introduit les concepts généraux des cristaux photoniques et avons défini les filtres optiques ainsi que les cavités à cristaux photoniques. Ensuite, nous nous sommes penchés sur l'utilisation du logiciel Fullwave, qui est un outil puissant de simulation optique. Ce logiciel nous a permis de concevoir et de simuler le filtre optique à base de cavités résonantes.

Dans cette étude détaillée sur le filtre optique, nous avons effectué des améliorations en ajustant différents paramètres clés. Tout d'abord, nous avons joué sur la distance et le rayon de couplage des tiges pour optimiser la transmission et le facteur de qualité du filtre. En ajustant ces paramètres de manière appropriée, nous avons pu obtenir une meilleure performance du filtre, avec une transmission améliorée et un facteur de qualité plus élevé.

Ensuite, nous avons également pris en compte la longueur du réflecteur dans notre conception du filtre. En modifiant la longueur du réflecteur, nous avons pu ajuster la réponse en fréquence du filtre et optimiser sa sélectivité. Cela nous a permis d'obtenir des performances plus précises et adaptées à nos besoins.

En utilisant le filtre optimisé, nous avons pu réaliser un démultiplexeur efficace qui est capable de séparer quatre longueurs d'onde et de les acheminer vers les sorties correspondantes. Cela permet une transmission simultanée de plusieurs signaux optiques à des longueurs d'onde distinctes, ce qui est essentiel dans les systèmes de communication optique à haut débit.

Conclusion générale

Enfin, ce travail a été une précieuse opportunité pour acquérir une expérience personnelle et professionnelle significative. Tout au long de cette étude, nous avons pu approfondir nos connaissances dans le domaine des cristaux photoniques, des filtres optiques et des cavités résonantes. De plus, en utilisant le logiciel Rsoft, nous avons développé des compétences pratiques dans la modélisation et la simulation des dispositifs optiques.

Résumé

Les cristaux photoniques sont des structures périodiques qui modifient la propagation de la lumière de manière contrôlée. Ils sont conçus pour avoir une périodicité dans l'indice de réfraction ce qui crée une bande interdite photonique dans laquelle la propagation de certaines longueurs d'onde de lumière est interdite.

Ce mémoire vise à explorer les propriétés d'un filtre optique utilisant des cavités résonantes à cristaux photoniques bidimensionnels. Les propriétés de cette structure photonique seront numériquement évaluées en effectuant des simulations à base de la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD). Les résultats obtenus indiquent que cette structure peut être un candidat potentiel pour la conception d'un démultiplexeur en longueur d'onde.

Mots clés : cristaux photonique, bande interdite photonique, filtre optique, cavités résonantes, fullwave, démultiplexeur.

Abstract

Photonic crystals are periodic structures that alter the propagation of light in a controlled manner. They are designed to have a periodicity in the index of refraction which creates a photonic bandgap in which the propagation of certain wavelengths of light is prohibited.

This thesis aims to explore the properties of an optical filter using two-dimensional photonic crystal resonant cavities. The properties of this photonic structure will be numerically evaluated by performing simulations based on the finite difference time domain method (FDTD). The results obtained indicate that this structure may be a potential candidate for the design of a wavelength demultiplexer.

Keywords : Photonic crystals, Photonic band gap, optical filter, resonant cavities, Fullwave, Demultiplexer.