

Département d'Automatique, Télécommunication et d'Electronique

Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Télécommunications.

Spécialité : Systèmes Des Télécommunications.

Thème

Amélioration des performances des filtres optiques à base de cavités linéiques à cristaux photoniques bidimensionnels

Préparé par :

- CHENACHE Malia
- DERRADJI Amira

Dirigé par :

Mme. Bendjelloul Rahima

Examiné par :

Mme. Achour Yakout
Mme. Bouncer Samira

Année universitaire : 2023/2024

Table des matières

Table des figures	iv
Liste des tableaux	vi
Liste des abréviations	vii
Introduction générale	1
I. Généralités sur les cristaux photoniques	3
I.1 Introduction	3
I.2 Définition des cristaux photoniques	3
I.3 Type des cristaux photoniques (1D, 2D, 3D)	4
I.3.1 Cristaux photoniques unidimensionnels	5
I.3.2 Cristaux photoniques bidimensionnels	6
I.3.2.1 Catégories de cristaux photoniques en 2D	6
I.3.2.2 Diagramme de bandes	7
I.3.2.3 Concepts fondamentaux	8
I.3.2.3.1 Polarisation	8
I.3.2.3.2 Réseau réciproque	9
I.3.2.3.3 Zone de Brillouin	10
I.3.3 Les cristaux photoniques tridimensionnels	11
I.4 Défauts dans les cristaux photoniques	11
I.4.1 Défauts ponctuels	11
I.4.2 Défauts linéaires	12
I.5 Applications des cristaux photoniques	12
I.5.1 Fibres optiques	13
I.5.2 Capteurs à cristaux photoniques	13
I.6 Technologies et Matériaux	14
I.7 Techniques de modélisation	15
I.7.1 Méthode des ondes planes (PWE)	15
I.7.2 Méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD)	16
I.8 Conclusion	16
Bibliographie	18
II. Filtres optiques à cristaux photoniques	20

II.1	Introduction	20
II.2	Filtre optique	20
II.3	Types de filtres optiques	21
II.3.1	Filtres à guide d'ondes	21
II.3.2	Filtres à résonateur en anneau à cristaux photoniques	22
II.3.3	Filtres à cavités à cristaux photoniques	23
II.4	Caractéristiques de la cavité	23
II.4.1	Facteur de qualité	24
II.4.2	Types des cavités	25
II.4.2.1	Cavité hexagonale	25
II.4.2.2	Cavité linéiques	26
II.5	Topologies de filtre à base de cavité résonante	27
II.5.1	Première configuration	27
II.5.2	Deuxième configuration	27
II.5.3	Troisième configuration	28
II.6	Démultiplexeurs à base de cristaux photoniques	29
II.7	Quelques topologies	30
II.7.1	Première topologie	30
II.7.2	Deuxième topologie	31
II.7.3	Troisième topologie	32
II.8	Conclusion	33
	Bibliographie	34
III.	Résultats et interprétations	36
III.1	Introduction	36
III.2	Présentation du logiciel	36
III.2.1	Simulateur BandSOLVE	37
III.2.2	Simulateur FullWAVE	38
III.3	Structure d'étude	38
III.4	Structure avec défauts	40
III.4.1	Étude de la première topologie d'un filtre à cristaux photoniques	40
III.4.1.1	Effet de la réflectivité des miroirs sur les caractéristiques du filtre	41
III.4.1.2	Effet de la taille des tiges situées aux extrémités de la cavité sur les caractéristiques du filtre	43
III.4.1.3	Effet du déplacement des tiges situées aux extrémités de la cavité sur sur les caractéristiques du filtre	44
III.4.2	Étude de la deuxième topologie de filtre à cristaux photoniques	46
III.4.2.1	Effet de la réflectivité des miroirs sur les caractéristiques du filtre	47
III.4.2.2	Effets de la longueur de réflecteur sur les caractéristiques du filtre	48

III.4.2.3 Effet de la taille des tiges situées aux extrémités de la cavité sur les caractéristiques du filtre	49
---	----

III.5 Conclusion	51
Bibliographie	52
Conclusion générale	53

Table des figures

Figure I.1 Exemples de cristaux photoniques naturels : (a) agrandissement d'une aile de papillon, (b) verre romain, (c) plume de paon [3]	4
Figure I.2 Représentation Schématique de cristaux photoniques 1D, 2D ou 3D [4]	5
Figure I.3 Structure unidimensionnelle [6]	5
Figure I.4 Structures bidimensionnelles : (a) connectée, (b) déconnectée [7]	6
Figure I.5 Structures 2D : (a) carré, (b) triangulaire et (c) hexagonale [8]	7
Figure I.6 Diagrammes de bandes pour les polarisations TE (rouge) et TM (bleu) d'une structure bidimensionnelle, représentés [9]	8
Figure I.7 Polarisation TM et polarisation TE [5]	9
Figure I.8 Réseau réel, réciproque, première zone de Brillouin et zone de Brillouin irréductible pour les réseaux 2D (a) carré et (b) triangulaire [5]	10
Figure I.9 (a) première structure BIP 3D : Layablonovite, (b) Image MEB d'un CP3D : Tas de Bois [11]	11
Figure I.10 (a) Défauts ponctuels, (b) Défaut lacunaire et (c) Défauts de substitutions [14]	12
Figure I.11 Exemples de défauts linéaires dans un cristal photonique 2D : (a) en supprimant une seule rangée de motifs, et (b) en variant le rayon d'une seule rangée de motifs de la structure [5]	12
Figure I.12 Image par microscope électronique d'une fibre à cristal photonique. Le cœur central a un diamètre de 5 μm , contre 4 μm pour les trous [17]	13
Figure I.13 Exemples de réalisation de cristaux photoniques (a) Cavité à CP 1D (b) CP-2D infini (c) CP-3D ayant une structure « tas de bois » (d) CP-3D de type opale [20]	15
Figure II.1 Résonateurs en anneaux à cristaux photoniques : (a) un anneau quasi-carré dans un réseau carré, (b) un anneau hexagonal dans un réseau triangulaire, (c) un anneau circulaire dans un quasi-cristal photonique [4]	22
Figure II.2 Réponse spectrale d'une cavité [7]	25
Figure II.3 Exemples de cavités de types H_n : (a) cavité H_0 , (b) cavité H_1 , (c) cavité H_4 [9]	26
Figure II.4 Exemples de cavités de types L_n : (a) cavité L_3 , (b) cavité L_5 , (c) cavité L_7 [11]	26

Figure II.5 Représentation schématique du filtre proposé par [12] et son spectre de transmission	27
Figure II.6 Représentation schématique du filtre proposé par [13] et son spectre de transmission	28
Figure II.7 Représentation schématique du filtre proposé par [14] et son spectre de transmission	29
Figure II.8 Démultiplexeur à 8 canaux	30
Figure II.9 Structure schématique du démultiplexeur proposé par [12]	31
Figure II.10 Structure schématique du démultiplexeur proposé par Zadeh et al. [16]	32
Figure II.11 Structure schématique du démultiplexeur proposé par Bouamami et al. [17]	32
Figure III.1 Fenêtre du programme RSoft CAD	37
Figure III.2 Fenêtre principale de BandSOLVE	37
Figure III.3 Fenêtre principale de FullWAVE	38
Figure III.4 Structure sans défauts	39
Figure III.5 Diagramme de bandes de la structure d'étude	40
Figure III.6 Représentation schématique de la première topologie du filtre	41
Figure III.7 Filtre à cristaux photoniques avec 3 tiges de séparation entre la cavité et le guide d'onde.	42
Figure III.8 Spectres de transmission du filtre pour N=2 et 3.	42
Figure III.9 Spectres de transmission du filtre pour différentes valeurs de r' .	43
Figure III.10 Spectres de transmission du filtre pour différentes valeurs de d .	45
Figure III.11 Répartition du champ dans le filtre à $\lambda = 1.5362 \mu m$	46
Figure III.12 Représentation schématique de la deuxième topologie du filtre.	47
Figure III.13 Spectre de transmission du filtre pour (a) N=3, (b) N=2	48
Figure III.14 Spectres de transmission en fonction de la longueur du réflecteur L.	49
Figure III.15 Spectres de transmission en fonction du rayon r' .	50
Figure III.16 Représentation de la distribution du champ électrique pour le filtre pour $\lambda = 1.5117 \mu m$	51

Liste des tableaux

Tableau III.1 : Caractéristiques du filtre en fonction de N .	43
Tableau III.2 : Caractéristiques du filtre en fonction de r'	44
Tableau III.3 : Caractéristiques du filtre en fonction du déplacement.	45
Tableau III.4 : Caractéristiques du filtre en fonction de N .	48
Tableau III.5 : Caractéristiques du filtre en fonction de la longueur du réflecteur L .	49
Tableau III.6 : Caractéristiques du filtre en fonction du rayon r'	50

Liste des abréviations

1D	Unidimensionnel
2D	Bidimensionnel
3D	Tridimensionnel
BIP	Bande Interdite Photonique
CP	Cristal Photonique
CPs-1D	cristaux Photoniques en une Dimension
CPs-2D	cristaux Photoniques en deux Dimensions
CPs-3D	cristaux Photoniques en trois Dimensions
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
FCP	Fibres à Cristaux Photoniques
FDTD	Finite Difference Time Domain
FDTD-2D	Bidimensional Finite Difference Time Domain
FWHM	Full Width at Half Maximum
PBG	Photonic Band Gap
PCF	Photonic crystal fibers
PWE	Plane Wave Expansion
TE	Transverse Magnétique : la polarisation électrique
TM	Transverse Electrique : la polarisation magnétique
WDM	Wavelength Division Multiplexing
ZB	Zones de Brillouin
a	Période du cristal photonique
C	Célérité de la lumière dans le vide
f	Facteur de remplissage
ϵ	Permittivité diélectrique
F	Facteur de remplissage
η	Constante de Planck réduite
λ	Longueur d'onde
μ	Perméabilité magnétique
n	Indice de réfraction
n_h	Indice de réfraction du matériau de haut indice
r	Rayon du cristal photonique
w	Pulsation

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à exprimer notre gratitude envers Dieu pour nous avoir permis d'atteindre cette étape de notre parcours académique. Sans Sa guidance et Sa miséricorde, nous ne serions pas là où nous en sommes aujourd'hui.

Un immense merci à notre encadrante, **Mme R. Bendjelloul**, pour son soutien, ses conseils précieux et son engagement tout au long de l'élaboration de ce mémoire. Son expertise et son dévouement ont grandement contribué à l'aboutissement de ce travail.

Nous adressons également nos remerciements aux membres du jury **Mme S. Bouncer et Mme Y. Achour** qui ont pris le temps d'examiner attentivement notre travail, de le critiquer et de le valoriser. Leurs commentaires constructifs ont été d'une aide précieuse pour améliorer la qualité de notre mémoire.

Enfin, nous voulons exprimer notre profonde reconnaissance envers nos familles pour leur soutien inconditionnel, leurs encouragements constants et leur compréhension tout au long de cette période exigeante. Leur amour et leur soutien ont été des piliers essentiels pour nous permettre de mener à bien ce projet.

À tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire, nous vous adressons nos plus sincères remerciements. Votre apport a été indispensable dans cette aventure académique.

Dédicaces

À mes parents bien-aimés, **Saida et Abdelhamid**, je leur dédie ce mémoire en premier lieu.

Votre soutien constant, votre affection inconditionnelle et vos conseils précieux ont rendu possible ce moment crucial de ma vie.

À ma sœur **Tinhinane**, tu as été ma principale source de soutien et de réconfort. Ton engagement indéfectible a été déterminant dans de nombreuses réussites.

À mes frères **Yanis et Idir**, je vous adresse mes sincères remerciements. Votre présence et votre soutien inébranlable ont enrichi mon parcours de manière significative.

Je souhaite également exprimer ma profonde gratitude à mon fiancé **Bilal**. Ta présence m'a apporté courage et détermination, ton amour m'a soutenue à travers les épreuves les plus difficiles.

Je tiens enfin à remercier chaleureusement **Amira**, ma binôme, pour notre collaboration fructueuse et notre complicité qui ont enrichi mon parcours académique.

À chaque personne qui m'a soutenu de près ou de loin, qui m'a encouragé et a partagé mes succès, votre impact a été immense et je vous en suis infiniment reconnaissante.

Que cette réussite soit aussi la vôtre, car chacun de vous a contribué à ma victoire. Merci du fond du cœur pour tout votre amour, votre soutien et votre confiance.

Malia Sara



Dédicaces

Le voyage n'a pas été court, et il ne devait pas l'être.
Le rêve n'était pas proche, et le chemin n'était pas parsemé de facilités. Mais je l'ai fait et
j'ai réussi.

Louange à Dieu, le Tout-Puissant, avec reconnaissance et gratitude, car grâce à Lui,
aujourd'hui je regarde un rêve qui a longtemps été attendu et qui est devenu une réalité dont
je suis fier.

À celui qui m'a soutenue sans limites et qui m'a donné sans attendre en retour mon père
"Brahim".

À mon ange visible, ma force après Dieu, mon soutien premier et éternel ma mère
"Salima", Je te dédie cet accomplissement, car sans tes sacrifices, il n'aurait jamais existé.

À celle qui me rappelle ma force et se tient derrière moi comme mon ombre ma sœur
"Chaima".

À celui qui a tendu la main sans relâche ni fatigue pendant mes moments de faiblesse, mon
frère **"Youcef"**, que Dieu te maintienne toujours à mes côtés.

À celle qui a cru en mes capacités et en la sécurité de mes jours ma tante **"Fazia"**.

À ma binôme **"Malia"**, avec laquelle j'ai partagé beaucoup de joies et de difficultés au
cours de notre travail.

À tous ceux que j'aime et qui m'aiment.

Derradji Amira



Introduction générale

Au cours de la dernière décennie, les cristaux photoniques (CPs) ou matériaux à bande interdite photonique (BIP) ont suscité un intérêt considérable dans le domaine de la recherche scientifique et technologique. Ces structures, capables de manipuler la lumière de manière contrôlée, ouvrent des perspectives prometteuses pour diverses applications, allant des micro-ondes à l'optoélectronique et aux communications optiques. Grâce à leur périodicité, les CPs influencent le comportement des photons de manière similaire à celui des électrons dans un réseau cristallin. Cette caractéristique permet de confiner, localiser, filtrer et guider la lumière de manière efficace. Une telle maîtrise précise des longueurs d'onde des signaux optiques est essentielle pour le bon fonctionnement des réseaux de télécommunications optiques [1].

Les filtres à base de cavités à cristaux photoniques constituent une application importante des cristaux photoniques dans le domaine de l'optique et des télécommunications. Leur capacité à sélectionner et à filtrer les longueurs d'onde spécifiques ouvre la voie à de nombreuses applications dans les communications optiques. C'est dans ce contexte que va s'inscrire notre travail, où nous nous concentrons sur la conception des filtres à base de cristaux photoniques, sur leur optimisation et leurs performances.

Le mémoire est structuré en plusieurs chapitres détaillant les aspects essentiels des cristaux photoniques :

Dans le premier chapitre nous présentons les concepts fondamentaux, y compris la définition des cristaux photoniques, leurs types (1D, 2D, 3D) et leurs propriétés spécifiques telles que les bandes interdites photoniques. Nous explorons les diverses applications des CPs, notamment dans les fibres optiques et les capteurs photoniques. Ce chapitre met en lumière les avantages

de ces structures dans l'amélioration des technologies existantes et l'innovation de nouvelles solutions.

Le deuxième chapitre explorera les filtres à cristaux photoniques, décrivant leur fonctionnement et présentant diverses configurations. La dernière partie abordera spécifiquement les démultiplexeurs à cristaux photoniques, en détaillant leurs conceptions et leurs utilisations.

Le dernier chapitre sera dédié à l'analyse des résultats de simulation pour différentes configurations de filtres à cristaux photoniques, en utilisant le logiciel fullwave. Nous expliquerons comment nous avons réalisé notre filtre optique, puis nous discuterons en détail des résultats obtenus.

Enfin, nous terminerons notre mémoire par une conclusion générale.

Chapitre I

Généralités sur les cristaux photoniques

I.1 Introduction

Ces dernières années, de nombreuses études ont porté sur le développement de dispositifs photoniques microscopiques et nanoscopiques utilisant des cristaux photoniques (CP) en raison de leur capacité à contrôler la propagation de la lumière [1].

Ce chapitre offre une introduction générale aux cristaux photoniques, en commençant par une définition de ceux-ci, suivie d'une présentation des différents types et caractéristiques. Ensuite, nous aborderons les principes des défauts dans les cristaux photoniques et conclurons par quelques applications dans les domaines de l'optique et des télécommunications.

I.2 Définition des cristaux photoniques

Les cristaux photoniques, aussi désignés sous le terme de matériaux à Bandes Interdites Photoniques (BIP), sont des structures de taille nanométrique dans les quelles l'indice de réfraction varie de manière périodique dans une ou plusieurs directions spatiales. L'aspect clé des cristaux photoniques réside dans leur capacité à présenter des bandes de fréquences interdites, où la propagation de la lumière est bloquée dans certaines directions et pour certaines fréquences. C'est pourquoi ils sont également appelés matériaux à bandes interdites photoniques (BIPs). Cette propriété les rend particulièrement pertinents pour diverses applications en optique intégrée [2].

Les cristaux photoniques se trouvent également dans la nature sous différentes formes, comme montre la Figure I.1. Par exemple, les papillons sont parmi les insectes les plus colorés

que nous offre la nature. Ils dépendent fortement de la lumière et ont développé des adaptations impressionnantes pour interagir avec les ondes électromagnétiques de manière optimale. La Figure (I.1.a) montre la structure microscopique de l'aile d'un papillon, qui se comporte de la même manière que les structures à bandes interdites photoniques.

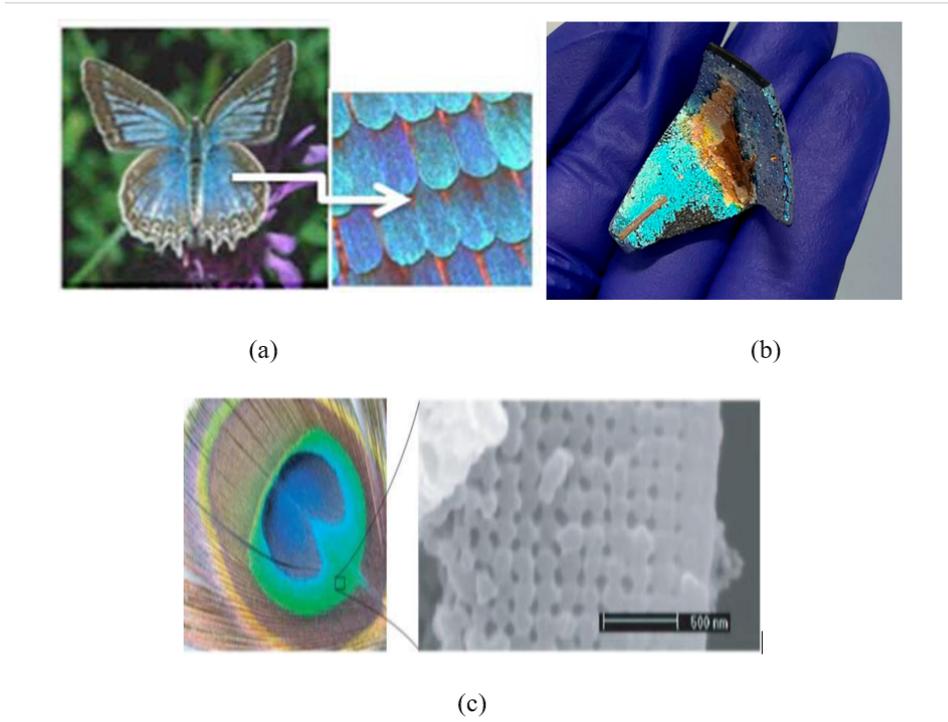


FIGURE I.1 – Exemples de cristaux photoniques naturels : (a) agrandissement d'une aile de papillon, (b) verre romain, (c) plume de paon [3].

I.3 Type des cristaux photoniques (1D ,2D, 3D)

Les cristaux photoniques sont catégorisés en trois types en fonction de leur dimensionnalité : cristaux photoniques unidimensionnels (1D), cristaux photoniques bidimensionnels (2D) et cristaux photoniques tridimensionnels (3D), comme illustré dans la Figure I.2).

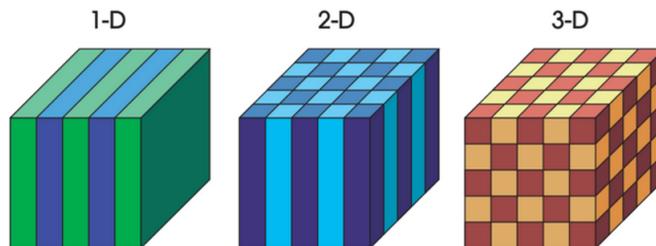


FIGURE I.2 – Représentation Schématique de cristaux photoniques 1D, 2D et 3D [4].

I.3.1 Cristaux photoniques unidimensionnels

Les cristaux photoniques unidimensionnels (1D) sont relativement simples à concevoir. Ils sont créés en superposant de manière régulière des couches plates de diélectriques ayant des indices de réfraction différents. Lorsque la lumière traverse ces interfaces entre les couches, une partie est renvoyée en arrière tandis que l'autre passe à travers. Selon les différences de phases, cela peut provoquer des interférences qui peuvent être destructives ou constructives. Les interférences constructives des ondes renvoyées entraînent une réflexion totale. Par conséquent, à des longueurs d'onde spécifiques, ces structures multicouches agissent comme des miroirs [5].

Les cristaux photoniques unidimensionnels, également appelés miroirs de Bragg, sont les structures les plus simples de cristaux photoniques. Ils se composent d'un empilement périodique de couches de matériaux diélectriques de permittivités différentes ϵ_1 et ϵ_2 , comme nous pouvons le voir dans la Figure I.3.

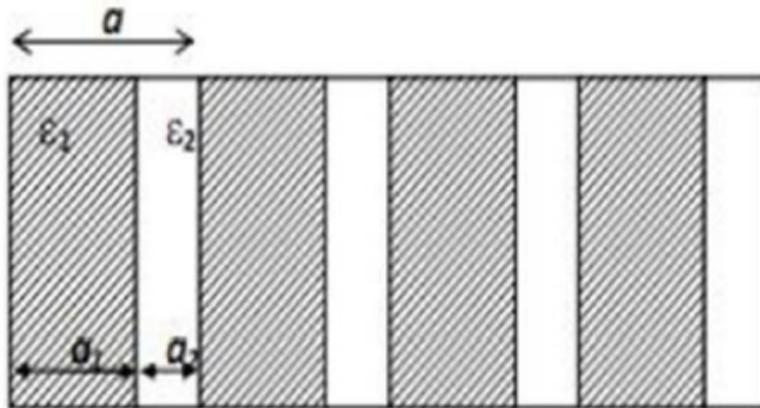


FIGURE I.3 – Structure unidimensionnelle [6].

I.3.2 Cristaux photoniques bidimensionnels

En raison des défis liés à la fabrication de structures tridimensionnelles, on a exploré la possibilité de créer et d'étudier des structures en deux dimensions. Ces structures présentent une modulation périodique de la permittivité diélectrique selon deux axes de l'espace, tout en conservant une homogénéité dans le troisième axe. Le comportement optique de ces structures dépend de la polarisation de l'onde électromagnétique, qui peut être de type Transverse Electrique (TE) ou Transverse Magnétique (TM), et elles peuvent ne pas avoir une bande interdite complète.

Plusieurs approches existent pour réaliser ces structures bidimensionnelles. Par exemple, on peut disposer des tiges diélectriques dans l'air (structure déconnectée) ou dans un autre diélectrique (structure connectée), comme indiqué dans la figure I.4. Pour obtenir des bandes interdites larges, il est nécessaire d'avoir un contraste d'indice élevé, c'est-à-dire une grande différence entre les indices du matériau environnant et ceux des tiges diélectriques [7].

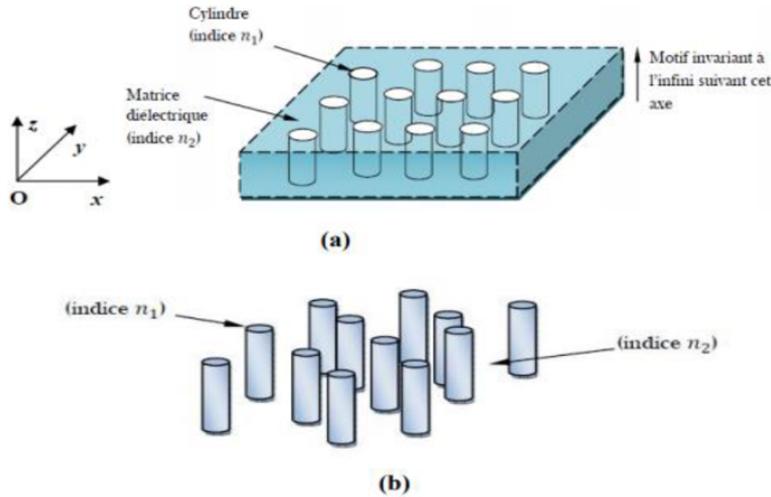


FIGURE I.4 – Structures bidimensionnelles : (a) connectée, (b) déconnectée [7].

I.3.2.1 Catégories de cristaux photoniques en 2D

De nombreux chercheurs se sont attelés à perfectionner les paramètres des structures bidimensionnelles pour garantir des bandes interdites complètes. Ces paramètres sont liés à la configuration du réseau sur lequel les motifs de la structure cristalline sont distribués. À cet égard, on peut distinguer trois principales catégories de cristaux photoniques 2D, telles qu'illustrées dans la Figure I.5.

- **Réseau carré** : Les nœuds du réseau se trouvent aux coins d'un carré, avec un côté de longueur " a ".
- **Réseau triangulaire** : Chaque nœud du réseau est séparé de son voisin le plus proche par une distance égale à " a ".
- **Réseau hexagonal** : Tous les nœuds sont identiques et sont espacés d'une distance " a ".

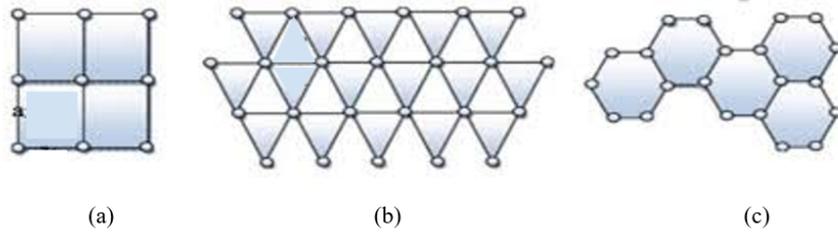


FIGURE I.5 – Structures 2D : (a) carré, (b) triangulaire et (c) hexagonale [8].

I.3.2.2 Diagramme de bandes

Pour obtenir les diagrammes de bandes, il est nécessaire de prendre en compte toutes les directions de propagation possibles pour chaque cristal. Selon les principes de la physique du solide [8], il est démontré que pour certaines symétries cristallines, il est possible de restreindre l'étude aux vecteurs d'ondes k situés à l'intérieur d'une zone spécifique appelée zone de Brillouin irréductible. Le vecteur k varie le long des directions de haute symétrie à l'intérieur de cette zone, qui fait partie du réseau réciproque du cristal.

La figure I.6 illustre un exemple de diagramme de bande calculé pour une matrice bidimensionnelle de trous d'air agencés selon un réseau triangulaire. Ce diagramme représente :

- Sur l'axe des abscisses, le chemin parcouru par le vecteur d'onde lorsqu'il suit le contour formé par les points de haute symétrie Γ , M , K de la première zone de Brillouin.
- Sur l'axe des ordonnées, les fréquences des modes calculés.

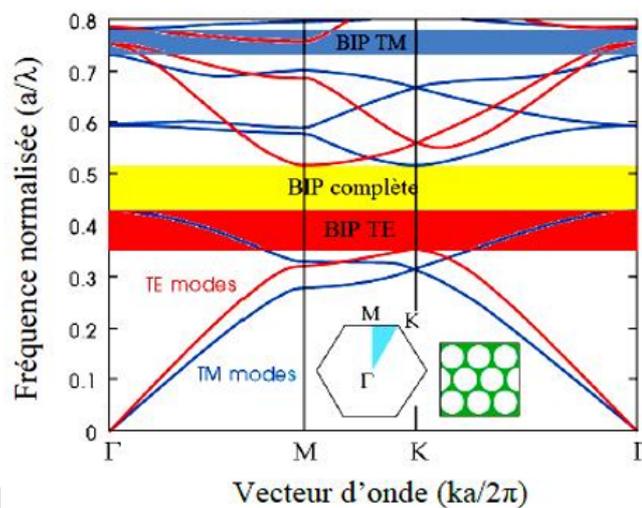


FIGURE I.6 – Diagrammes de bandes pour les polarisations TE (rouge) et TM (bleu) d'une structure bidimensionnelle, représentés [9].

Les bandes d'énergie autorisées ou interdites varient en fonction de la polarisation TE ou TM, entraînant ainsi l'existence d'un band gap distinct pour chaque polarisation. Lorsque les bandes interdites photoniques des polarisations TE et TM se superposent, cela conduit à une bande interdite dite parfaite, pour laquelle un contraste d'indice de réfraction suffisamment élevé est nécessaire [9],[10]. Les cristaux photoniques présentent un intérêt significatif en raison de leur capacité à bloquer la propagation de la lumière. Par conséquent, l'utilisation d'un cristal avec une bande interdite aussi parfaite que possible est recommandée.

I.3.2.3 Concepts fondamentaux

Dans le domaine de l'optique et des matériaux photoniques, plusieurs concepts fondamentaux jouent un rôle crucial dans la compréhension du comportement de la lumière. Parmi ces concepts, la polarisation, le réseau réciproque et la zone de Brillouin occupent une place centrale. Dans cette section, nous allons approfondir ces trois concepts pour mieux appréhender leur importance dans l'étude des phénomènes optiques et des propriétés des matériaux photoniques.

I.3.2.3.1 Polarisation

Si l'on considère un cristal photonique à deux dimensions composé de tiges, l'analyse du diagramme de bande de ce cristal permet de déterminer les caractéristiques (position et largeur) des bandes interdites photoniques pour chaque polarisation :

- La polarisation TE correspond au cas où le champ magnétique est aligné parallèlement à l'axe des tiges, tel qu'illustré dans la figure I.7(b).
- La polarisation TM se réfère à la situation où le champ électrique est orienté parallèlement à l'axe des tiges, comme le montre la figure (I.7 (a)).

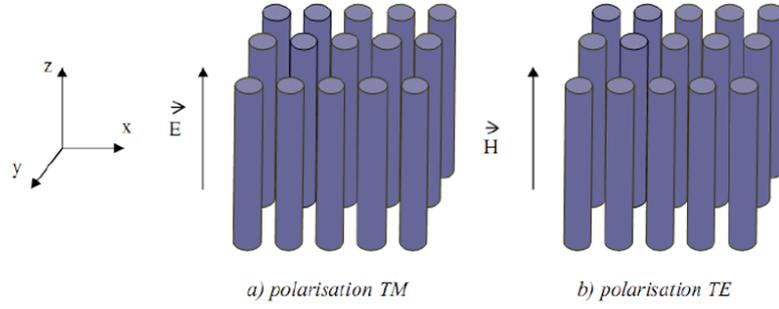


FIGURE I.7 – Polarisation TM et polarisations TE [5].

I.3.2.3.2 Réseau réciproque

Dans l'étude des cristaux photoniques, les diagrammes de bandes sont représentés en fonction des composantes du vecteur d'onde k . Pour travailler avec ce vecteur d'onde, on utilise une nouvelle base appelée base réciproque. Cette base est dérivée des vecteurs de base du réseau direct, qui correspondent au réseau du cristal photonique dans l'espace physique, via la transformation :

$$\vec{a}_i \cdot (\vec{b}_j) = 2\pi\delta_{ij} \quad (1.1)$$

Avec \vec{a}_i les vecteurs de base du réseau direct, \vec{b}_i les vecteurs de la base du réseau réciproque, et le symbole de Kronecker δ_{ij} [5]. La fonction δ_{ij} de Kronecker peut être définie comme suit :

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } i = j \\ 0 & \text{si } i \neq j \end{cases} \quad (1.2)$$

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

I.3.2.3.3 Zone de Brillouin

Les zones de Brillouin (ZB) sont des partitions de l'espace réciproque associé à un cristal. Elles sont infinies en nombre et sont définies à partir des plans de Bragg, qui sont perpendiculaires à l'ensemble des vecteurs obtenus par des combinaisons linéaires des vecteurs du réseau réciproque [5].

La zone de Brillouin irréductible est la plus petite surface qui permet de décrire la relation

de dispersion dans tout l'espace réciproque. Pour un réseau carré, cette zone prend la forme d'un triangle dont les sommets correspondent aux points de haute symétrie de l'espace réciproque : M , Γ et X . Dans le cas d'un réseau triangulaire, la zone de Brillouin est également un triangle dont les sommets sont les points de haute symétrie de l'espace réciproque, à savoir K , M , et Γ . Cela signifie que le vecteur d'onde suit les directions de plus haute symétrie : $X\Gamma$, $M\Gamma$ et MX pour un réseau carré, et $K\Gamma$, $M\Gamma$ et MK pour un réseau triangulaire.

La figure I.8 illustre l'espace direct et réciproque, ainsi que la première zone de Brillouin et la zone de Brillouin irréductible pour un réseau carré et un réseau triangulaire.

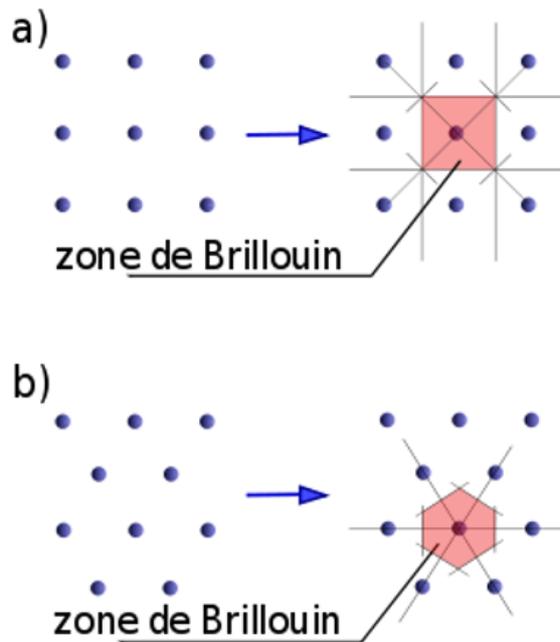


FIGURE I.8 – Réseau réel, réciproque, première zone de Brillouin et zone de Brillouin irréductible pour les réseaux 2D (a) carré et (b) triangulaire [5].

I.3.3 Les cristaux photoniques tridimensionnels

Les cristaux photoniques en trois dimensions (CPs-3D) continuent de susciter un vif intérêt. Ils se caractérisent par leur structure périodique dans les trois directions de l'espace, offrant ainsi de nombreuses possibilités de configurations. Le premier cristal photonique tridimensionnel a été constitué de sphères de silicium disposées selon une structure similaire à celle du diamant. Une fois que la structure est construite, on retire la silice pour obtenir un cristal photonique 3D à base de silicium dans l'air (voir la figure I.9). Ce cristal présente un

contraste d'indice suffisant pour créer une bande interdite photonique omnidirectionnelle.

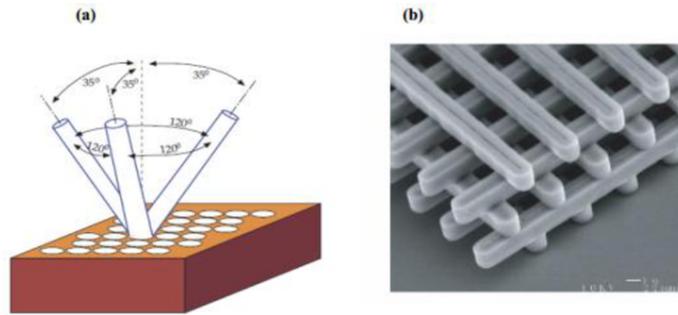


FIGURE I.9 – (a) première structure BIP 3D : La yablonovite, (b) Image MEB d'un CP3D : Tas de Bois [11].

I.4 Défauts dans les cristaux photoniques

De nombreuses applications des cristaux impliquent leur bande interdite photonique. Parfois, pour permettre la propagation d'une fréquence spécifique à l'intérieur de cette bande, des défauts doivent être ajoutés à la structure périodique. Ces défauts se classent généralement en deux catégories : les défauts linéaires et les défauts ponctuels [12], [13].

I.4.1 Défauts ponctuels

Dans les cristaux photoniques bidimensionnels, il existe plusieurs méthodes pour créer des défauts ponctuels. Cela peut être réalisé en retirant, ajoutant ou modifiant un ou plusieurs motifs de la structure cristalline. Comme la montre la Figure I.10). Dans tous les cas illustrés sur cette figure, des cavités optiques sont formées, et leurs modes de résonance situent à l'intérieur des bandes interdites du cristal.

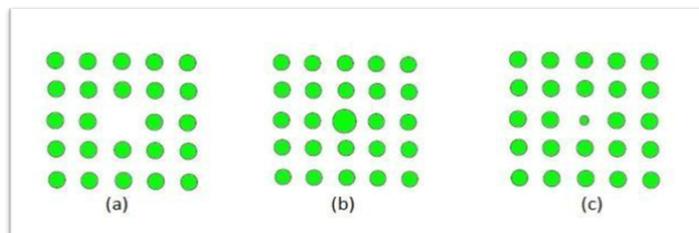


FIGURE I.10 – (a) Défauts ponctuels, (b) Défaut lacunaire et (c) Défauts de substitutions [14].

I.4.2 Défauts linéaires

En insérant un défaut linéaire dans un cristal photonique, il devient possible de contrôler la direction de propagation de la lumière. Ce type de défaut peut être créé en retirant ou en altérant une ou plusieurs rangées de motifs (trous ou tiges) du cristal photonique (voir Figure I.11). Les défauts linéaires, également appelés défauts étendus, peuvent être utilisés comme guides d'ondes. À l'intérieur de ces défauts, des modes avec une fréquence située dans la bande interdite photonique peuvent exister. Ces modes électromagnétiques, spécifiques aux guides d'ondes, sont confinés et peuvent se propager le long de ces guides [5].

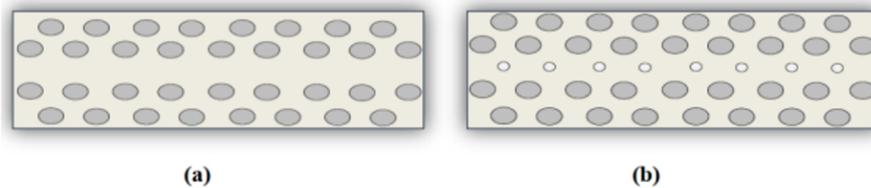


FIGURE I.11 – Exemples de défauts linéaires dans un cristal photonique 2D : (a) en supprimant une seule rangée de motifs, et (b) en variant le rayon d'une seule rangée de motifs de la structure [5].

I.5 Applications des cristaux photonique

Les cristaux photoniques ont de nombreuses applications dans des domaines variés, notamment l'optique, l'informatique, les micro-ondes et les télécommunications. Nous allons maintenant présenter quelques exemples d'applications majeures, telles que la fibre optique et les capteurs.

I.5.1 Fibres optiques

Les fibres à cristaux photoniques (PCF) présentent certains avantages par rapport aux fibres optiques monomodes à saut d'indice traditionnelles, notamment la capacité de fonctionner en mode unique tout en ayant une plus grande aire de mode [15]. Leur proposition initiale remonte aux années 1995 [16]. Cette fibre est composée d'un cœur en silice pure entouré d'un arrangement régulier de microscopiques canaux d'air, comme illustré dans la figure I.12. Son fonctionnement repose sur la présence de la bande interdite photonique, qui confine l'énergie au centre de la fibre, la guidant et l'empêchant de se propager vers la gaine.

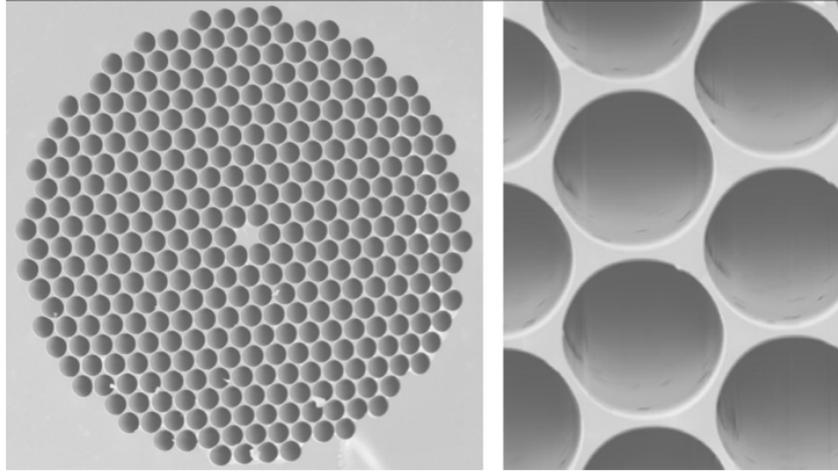


FIGURE I.12 – Image par microscope électronique d’une fibre à cristal photonique. Le cœur central a un diamètre de $5\ \mu\text{m}$, contre $4\ \mu\text{m}$ pour les trous [17].

I.5.2 Capteurs à Cristaux Photoniques

Les capteurs à Cristaux Photoniques (CP) ont significativement amélioré les performances de détection grâce à une meilleure interaction lumière-matière, à la miniaturisation des interfaces, ainsi qu’à l’augmentation de la sensibilité et de la précision des limites de détection, le tout avec des temps de détection réduits. Ces dispositifs, qui présentent une structure hautement organisée, peuvent être fabriqués avec des techniques microélectroniques et intégrés facilement dans des systèmes micro-fluidiques. Parmi les nombreuses architectures de capteurs proposées, celles basées sur le couplage guide-cavité ont démontré un potentiel considérable. La capacité de régler finement les paramètres des cavités à CP, tels que le facteur de qualité et la fréquence de résonance, permet un contrôle efficace du confinement de la lumière à l’intérieur de la cavité elle-même. La fréquence de résonance du mode optique qui en résulte est très sensible aux variations de l’indice de réfraction dans les trous d’air du cristal, ce qui rend la fréquence ou la longueur d’onde du mode d’intérêt très réactive à de faibles changements d’indice. L’objectif est ainsi de mesurer l’efficacité des cavités en tant que capteurs et d’explorer la détection de diverses substances, tout en maximisant la transmission d’information à travers le guide d’onde [18].

I.6 Technologies et Matériaux

Les cristaux photoniques sont des structures périodiques de matériaux diélectrique, semi-conducteurs ou métallico-diélectrique qui modifient la propagation des ondes électromagnétiques de la même manière qu'un potentiel périodique dans un cristal semi-conducteur affecte le déplacement des électrons en créant des bandes d'énergie autorisées et interdites. Ces structures permettent de contrôler la propagation de la lumière à l'échelle de la longueur d'onde [19]. De nombreuses structures à bandes interdites unidimensionnelles, bidimensionnelles et même tridimensionnelles [20]. Ces structures sont encore à un stade de développement technologique assez précoce, malgré les avancées réalisées dans ce secteur. La figure (I.13.c) présente un exemple de ce que l'on appelle une structure "tas de bois". Les méthodes de micro-fabrication dérivées de la microélectronique ne se prêtant pas aisément à ces applications, on privilégie plutôt des techniques d'auto-organisation colloïdale pour fabriquer des opales, comme illustré à la figure (I.13.d).

Les cristaux photoniques sont fabriqués à partir de divers matériaux selon les applications souhaitées. Le silicium et le nitrure de silicium sont couramment utilisés pour les dispositifs photoniques intégrés en raison de leurs excellentes propriétés optiques. La silice est populaire dans les fibres optiques pour ses propriétés de transparence, tandis que le gallium arséniure et d'autres semi-conducteurs III-V sont utilisés pour les lasers et les détecteurs optoélectroniques. Les polymères et les matériaux organiques offrent des options flexibles et à faible coût, idéales pour les capteurs et les dispositifs photoniques flexibles [19].

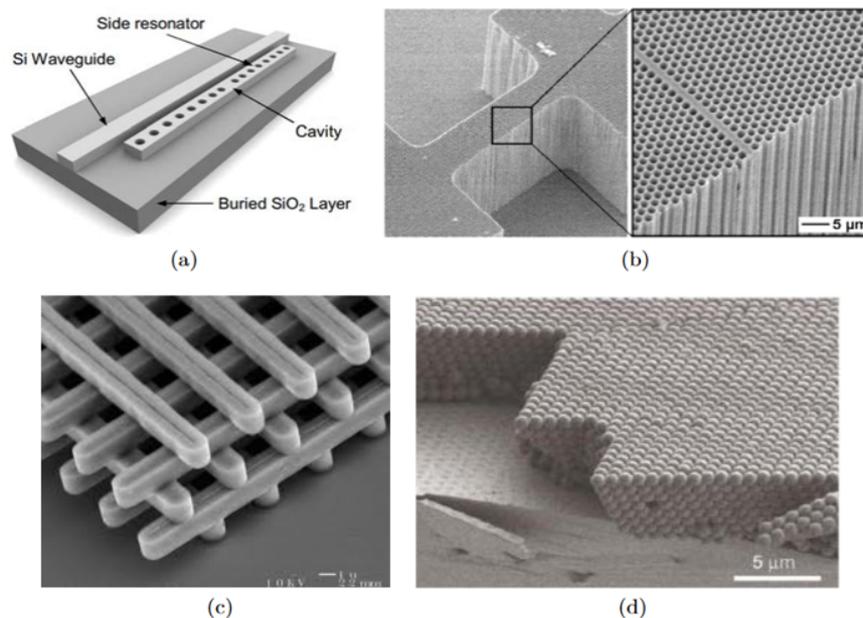


FIGURE I.13 – Exemples de réalisation de cristaux photoniques (a) Cavité à CP 1D (b) CP-2D infini (c) CP-3D ayant une structure « tas de bois » (d) CP-3D de type opale [20].

Les cristaux photoniques offrent la perspective de réaliser des dispositifs optiques ou électromagnétiques capables de stocker, filtrer et guider la lumière à l'échelle de la longueur d'onde.

I.7 Techniques de modélisation

Les principales techniques utilisées pour la modélisation des cristaux photoniques sont la décomposition en ondes planes (PWE) et la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD). Ces méthodes dérivent des approches standard en électromagnétisme et en physique de l'état solide, et sont largement utilisées pour décrire la propagation des ondes électromagnétiques dans ces structures.

I.7.1 Méthode des ondes planes (PWE)

Les méthodes d'expansion d'onde plane (Plane Wave Expansion en anglais PWE) et de décomposition en ondes planes sont des techniques avancées utilisées dans la modélisation des cristaux photoniques, qui sont des structures qui manipulent la lumière à l'échelle nanométrique. La PWE consiste à résoudre les équations de Maxwell en formulant le problème comme une valeur propre, ce qui permet d'analyser la structure de bande (relation de dispersion) des

cristaux photoniques spécifique [21].

Cette méthode est précise et permet de calculer les modes de propagation de la lumière sur des géométries inhomogènes ou périodiques. D'autre part, la méthode de décomposition en ondes planes est particulièrement utile pour étudier les propriétés dispersives des matériaux à bandes interdites photoniques. Elle permet de déterminer les diagrammes de bandes des cristaux photoniques parfaitement périodiques en analysant la fréquence, la polarisation, la symétrie et la distribution du champ électromagnétique pour les différents modes de la structure photonique. Ces techniques sont essentielles pour comprendre comment la lumière se propage et interagit avec la matière à l'échelle nanométrique, ce qui est crucial pour le développement de dispositifs optiques avancés [22],[23].

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

La méthode des différences finies dans le domaine temporel (Finite Difference Time Domain en anglais FDTD), est une méthode de résolution directe des équations de Maxwell dans le domaine temporel et dans les milieux isotropes avec les conditions limites, elle utilise l'outil numérique des différences finies par transformée de Fourier dans le temps [24].

Cette méthode présente l'avantage de permettre le calcul du champ électromagnétique se propageant dans les structures à cristaux photoniques. Elle offre également des renseignements sur de multiples autres variables, telles que le vecteur de Poynting ou l'énergie électromagnétique stockée, ce qui la rendant idéale pour des constructions nouvelles comportant divers types de défauts. De plus, elle permet de déterminer la valeur du champ électromagnétique en chaque point de la structure. Le principal inconvénient de la FDTD, bien que de moins en moins prononcé grâce aux progrès en puissance informatique, réside dans sa lenteur et sa consommation élevée de ressources informatiques [25]. Cependant, en raison du nombre élevé de calculs et des besoins importants en mémoire, cette méthode a besoin d'un ordinateur puissant pour exécuter les simulations.

I.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les concepts de base sur les cristaux photoniques. En commençant par une définition. Ensuite, nous avons introduit les caractéristiques des cristaux

photoniques unidimensionnels 1D, bidimensionnels 2D et tridimensionnels 3D. Nous avons également abordé les techniques de modélisation et les défauts d'un cristal photonique. Enfin, nous avons cité quelques exemples d'applications des cristaux photoniques.

Bibliographie

- [1] Feriel KIHÉLI et Karima DJEBRIT. Conception des diviseurs de puissance optique 1x2, 1x3 et 1x4 à base des cristaux photoniques. Mémoire de master. UNIVERSITÉ KASDI MERBAH OUARGLA, 2020.
- [2] Robert D. MEADE, Steven G. JOHNSON et Joshua N. WINN. **Photonic Crystals : Molding the Flow of Light**. Publisher Name, 2008.
- [3] Dallel BENELARBI. Étude de cristaux photoniques en silicium pour l'application à la biodétection. Thèse de doct. Thèse de Doctorat, Université de CONSTANTINE, 2018.
- [4] Rahima BENDJELLOUL. Étude du couplage dans les guides d'onde à cristaux photoniques. Mémoire de Magister. Université Mentouri Constantine, 2009.
- [5] 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 doct. thèse de Doctorat, Université de frères Mentouri, Constantine, 2017.
- [6] Benoit LOMBARDET. **Etude et réalisation de cristaux photoniques pour l'optique intégrée**. Rapp. tech. EPFL, 2005.
- [7] Abri Badaoui HADJIRA. Etude et conception des microcomposants a base des cristaux photoniques bidimensionnels. Thèse de doctorat. Université de Tlemcen, 2012.
- [8] A. AMIROUCHE. Contribution à l'étude des microcavités à base des cristaux photoniques. Thèse de doctorat. Université Mohamed Seddik Ben Yahya– Jijel, 2017.
- [9] Edmond CHOW et al. Three-dimensional control of light in a two-dimensional photonic crystal slab. In : Nature 407.6807 (2000), p. 983-986.
- [10] A. DEKHIRA. Etude théorique et simulation des cristaux photoniques et leurs applications en chimie et biochimie. Thèse de doctorat. Université de l'USTHB, 2011.
- [11] Shawn-yu LIN et al. A three-dimensional photonic crystal operating at infrared wavelengths. In : Nature 394.6690 (1998), p. 251-253.
- [12] X LETARTRE et al. Group velocity and propagation losses measurement in a single-line photonic-crystal waveguide on InP membranes. In : Applied physics letters 79.15 (2001), p. 2312-2314.

- [13] C JAMOIS et al. Silicon-based two-dimensional photonic crystal waveguides. Thèse de doct. 2003.
- [14] Quentin ROLLAND. Couplages acousto-optiques dans les cristaux photoniques et phononiques. Thèse de doct. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, 2013.
- [15] JC KNIGHT et al. Large mode area photonic crystal fibre. In : Electronics Letters 34.13 (1998), p. 1347-1348.
- [16] Pablo SANCHIS et al. Analysis of butt coupling in photonic crystals. In : IEEE Journal 40.5 (2004), p. 541-550.
- [17] J CANNING et al. Wavelength dependent leakage in a Fresnel-based air-silica structured optical fibre. In : Optics communications 205.1-3 (2002), p. 95-99.
- [18] Nicolas GAIGNEBET. Réalisation et caractérisation de puces de capteurs à cristaux photoniques : Vers un dispositif de biodétection intégré. Thèse de doct. Université de Lyon, 2020.
- [19] Candice BLIN. Développement de cristaux photoniques en diamant : modélisation, technologie et application à la biodétection. Thèse de doct. Paris 6, 2015.
- [20] Yurii A VLASOV et al. On-chip natural assembly of silicon photonic bandgap crystals. In : Nature 414.6861 (2001), p. 289-293.
- [21] LAALA F. SID B. Conception des filtres à base des cristaux photonique. Mémoire de master. Université Kasdi Mervah Ouargla, 2018.
- [22] Yassine BENACHOUR. Optimisation de cristaux photoniques pour l'optique non linéaire. Thèse de doct. Université Paris Sud-Paris XI, 2008.
- [23] Mirouh F. Modelisation de l'influence des parametres physiques et geometriques dans des structures periodiques. Thèse de doctorat. Université Frères Mentouri-Constantine, 2020.
- [24] KH. BENDEMAGH. Etude de dimensionnement d'un coupleur à base de cristaux photoniques destiné aux systèmes de communications. Thèse de doctorat. université Ferhat Abbas- setif, 2019.
- [25] Hitomichi TAKANO et al. Highly efficient multi-channel drop filter in a two-dimensional hetero photonic crystal. In : Optics express 14.8 (2006), p. 3491-3496.

Chapitre II

Filtres optiques à Cristaux photoniques

II.1 Introduction

Les filtres optiques jouent un rôle crucial dans les systèmes de télécommunications modernes, permettant la sélection et la manipulation de longueurs d'onde spécifiques sans affecter les autres canaux. Avec le développement des technologies de multiplexage en longueur d'onde Wavelength Division Multiplexing (WDM), il est devenu essentiel d'avoir des filtres compacts et performants pour les circuits photoniques intégrés.

Traditionnellement, les filtres optiques sont relativement grands. Cependant, les progrès en cristaux photoniques ont permis de créer des filtres beaucoup plus petits, à l'échelle micrométrique. En introduisant des défauts dans un cristal photonique, on peut créer des états permis dans la bande interdite, permettant un contrôle précis de la lumière. Les cavités photoniques, avec leurs facteurs de qualité élevés, sont particulièrement efficaces pour contrôler l'émission de la lumière et créer des sources de photons uniques. Ces filtres sont également prometteurs pour des applications de détection grâce à leur fort confinement optique. Malgré leur potentiel, il reste des défis en termes de performance et d'intégration avant leur commercialisation.

II.2 Filtre optique

Ce dispositif permet de sélectionner une longueur d'onde précise dans un flux de données sans affecter les autres canaux. Les chercheurs s'y intéressent particulièrement en raison de la demande croissante pour des sélecteurs de canaux dans les systèmes WDM. Les filtres traditionnels, mesurant plusieurs centimètres ou millimètres, ne conviennent pas aux circuits photoniques intégrés, contrairement aux filtres basés sur les cristaux photoniques, qui peuvent

être réduits à la taille d'un micromètre [1], [2].

II.3 Types de filtres optiques

Dans cette section, nous allons explorer quelques types de filtres optiques, parmi lesquels nous pouvons mentionner : les filtres à guide d'ondes [3], filtre à résonateur en anneau [4] et les filtres à cavités à cristaux photoniques [5], [6].

II.3.1 Filtres à guide d'ondes

Les filtres à guide d'ondes sont des composants optiques couramment utilisés pour filtrer les signaux en fonction de leur longueur d'onde. Ils exploitent les propriétés fascinantes de propagation des ondes lumineuses dans des guides optiques pour sélectionner et transmettre des longueurs d'onde spécifiques tout en rejetant les autres, ce qui en fait des éléments essentiels dans de nombreuses applications optiques. Par exemple, ils sont largement utilisés dans les systèmes de télécommunications pour séparer différents canaux de communication basés sur leur couleur, contribuant ainsi à une transmission de données efficace et rapide.

Cependant, malgré leur utilité, les filtres à guide d'ondes peuvent souffrir de pertes de propagation, notamment sur de longues distances. Ces pertes peuvent entraîner une diminution de l'intensité du signal optique transmis, ce qui peut être problématique dans certains systèmes nécessitant une transmission fiable sur de longues distances. De plus, les effets de dispersion peuvent également poser des défis, car ils peuvent causer des distorsions temporelles ou spatiales dans le signal optique, affectant ainsi sa qualité et sa lisibilité à l'autre extrémité du système optique.

Néanmoins, malgré ces limitations, les filtres à guide d'ondes restent des composants essentiels et largement utilisés dans de nombreux domaines de l'optique, contribuant de manière significative aux avancées technologiques dans les communications, la spectroscopie, la détection optique et d'autres applications importantes [3].

II.3.2 Filtres à résonateur en anneau à cristaux photoniques

Les filtres à résonateur en anneau à cristaux photoniques sont des dispositifs avancés qui combinent des concepts d'optique et de nanotechnologie. Ils reposent sur le principe de la résonance optique, capturant et amplifiant la lumière dans un anneau de matériau périodique, connu sous le nom de cristal photonique. La périodicité de ce cristal génère des interférences constructives et destructives, ce qui produit des bandes spécifiques de transmission et d'atténuation en fonction des longueurs d'onde. Cette caractéristique permet à ces filtres de sélectionner avec précision certaines longueurs d'onde tout en bloquant d'autres, offrant ainsi une sélectivité spectrale et un contrôle sur les bandes passantes et de rejet. Comme illustré dans la figure II.1, nous retrouvons divers types de résonateurs en anneaux à cristaux photoniques : (a) un anneau quasi-carré dans un réseau carré, (b) un anneau hexagonal dans un réseau triangulaire, et (c) un anneau circulaire dans un quasi-cristal photonique [4].

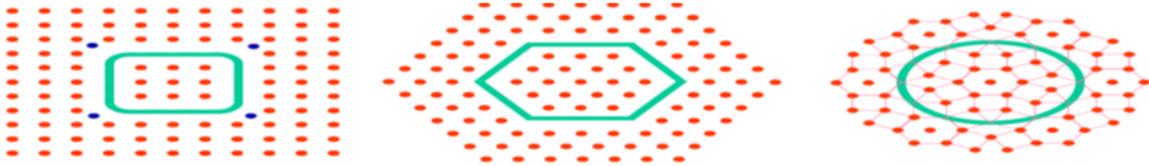


FIGURE II.1 – Résonateurs en anneaux à cristaux photoniques : (a) un anneau quasi-carré dans un réseau carré, (b) un anneau hexagonal dans un réseau triangulaire, (c) un anneau circulaire dans un quasi-cristal photonique [4].

Ces dispositifs sont particulièrement attrayants grâce à leurs caractéristiques essentielles. Ils présentent une faible perte d'insertion, assurant une transmission efficace de la lumière filtrée et minimisant les pertes de signal. Leur conception compacte permet une intégration dense dans des systèmes optiques, essentielle pour des applications nécessitant des dispositifs miniaturisés et une intégration à grande échelle.

Dans les communications optiques, ces filtres sont utilisés pour le multiplexage et le démultiplexage des signaux à différentes longueurs d'onde, facilitant le transfert de données à haute vitesse sur des fibres optiques. Ils sont également utilisés dans les capteurs optiques pour la détection sélective de substances ou de propriétés physiques en fonction de la longueur d'onde, permettant des capteurs de haute précision et sensibilité. Malgré leurs performances avancées, ces filtres présentent des défis techniques, notamment leur sensibilité aux variations de tem-

pérature et aux imperfections de fabrication. La recherche continue d'améliorer la stabilité et l'efficacité de ces dispositifs tout en étendant leur utilisation dans divers domaines de l'optique et de la photonique [4].

II.3.3 Filtres à cavités à cristaux photoniques

Les filtres à cavités à cristaux photoniques représentent une avancée majeure dans le domaine de l'optique en exploitant les propriétés uniques des cristaux photoniques. Leur conception basée sur une structure cristalline périodique permet une manipulation précise des longueurs d'onde de la lumière. Grâce à leur capacité à créer des bandes passantes étroites et à bloquer sélectivement certaines longueurs d'onde, ces filtres offrent un contrôle spectral hautement sélectif. De plus, leur largeur de bande ajustable permet une adaptation flexible aux besoins spécifiques des applications optiques. La faible perte d'insertion associée à ces filtres garantit une transmission efficace de la lumière, préservant ainsi la qualité du signal optique. Leur compatibilité avec d'autres composants optiques en fait des éléments clés dans la conception de systèmes optiques complexes. En outre, leur potentiel de stabilité thermique ajoute une fiabilité supplémentaire, en particulier dans des environnements sensibles aux variations de température. Ces caractéristiques combinées font des filtres à cavités à cristaux photoniques des outils polyvalents et indispensables pour de nombreuses applications optiques avancées [5],[6].

Après avoir mentionné quelques types de filtres existants dans la littérature et analysé les inconvénients de leur utilisation, nous avons décidé d'opter pour les filtres à cavités à cristaux photoniques. Ce choix est motivé par leurs propriétés spécifiques qui correspondent parfaitement à nos besoins, notamment en termes de sélectivité spectrale et de compatibilité avec notre infrastructure existante. Nous avons constaté que les filtres à cavités à cristaux photoniques offrent une sélectivité spectrale supérieure et une meilleure compatibilité, ce qui assure une intégration harmonieuse et des performances optimales dans notre système de communication optique.

II.4 Caractéristiques de la cavité

Pour confiner le champ dans un espace très réduit, nous pouvons ajouter des défauts dans le réseau pour briser sa périodicité. Cela crée des niveaux d'énergie supplémentaires. Les

modes photoniques générés concentrent leur énergie dans les zones de défauts s'ils sont dans la bande interdite. Le cristal environnant agit comme un miroir, réfléchissant la lumière. La performance d'un résonateur dépend du facteur de qualité (Q), qui caractérise la finesse de la résonance. Les cavités à cristaux photoniques, qui confinent fortement la lumière, peuvent avoir de nombreuses applications si leur facteur de qualité est élevé.

II.4.1 Facteur de qualité

Le facteur de qualité (Q) mesure le temps pendant lequel l'énergie reste confinée dans un résonateur. Il est proportionnel à la durée de vie des photons dans le résonateur (τ) [7]. Il est exprimé par la relation suivante :

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

où ω_r est la pulsation.

Une autre manière de quantifier le facteur de qualité (Figure II.2) consiste à utiliser le rapport entre la longueur d'onde centrale de résonance (λ_r) et la largeur à mi-hauteur ($\Delta\lambda$), également connue sous le nom de FWHM (Full Width at Half Maximum). Pour une résonance de forme lorentzienne, cela s'exprime par la relation suivante [7] :

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

Le facteur de qualité diminue lorsque $\Delta\lambda$ augmente. En d'autres termes, des résonances étroites dans le domaine fréquentiel indiquent des résonateurs avec peu de pertes.

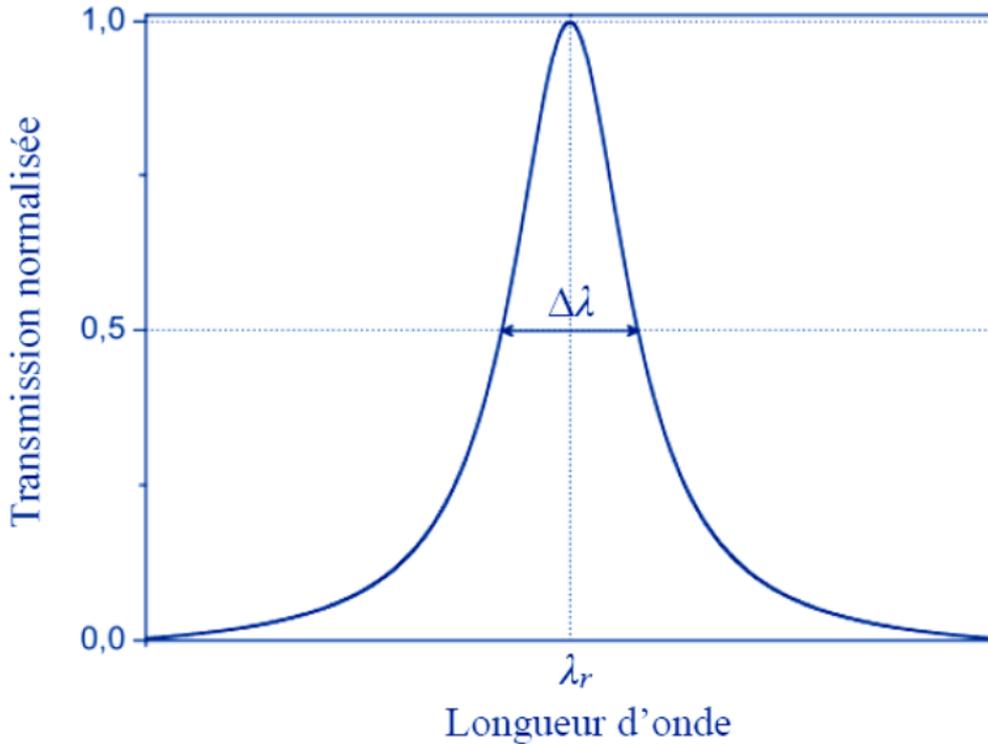


FIGURE II.2 – Réponse spectrale d'une cavité [7].

II.4.2 Types des cavités

Il existe divers types de cavités, différenciés par la forme du réseau (triangulaire ou carré) et la nature des défauts (comme l'omission d'une ou plusieurs tiges, ou la variation du rayon ou de l'indice). Voici quelques exemples de ces cavités :

II.4.2.1 Cavité hexagonale

Dans un cristal triangulaire, les cavités hexagonales, où les côtés sont formés par des rangées denses, constituent une série de cavités canoniques. Il est pratique de les nommer selon le nombre de périodes le long de chaque côté : un trou manquant correspond à H_1 , sept trous manquants à H_2 , etc. (Figure II.3) [8]. Les cavités de type H_n , de forme hexagonale, avec n représentant le nombre de rangées manquantes par côté, sont les plus étudiées [9] :

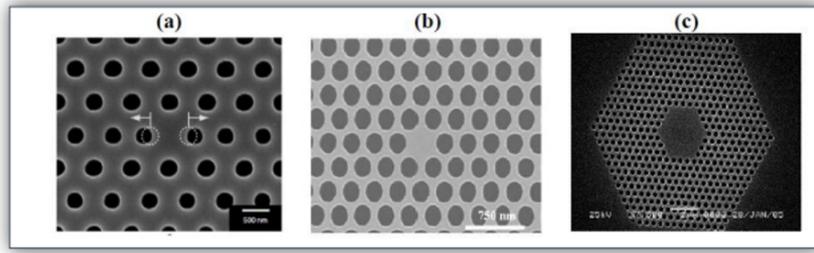


FIGURE II.3 – Exemples de cavités de types H_n : (a) cavité H_0 , (b) cavité H_1 , (c) cavité H_4 [9].

II.4.2.2 Cavités linéiques

Les cavités L_n sont linéaires et se forment en omettant n trous alignés sur la même rangée dans la direction ΓK . La figure II.4 montre quelques exemples de cavités L_n dans des cristaux photoniques 2D, notamment les cavités L_3 , L_5 et L_7 .

Les cavités de type L_3 ont des modes dont les facteurs de qualité ne dépassent généralement pas quelques milliers. Cependant, il est possible d'obtenir des facteurs de qualité élevés avec ce type de cavités, surtout depuis les travaux d'Akabane et al. [10], qui ont démontré l'importance d'un confinement progressif de la lumière en optimisant la position des trous aux extrémités de la cavité. Grâce à cette optimisation, ils ont exploré les cavités linéaires modifiées, permettant de multiplier par neuf le facteur de qualité par rapport aux cavités linéaires simples (45 000 contre 5 000) [11].

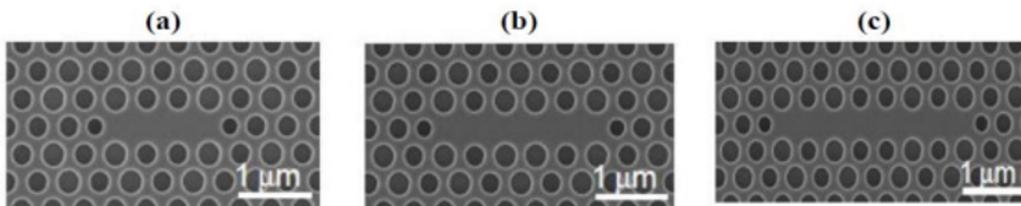


FIGURE II.4 – Exemples de cavités de types L_n : (a) cavité L_3 , (b) cavité L_5 , (c) cavité L_7 [11].

II.5 Topologies de filtres à base de cavités résonantes

II.5.1 Première configuration

En 2018, Absalan [12] a proposé un filtre d'extraction utilisant un cristal photonique bi-dimensionnel (voir la Figure II.5). Ce filtre intègre deux guides d'onde et une cavité linéaire. Les guides d'entrée et de sortie sont formés en supprimant des motifs dans les directions horizontale et verticale respectivement. La cavité est créée en réduisant le diamètre de deux tiges dans la structure. Selon le spectre de transmission, cette configuration atteint une efficacité d'extraction de 95 % avec un facteur de qualité de 788 à la longueur d'onde de $1577nm$.

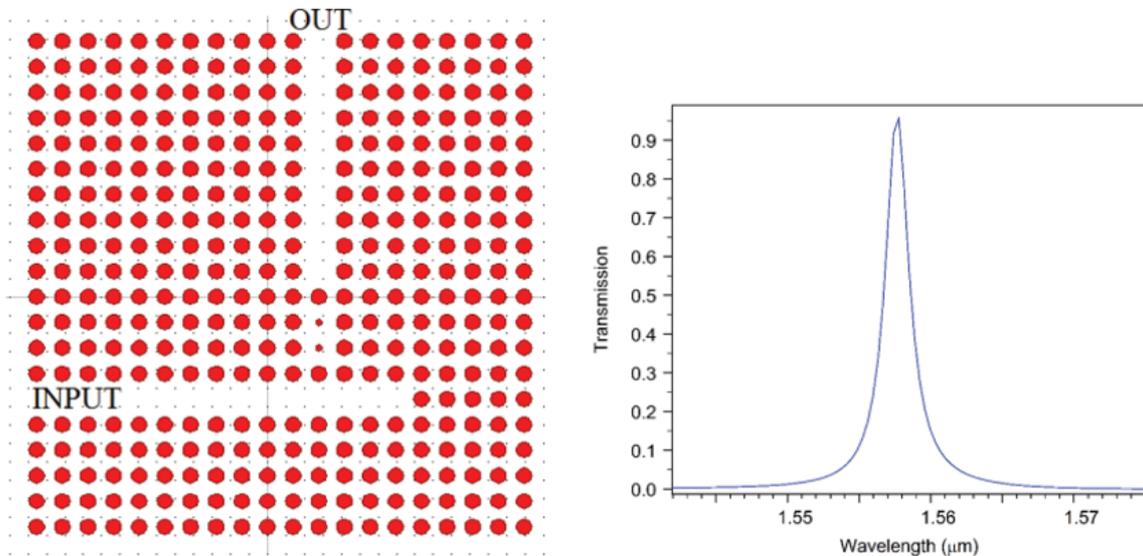


FIGURE II.5 – Représentation schématique du filtre proposé par [12] et son spectre de transmission

II.5.2 Deuxième configuration

En 2013, Hamed Alipour-Banaei et al.[13] ont proposé une nouvelle technique de filtrage optique basée sur des cristaux photoniques bidimensionnels intégrant des cavités résonantes. Ce type de filtre est particulièrement adaptées aux applications de communication par multiplexage en longueur d'onde (WDM) et multiplexage en longueur d'onde dense (DWDM). Leur approche consiste à manipuler des défauts structuraux agissant comme des cavités résonantes. En modifiant des paramètres tels que le rayon de ces défauts et leur position, ils ont pu concevoir un filtre optique compact adapté aux circuits optiques intégrés. La figure II.6

représente la structure schématique et le spectre de transmission du filtre proposé. Selon le spectre de transmission, cette configuration présente une longueur d'onde centrale de 1567nm et un facteur de qualité de 2238.

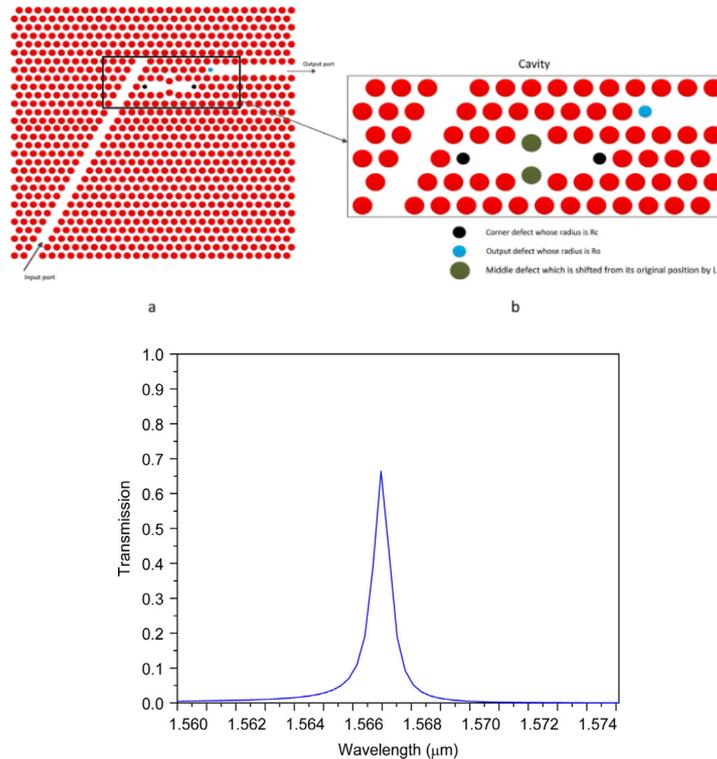


FIGURE II.6 – Représentation schématique du filtre proposé par [13] et son spectre de transmission

II.5.3 Troisième configuration

En 2009, Rostami et al. [14] ont développé un dispositif de filtrage ultracompact adapté à la fenêtre de communication optique (voir la Figure II.7). Ce dispositif utilise un cristal photonique bidimensionnel, avec des trous d'air gravés dans un matériau ayant un indice de réfraction de 2,89, ainsi qu'un résonateur obtenu en modifiant les rayons de certains trous (R_0 , R_1 et R_3). Leurs simulations ont prouvé qu'il est possible de créer un filtre ajustable en modifiant les rayons des trous situés dans le résonateur. Selon le spectre de transmission, cette configuration présente une longueur d'onde centrale de 1581nm et un facteur de qualité de 2635.

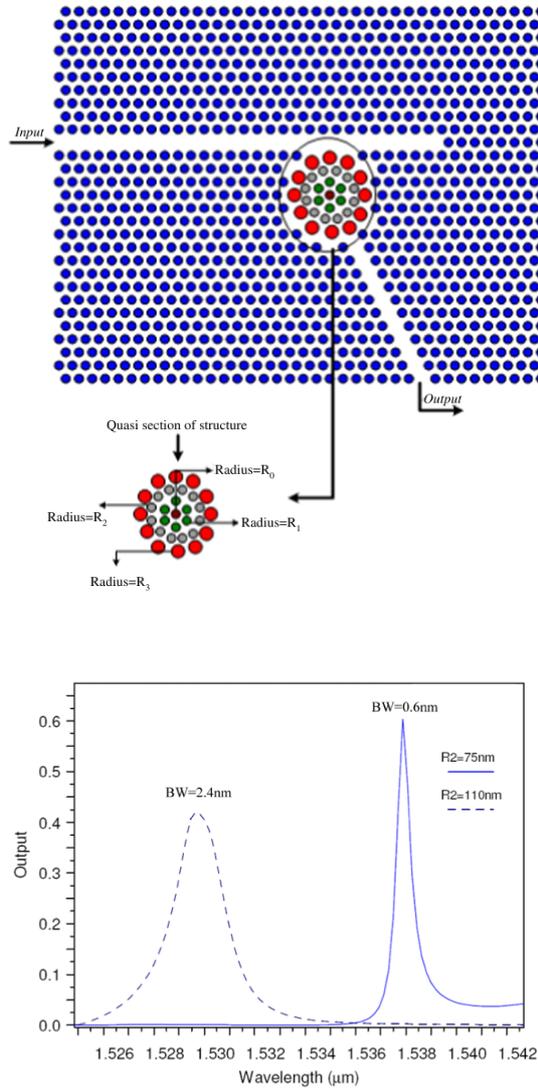


FIGURE II.7 – Représentation schématique du filtre proposé par [14] et son spectre de transmission.

II.6 Démultiplexeurs à base de cristaux photoniques

Les cristaux photoniques peuvent accomplir de nombreuses fonctions optiques adaptées aux réseaux actuels, comme les guides d'onde, les diviseurs de puissance, les filtres, les coupleurs et les démultiplexeurs. Leur utilisation permet de miniaturiser les composants d'optique intégrée et d'améliorer leurs performances.

Au fil des années, l'augmentation du volume de données échangées dans les systèmes de télécommunications optiques a entraîné la création de réseaux à très haut débit. Pour les rendre plus compacts, il faut intégrer de plus en plus de composants dans un espace réduit.

Ces composants doivent gérer davantage d'informations et à des vitesses de transfert plus élevées. Un dispositif de démultiplexage est crucial dans cette chaîne, car il permet d'extraire différentes longueurs d'onde distinctes d'un flux de données. Par exemple, si un signal optique contient les longueurs d'onde $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_i$, il peut être divisé en une série de signaux de sortie (n) pour extraire la longueur d'onde λ_n . La figure II.8 illustre ce principe avec un exemple de démultiplexeur à 8 canaux de sortie.

Le démultiplexage en longueur d'onde WDM facilite le traitement direct des signaux optiques, car chaque utilisateur dispose d'une bande passante fréquentielle qui lui est attribuée. Les composants utilisés avec le WDM fonctionnent généralement autour de $1.55 \mu\text{m}$ pour rester compatibles avec la fenêtre de faible atténuation des fibres optiques [15].

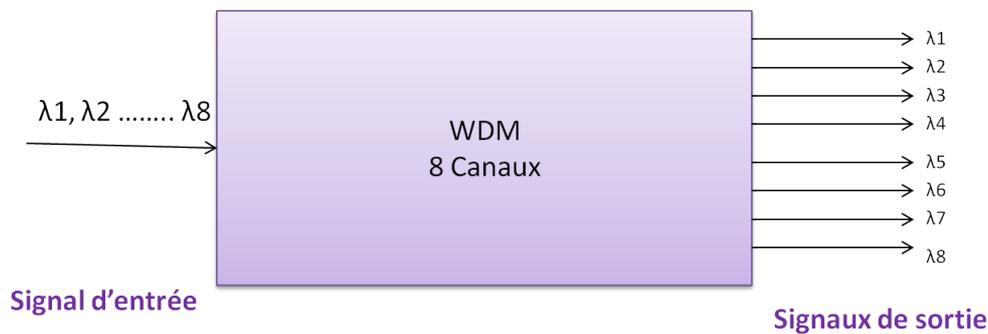


FIGURE II.8 – Démultiplexeur à 8 canaux.

II.7 Quelques Topologies

Plusieurs configurations de démultiplexeurs, qui utilisent des cavités résonantes, ont été proposées dans la littérature en se basant sur différents types de cavités. Dans le paragraphe suivant, nous allons présenter quelques-unes de ces topologies.

II.7.1 Première topologie

En 2018, Absalan [12] a utilisé le filtre mentionné précédemment pour développer un démultiplexeur à quatre canaux. La structure schématique de ce démultiplexeur est illustrée dans la Figure II.9. Il comprend un guide d'onde d'entrée et quatre cavités résonantes, chacune étant formée en choisissant des rayons différents pour les défauts de dimensions réduites, ce qui permet d'obtenir quatre longueurs d'onde distinctes. Les simulations ont montré que cette structure peut séparer les longueurs d'onde $\lambda_1 = 1,537 \mu\text{m}$, $\lambda_2 = 1,546 \mu\text{m}$, $\lambda_3 = 1,553$

μm et $\lambda_4 = 1,560 \mu\text{m}$ avec des efficacités de transmission supérieures à 85 % et des niveaux de diaphonie entre -18 dB et -3 dB.

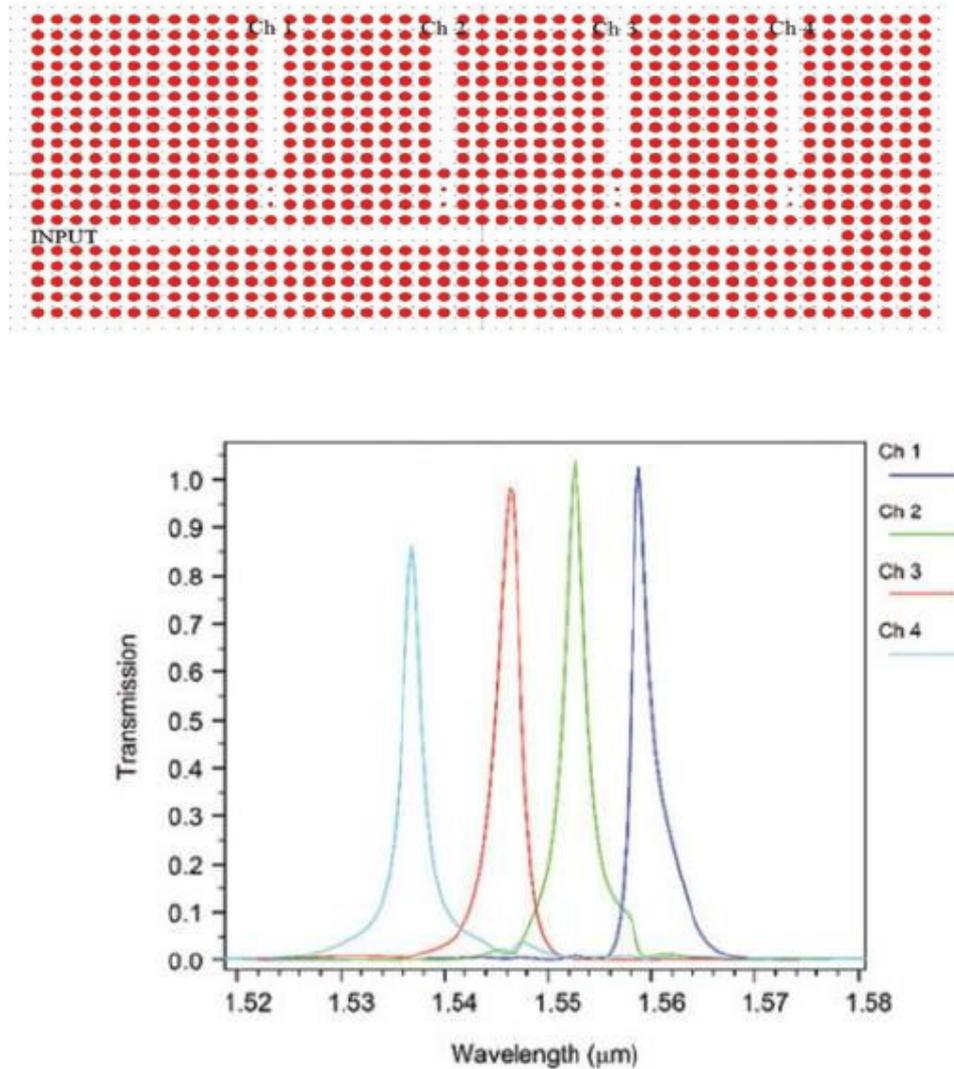


FIGURE II.9 – Structure schématique du démultiplexeur proposé par [12].

II.7.2 Deuxième topologie

En 2016, zadeh et al. [16] ont développé une nouvelle structure de démultiplexeur huit canaux. Ce démultiplexeur utilise des cavités linéiques créées en réduisant le rayon de trois motifs spécifiques, comme présenté dans la Figure II.10. Chaque canal de sortie est sélectionné en ajustant les rayons de ces motifs, permettant ainsi de choisir les longueurs d'onde de sortie pour chaque canal.

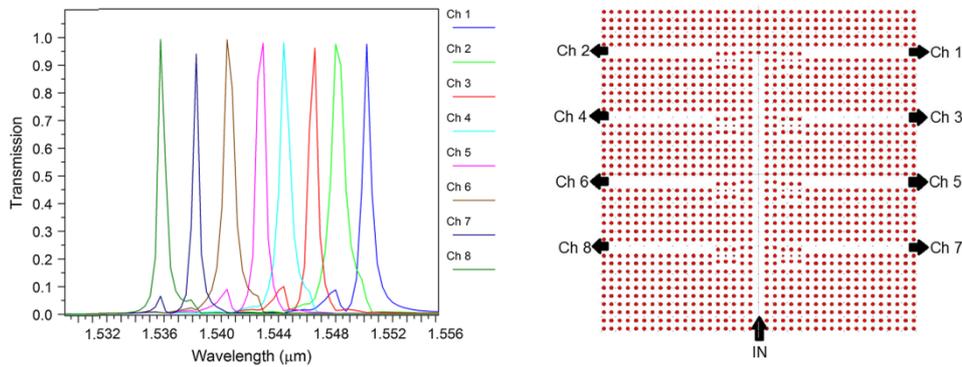


FIGURE II.10 – Structure schématique du démultiplexeur proposé par et zadeh al.[16].

II.7.3 Troisième topologie

En 2014, Bouamami et al. [17] ont introduit un démultiplexeur à sept canaux en forme de Y utilisant un cristal photonique bidimensionnel avec un réseau carré, comme illustré dans la Figure II.11. Ce dispositif permet de séparer efficacement sept longueurs d'onde différentes en ajustant le rayon du défaut de chaque cavité du cristal photonique. Par rapport aux démultiplexeurs traditionnels basés sur des cavités résonantes, cette structure se distingue par sa dimension compacte. Les chercheurs ont démontré expérimentalement la capacité du démultiplexeur à séparer avec succès les sept longueurs d'onde suivantes : $1.345 \mu\text{m}$, $1.472 \mu\text{m}$, $1.425 \mu\text{m}$, $1.555 \mu\text{m}$, $1.411 \mu\text{m}$, $1.639 \mu\text{m}$, et $1.398 \mu\text{m}$. Ces résultats soulignent la faisabilité et l'efficacité de cette approche pour la manipulation précise des signaux lumineux à différentes longueurs d'onde dans des applications optiques.

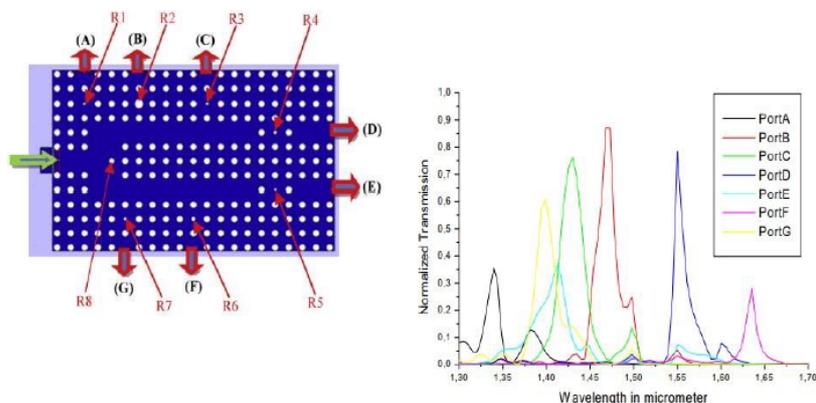


FIGURE II.11 – Structure schématique du démultiplexeur proposé par Bouamami et al. [17].

II.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré les configurations de filtres optiques basés sur les cristaux photoniques, leurs principes de fonctionnement, leurs caractéristiques et leurs applications, en mettant l'accent sur les démultiplexeurs optiques et les innovations récentes dans ce domaine. Nous avons également discuté du facteur de qualité et de la transmission, qui sont des aspects cruciaux pour évaluer la performance des cavités résonantes utilisées dans ces dispositifs. De plus, nous avons abordé la méthode de calcul du facteur de qualité, un paramètre essentiel pour mesurer la capacité d'un résonateur à confiner l'énergie lumineuse. Nous avons présenté les travaux précédents de divers chercheurs, mettant en lumière les différentes topologies de filtres et de démultiplexeurs développées. Ces études fournissent des exemples concrets des avancées réalisées dans ce domaine.

Bibliographie

- [1] M PLIHAL et AA MARADUDIN. Photonic band structure of two-dimensional systems : The triangular lattice. In : Physical Review B 44.16 (1991), p. 8565.
- [2] Ahmed SHARKAWY et al. Electro-optical switching using coupled photonic crystal waveguides. In : Optics Express 10.20 (2002), p. 1048-1059.
- [3] M. A. POPOVIC. Guided-wave devices and circuits. In : Springer Science and Business Media (1991).
- [4] Zexuan QIANG, Weidong ZHOU et Richard A SOREF. Optical add-drop filters based on photonic crystal ring resonators. In : Optics express 15.4 (2007), p. 1823-1831.
- [5] Masaya NOTOMI. Manipulating light with strongly modulated photonic crystals. In : Reports on Progress in Physics 73.9 (2010), p. 096501.
- [6] John D JOANNOPOULOS, RD MEADE et Joshua N WINN. Photonic crystals. In : Molding the flow of light (1995).
- [7] Laura GHISA. Couplage de micro résonateurs. Applications aux fonctions optiques de traitement du signal. Thèse de doct. Université Rennes 1, 2008.
- [8] Jean-Michel GÉRARD et al. **Les cristaux photoniques : ou la lumière en cage.** Hermès science publ., 2003.
- [9] J AMET et al. The superprism effect in lithium niobate photonic crystals for ultra-fast, ultra-compact electro-optical switching. Thèse de doct. 2008.
- [10] Stenfan PROROK. Nanophotonics and integrated optics : Photonic crystal cavities. In : White Paper (2013).
- [11] Marc ZELSMANN. Cristaux photoniques en silicium sur isolant pour le guidage, le filtrage, l'émission et l'extraction de lumière. Thèse de doct. Université Joseph-Fourier-Grenoble I, 2003.
- [12] Hassan ABSALAN. A four-channel optical demultiplexer using photonic crystal-based resonant cavities. In : Journal of Optical Communications 39.4 (2018), p. 369-373.
- [13] Hamed ALIPOUR-BANAEI et Farhad MEHDIZADEH. Significant role of photonic crystal resonant cavities in WDM and DWDM communication tunable filters. In : Optik-International Journal for Light and Electron Optics 124.17 (2013), p. 2639-2644.

- [14] A ROSTAMI et al. Proposal for an ultracompact tunable wavelength-division-multiplexing optical filter based on quasi-2D photonic crystals. In : Journal of Optics 12.1 (2009), p. 015405.
- [15] Nobuhiko SUSA. Large absolute and polarization-independent photonic band gaps for various lattice structures and rod shapes. In : Journal of Applied Physics 91.6 (2002), p. 3501-3510.
- [16] Farhad MEHDIZADEH et Mohammad SOROOSH. A new proposal for eight-channel optical demultiplexer based on photonic crystal resonant cavities. In : Photonic Network Communications 31.1 (2016), p. 65-70.
- [17] S BOUAMAMI et R NAOUM. New version of seven wavelengths demultiplexer based on the microcavities in a two-dimensional photonic crystal. In : Optik 125.23 (2014), p. 7072-7074.

Chapitre III

Résultats et interprétations

III.1 Introduction

Ce chapitre examine l'utilisation des cristaux photoniques bidimensionnels (PCs-2D) pour la conception des filtres, en s'appuyant sur des logiciels de simulation avancés tels que BandSOLVE et FullWAVE [1]. Les filtres sont basés sur le couplage entre guides d'onde et cavités résonantes. L'accent est mis sur l'optimisation des propriétés optiques en fonction des paramètres structurels, comme la taille et la disposition des tiges diélectriques situées aux bords des cavités. Les résultats des simulations démontrent l'importance de ces outils pour la conception de dispositifs photoniques avancés.

III.2 Présentation du logiciel

RSoft CAD [1] est un programme de base de RSoft photonique. Il comprend plusieurs modules intégrés, tels que BeamPROP, BandSOLVE, FullWAVE, GratingMOD et DiffractMOD. La fenêtre du programme RSoft CAD contient une barre de menus, une barre d'outils avec des icônes et une barre d'état comme le montre la Figure III.1. Ces logiciels sont utilisés pour concevoir, optimiser et simuler des dispositifs et des structures optiques à l'échelle nanométrique.

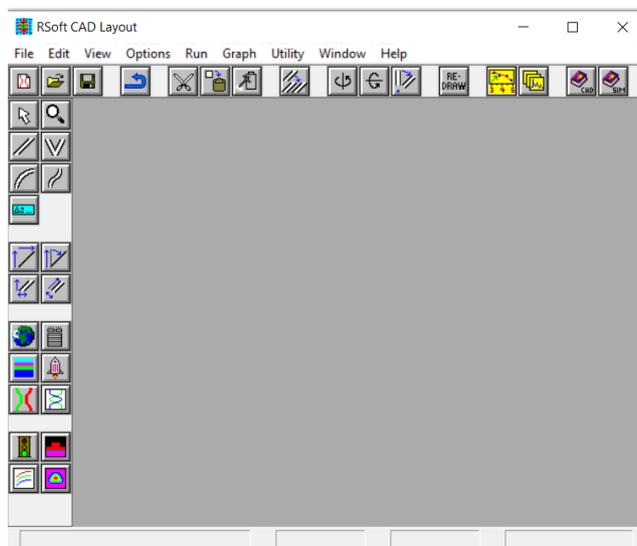


FIGURE III.1 – Fenêtre du programme RSoft CAD.

III.2.1 Simulateur BandSOLVE

BandSOLVE est un outil de simulation qui permet d'analyser des structures photoniques avec des bandes interdites. Il utilise la méthode des ondes planes pour calculer ces bandes interdites dans des structures périodiques. BandSOLVE est particulièrement utile pour optimiser les propriétés des cristaux photoniques. La fenêtre des paramètres de simulation de BandSOLVE est représentée sur Figure III.2.

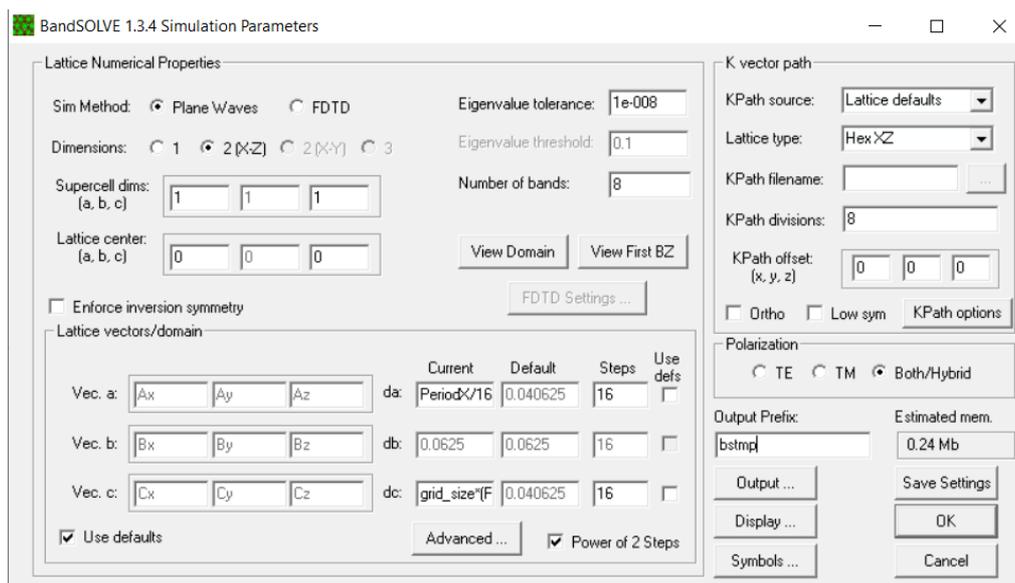


FIGURE III.2 – Fenêtre principale de BandSOLVE.

III.2.2 Simulateur FullWAVE

L'objectif de FullWAVE est de proposer une série de simulations permettant de calculer la propagation de la lumière dans des structures photoniques. Cette simulation repose sur la méthode FDTD. La méthode FDTD permet de résoudre directement les équations de Maxwell dans le domaine temporel en utilisant les différences finies. Elle permet de déterminer simultanément les réponses en champs TE et TM, et de générer des cartographies du champ électromagnétique en tout point et à tout moment. En analysant l'évolution du champ dans le temps, on peut également obtenir des informations sur la réponse spectrale de la structure. La figure III.3 montre l'interface principale des paramètres de simulation de FullWAVE.

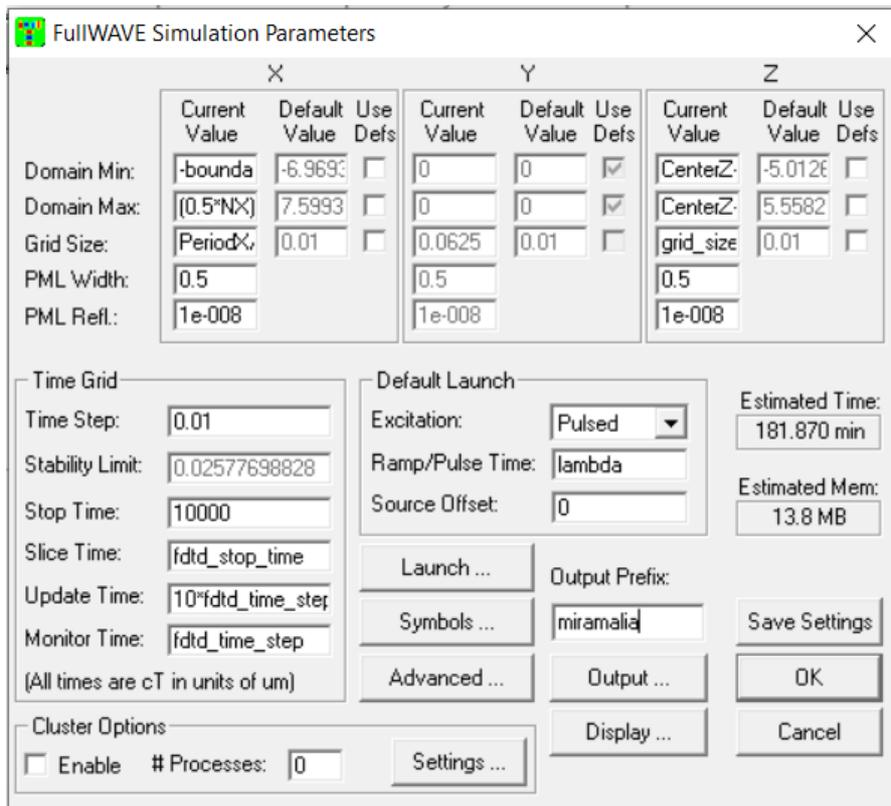


FIGURE III.3 – Fenêtre principale de FullWAVE.

III.3 Structure d'étude

Différents groupes de recherche ont déjà analysés plusieurs structures, telles que le réseau carré [2] et [3], le réseau triangulaire [4]. Dans notre étude, nous avons choisi d'utiliser un cristal photonique bidimensionnel, composé de tiges diélectriques en silicium ($n = 3.46$) réparties selon un réseau triangulaire et plongées dans l'air ($n_{\text{air}} = 1$). Le rayon de ces tiges est égale à

$r = 0.2a$, et la période a est de 650 nm (où a est la distance entre les centres de deux motifs adjacents).

Le silicium a été sélectionné en raison de ses propriétés avantageuses en photonique. Sa capacité à présenter un indice de réfraction élevé et à être transparent aux longueurs d'onde utilisées en communication permet la réalisation de résonateurs et de guides d'ondes avec un fort confinement du champ électromagnétique. En outre, la technologie du silicium est bien développée et compatible avec les techniques de microélectronique. Le schéma de la structure est reporté sur la Figure III.4.

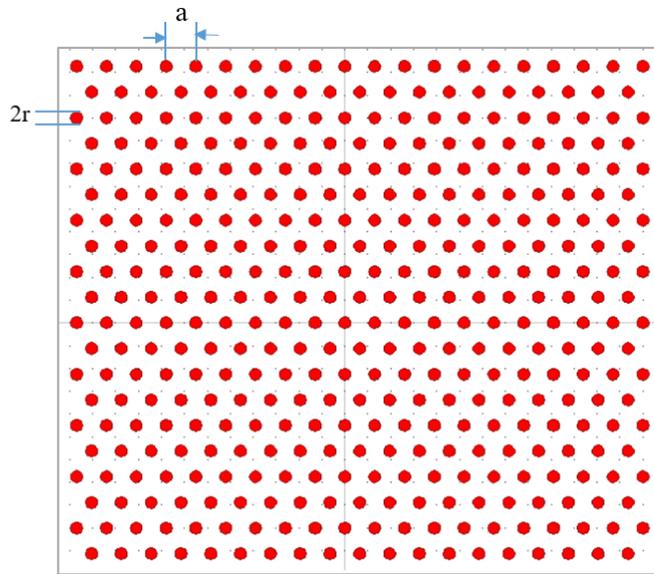


FIGURE III.4 – Structure sans défauts.

Un cristal photonique est typiquement caractérisé par son diagramme de bandes. La Figure III.5 montre le diagramme de bandes de la structure analysée, obtenu à l'aide du logiciel BandSOLVE de RSoft, qui utilise la méthode des ondes planes (PWE). Ce calcul nous permet d'identifier les bandes interdites photoniques (BIPs) du cristal. Nous observons une bande interdite photonique pour la polarisation TM, qui apparaît pour des fréquences normalisées entre $0.276 < \frac{\omega}{c} < 0.446$, ce qui correspond à des longueurs d'onde comprises entre $1.45 \mu\text{m} < \lambda < 2.355 \mu\text{m}$. Ainsi, une onde électromagnétique incidente, perpendiculaire au réseau des tiges, sera réfléchiée si sa fréquence se trouve dans cet intervalle spectral.

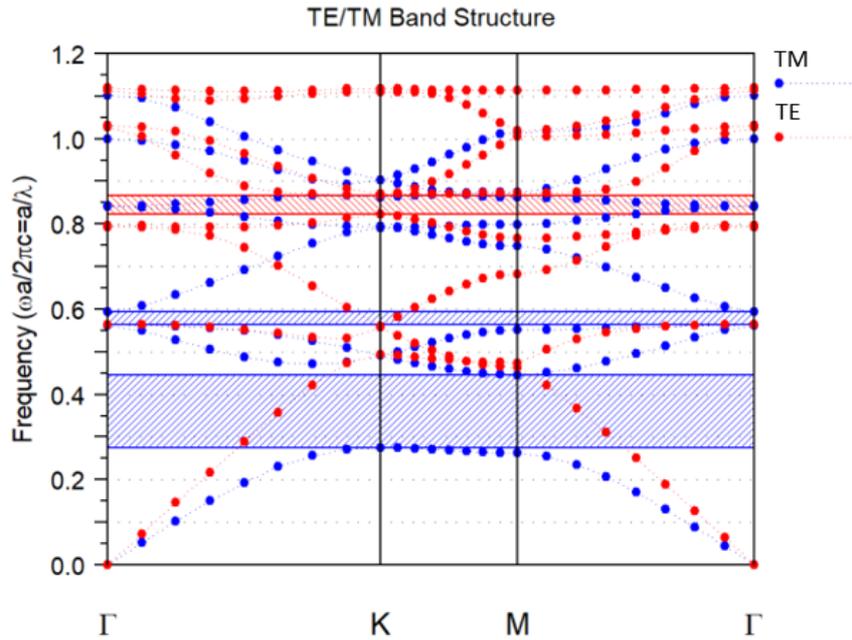


FIGURE III.5 – Diagramme de bandes de la structure d'étude.

III.4 Structure avec défauts

III.4.1 Etude de la première topologie d'un filtre à cristaux photoniques

Les filtres à cristaux photoniques sont réalisés principalement par le processus de couplage guide-cavité. Ces derniers sont mis en œuvre dans la structure des cristaux photoniques 2D en créant des défauts : soit par une modification locale de l'indice ou un changement de la taille du motif cristallin, soit par un déplacement d'un des motifs, ou la suppression d'un des motifs ou par la modification de l'indice de réfraction d'un des motifs.

La structure du filtre proposé est schématisée sur la Figure III.6. Il est constitué de deux guides d'onde entre lesquels est positionnée une cavité linéique. Cette dernière est créée par la suppression de deux motifs de la structure. Les deux guides d'onde quant à eux sont appelés guide d'entrée et guide de sortie et sont formés par l'omission de quelques tiges de la structure. Les tiges situées entre la cavité et les deux guides d'onde sont appelées miroirs. Initialement, ce nombre de tiges est égal à 2 ($N=2$).

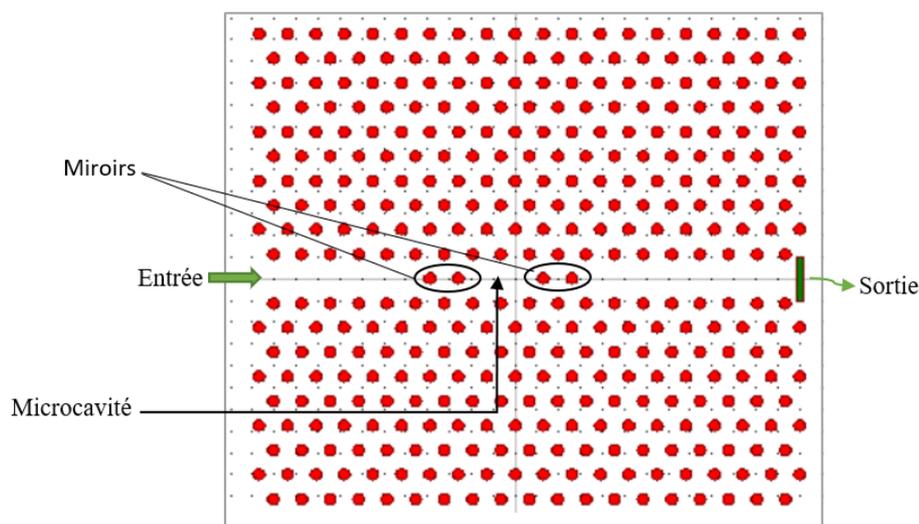


FIGURE III.6 – Représentation schématique de la première topologie du filtre.

III.4.1.1 Effet de la réflectivité des miroirs sur les caractéristiques du filtre

L'évolution des caractéristiques du filtre en fonction des différents paramètres structuraux ont été étudiées numériquement en utilisant le logiciel FullWAVE de RSoft. La structure analysée, illustrée schématiquement sur la Figure III.7, a été simulée avec un nombre différent de tiges diélectriques situées entre la cavité et les deux guides d'ondes, dans le but d'améliorer la réflectivité des miroirs de la cavité.

Les caractéristiques de transmission du filtre ont été simulées en utilisant la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD). La Figure III.8 montre les spectres de transmission pour $N = 2, 3$ et 4 . Sur cette figure, on remarque l'apparition d'un pic résonant à la longueur d'onde $\lambda = 1.5462 \mu m$. Les caractéristique de ce pic pour les trois valeurs de N sont résumé sur le Tableau III.1.

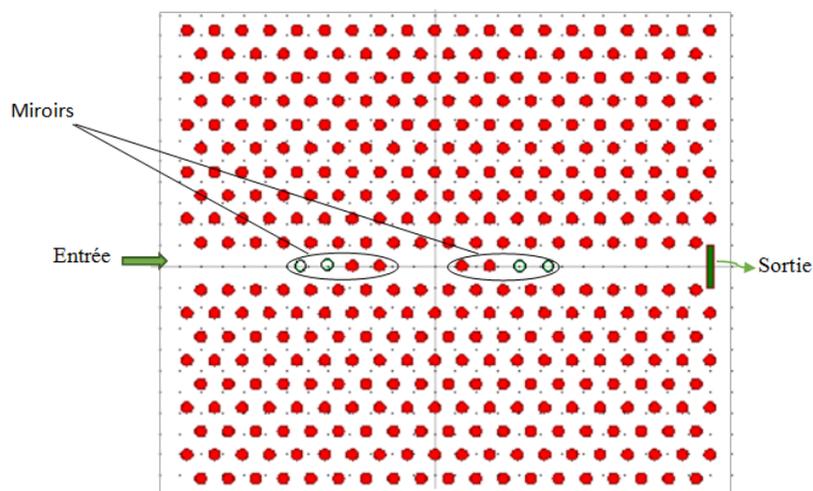


FIGURE III.7 – Filtre à cristaux photoniques avec 3 tiges de séparation entre la cavité et le guide d'onde.

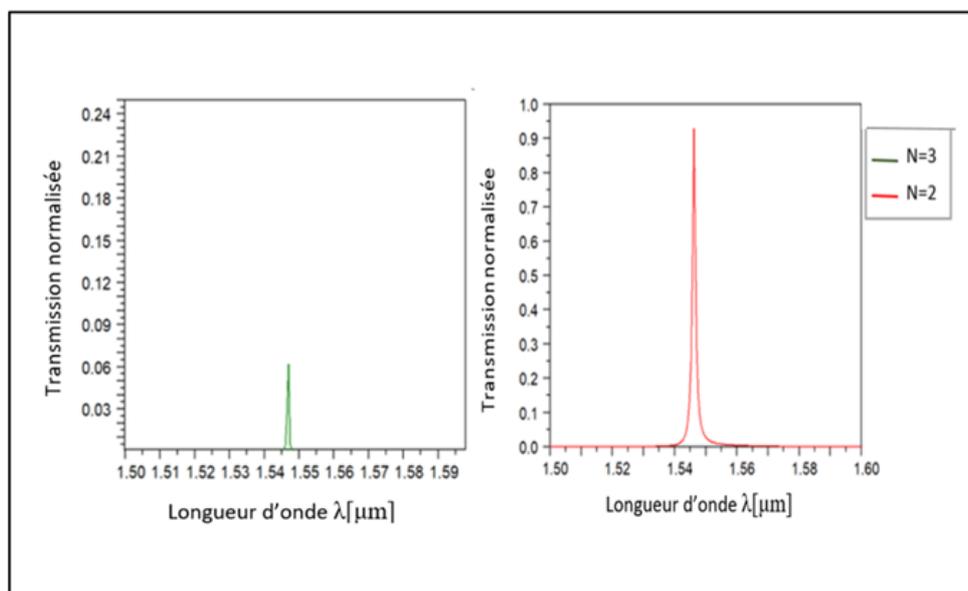


FIGURE III.8 – Spectres de transmission du filtre pour $N=2$ et $N=3$.

Le Tableau (III.1) donne les taux de transmission ainsi que les facteurs de qualité calculés pour $N = 2$ et $N=3$. Les résultats donnés sur ce tableau révèlent que le nombre de tiges dans les miroirs influence significativement les performances du filtre. On observe une augmentation significative du facteur de qualité (Q) en fonction de N . Cela s'explique par le fait que plus le nombre de tiges augmente (N), plus la paroi de la cavité est épaisse. Cet épaissement renforce l'effet de confinement de la lumière, améliorant ainsi le facteur Q . Ce phénomène est dû à l'augmentation de la réflectivité des miroirs à cristaux photoniques.

D'après les résultats obtenus, La meilleure transmission qui est égale à 93.05 % est relevée pour $N=2$. Tandis que le meilleur facteur de qualité qui est égal à 2210 est noté pour $N=3$. Il existe donc un compromis entre le facteur de qualité et la transmission. Afin d'obtenir simultanément un facteur de qualité et une transmission relativement élevés, notre choix s'est porté sur $N=2$, pour lequel on note un taux de transmission de 93.05 % et un facteur de qualité de 1189.6.

Nombre de tiges (N)	Longueur d'onde λ (μm)	Transmission (%)	Facteur de qualité Q
N=2	1.5462	93.05	1189.6
N=3	1.5462	6.21	2210

TABLE III.1 – Caractéristiques du filtre pour différentes valeurs de N.

III.4.1.2 Effet de la taille des tiges situées aux extrémités de la cavité sur les caractéristiques du filtre

Le rayon des tiges (r') situées aux bords de la cavité est un autre paramètre important qui influence les caractéristiques du filtre. Afin de concevoir une microcavité photonique à facteur de qualité élevé, il est nécessaire de réduire les pertes par rayonnement et obtenir un meilleur confinement. Pour ce faire, nous allons varier le rayon r' entre $0.106 \mu\text{m}$ et $0.148 \mu\text{m}$. Les résultats sont présentés dans le tableau III.2 et la Figure III.9.

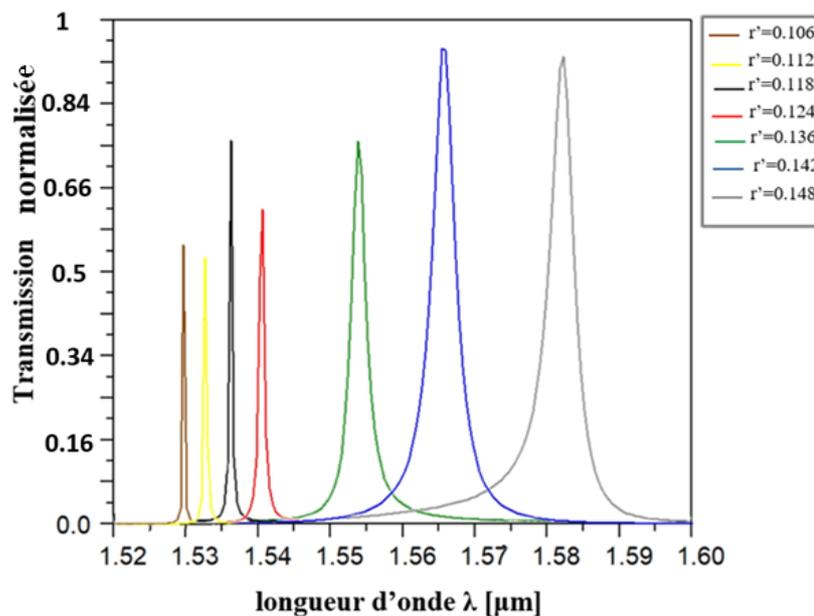


FIGURE III.9 – Spectres de transmission du filtre pour différentes valeurs de r' .

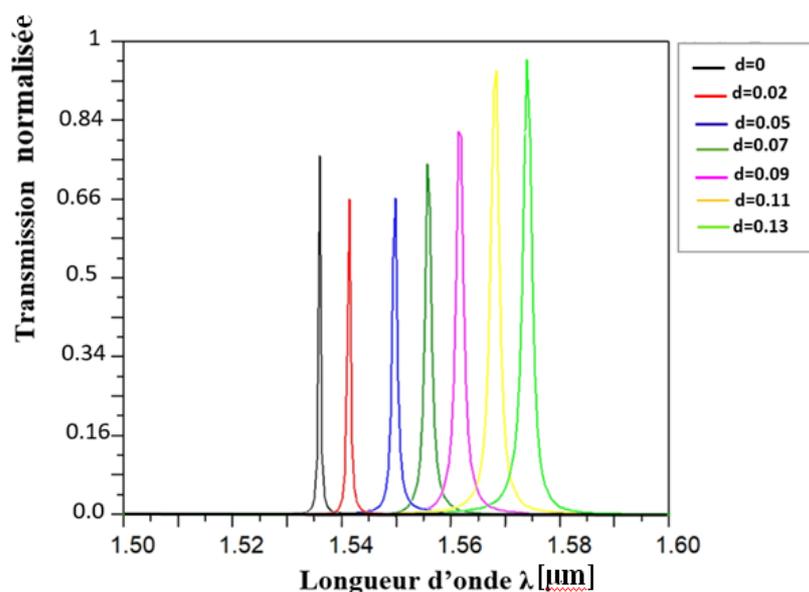
Rayon r' [μm]	Longueur d'onde λ [μm]	Transmission %	Facteur de qualité Q
0.106	1.5299	53.09	3059.8
0.112	1.5326	50.65	2554.3
0.118	1.5362	72.9	3072.4
0.124	1.5407	60.13	1540.7
0.136	1.5539	72.66	621.56
0.142	1.5655	93.59	411.9
0.148	1.5821	92.23	395.5

TABLE III.2 – Caractéristiques du filtre pour différentes valeurs de r' .

Les spectres de transmission calculés montrent que la longueur d'onde de résonance se déplace vers des longueurs d'onde plus élevées lorsque r' augmente. Le tableau III.2 donne les spécifications pour chaque longueur d'onde en termes de transmission et de facteur de qualité. On remarque que le facteur de qualité augmente, atteint un maximum puis diminue au fur et à mesure que le rayon des deux tiges augmente. La valeur maximale du facteur de qualité est obtenue pour le rayon $r' = 0.118 \mu\text{m}$ avec un taux de transmission de 72.9 %.

III.4.1.3 Effet du déplacement des tiges situées aux extrémités de la cavité sur les caractéristiques du filtre

Afin d'améliorer les caractéristiques de notre filtre, on fixe le rayon des tiges situées aux bords de la cavité à sa valeur optimale ($r' = 0.118 \mu\text{m}$) et on les déplace vers l'extérieur de la cavité sur une distance comprise entre 0.02 et 0.13 μm . En effet, le déplacement de ces tiges permet un meilleur confinement du mode. Les résultats pour différentes valeurs du déplacement d sont illustrés dans la Figure III.10 et leur spécifications sont indiquées dans le tableau III.3.

FIGURE III.10 – Spectres de transmission du filtre pour différentes valeurs de d .

Déplacement [μm]	d	Longueur d'onde λ [μm]	Transmission (%)	Facteur de qualité (Q)
0		1.5362	72.9	3072.4
0.02		1.5416	64.28	1927
0.05		1.5498	64.41	1291.5
0.07		1.5557	71.39	1111.21
0.09		1.5614	79.32	821.78
0.11		1.5672	90.43	825.42
0.13		1.574	92.24	828.42

TABLE III.3 – Caractéristiques du filtre pour différentes valeurs de ' d '.

Les données fournies dans le tableau III.3 montrent l'effet du déplacement des tiges situées aux extrémités de la cavité sur la transmission, la longueur d'onde de résonance et le facteur de qualité (Q). En augmentant la valeur de ' d ', la transmission du filtre augmente de manière considérable, passant de 72.9 % pour $d = 0$ à 92.24% pour $d = 0.13 \mu m$. Parallèlement, la longueur d'onde de sortie se déplace vers les grandes longueurs d'onde, allant de $1.5362 \mu m$ jusqu'à $1.574 \mu m$. Cependant, cette augmentation de la transmission et de la longueur d'onde s'accompagne d'une diminution notable du facteur de qualité, qui passe de 3072.4 à 828.42 sur

la même plage de déplacement. Cela indique que bien que le déplacement des tiges améliore le passage du signal et permet un ajustement de la fréquence de résonance, il réduit le confinement du mode et augmente les pertes dans la cavité. Ainsi, l'optimisation de la distance des tiges doit trouver un équilibre entre une transmission élevée et un facteur de qualité acceptable, en fonction des besoins spécifiques des applications visées.

Afin d'évaluer l'efficacité du filtre, une simulation de la distribution du champ à la longueur d'onde $\lambda = 1.5362 \mu\text{m}$ est effectuée pour ce composant. Les résultats sont présentés dans la figure III.11. Nous observons que le couplage entre le guide d'onde et la cavité à la longueur d'onde de résonance permet un transfert complet du signal du guide d'onde d'entrée vers le guide d'onde de sortie via le résonateur.

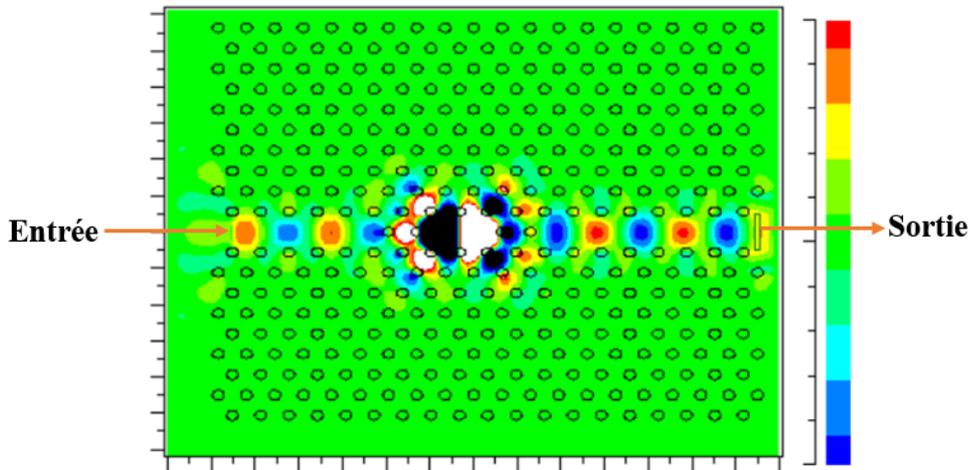


FIGURE III.11 – Répartition du champ dans le filtre à $\lambda = 1.5362 \mu\text{m}$.

III.4.2 Etude de la deuxième topologie d'un filtre à cristaux photoniques

La structure proposée est schématisée sur la Figure III.12. Elle est constituée d'un réseau triangulaire de tiges en Silicium plongées dans l'air avec une période de $a = 0.6353 \mu\text{m}$. La structure étudiée se compose de trois parties essentielles. La première est un défaut linéaire constituant un guide d'entrée, créé en retirant plusieurs motifs de la structure périodique. Ce guide d'entrée achemine la lumière vers la cavité. La deuxième partie est la plus importante du filtre, c'est la cavité de résonance. Elle est formée en enlevant deux tiges diélectriques de la structure périodique. C'est au sein de cette cavité que se produit la résonance de la lumière

à la longueur d'onde désirée. Enfin, la troisième partie est un défaut linéaire constituant un guide de sortie, similaire au guide d'entrée. Il est créé en supprimant des motifs de la structure et permet d'acheminer la lumière de la cavité vers la sortie. Les motifs qui séparent la cavité et les deux guides d'ondes sont appelés miroirs. Le nombre de motifs qui constitue chaque miroir est 3 ($N=3$). La longueur du réflecteur est choisie égale à 9 tiges ($L=9$).

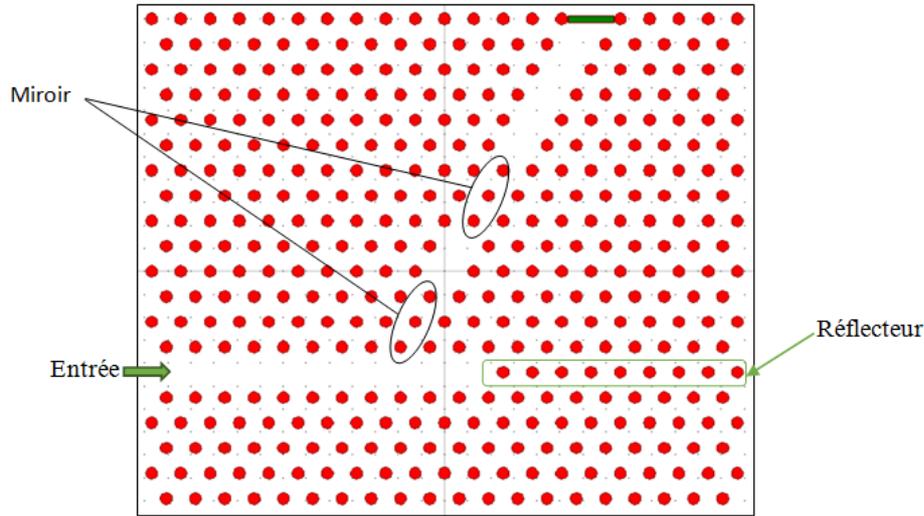
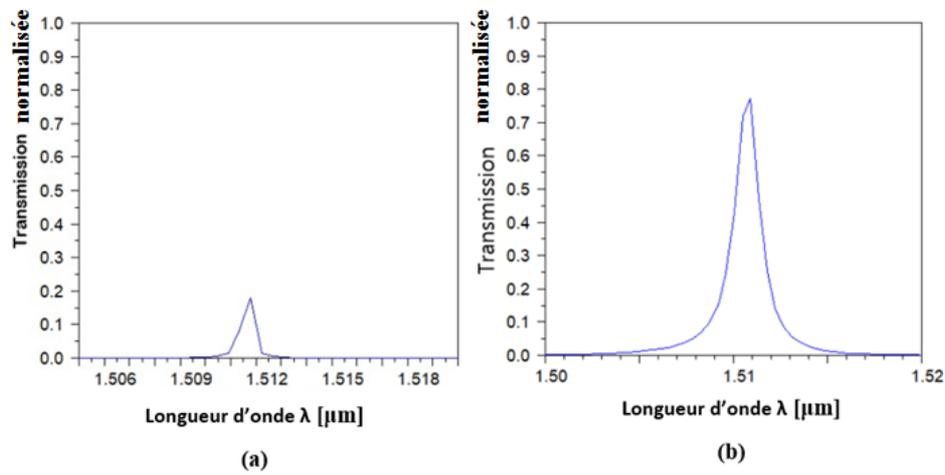


FIGURE III.12 – Représentation schématique de la deuxième topologie du filtre.

III.4.2.1 Effet de la réflectivité des miroirs sur les caractéristiques du filtre

Dans cette partie, nous analyserons les performances du filtre pour des miroirs constitués d'un nombre varié de motifs ($N = 2$ et $N = 3$). Les résultats obtenus sont reportés sur la Figure III.13 . Sur cette figure, on remarque l'apparition d'un pic résonant à la longueur d'onde $\lambda = 1.5109\mu m$. Les caractéristiques de ce pic pour les deux valeurs de N sont résumé sur le Tableau III.4.

L'analyse des résultats obtenus montre une amélioration significative du facteur de qualité avec l'augmentation de N . le facteur de qualité atteint 2519.66. Ce résultat positif s'accompagne toutefois d'un taux de transmission (T) très faible égal à 17.95 %. Cette observation souligne un compromis entre l'amélioration du facteur de qualité et le maintien d'une transmission élevée.


 FIGURE III.13 – Spectre de transmission du filtre pour (a) $N=3$ et (b) $N=2$.

Nombre de tiges (N)	Longueur d'onde λ [μm]	Transmission (%)	Facteur de qualité (Q)
$N=2$	1.5113	76.95	1007.26
$N=3$	1.51025	17.95	2519.66

TABLE III.4 – Caractéristiques du filtre pour différentes valeurs de 'N'.

III.4.2.2 Effets de la longueur du réflecteur sur les caractéristiques du filtre

La figure III.14 présente les spectres de transmission du filtre proposé en fixant $N=2$ et en faisant varier la longueur du réflecteur. Les caractéristiques du filtre pour chaque valeur de la longueur du réflecteur sont détaillés dans le tableau III.5.

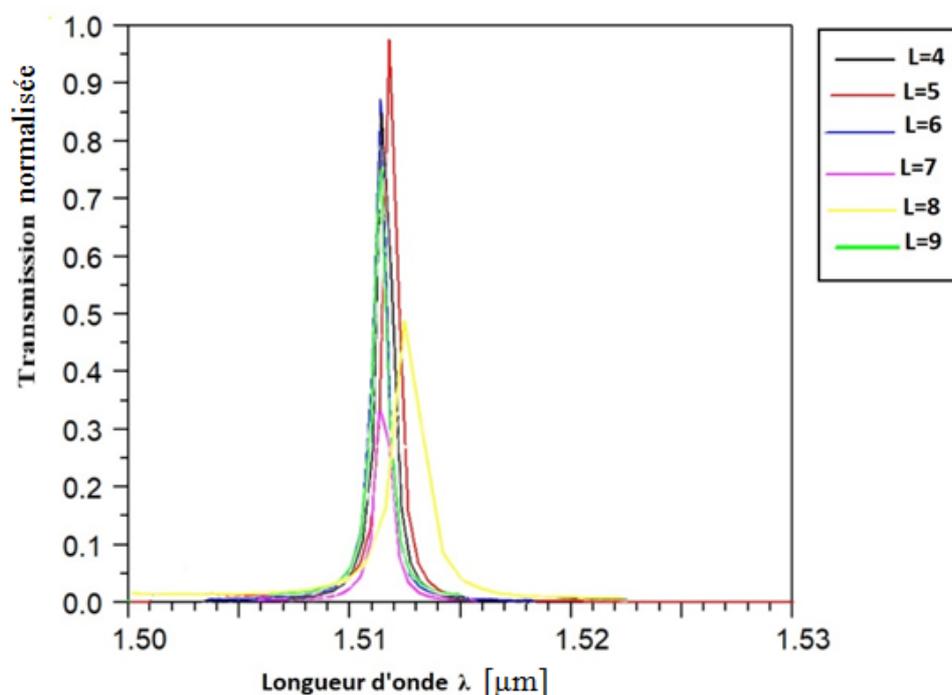


FIGURE III.14 – Spectres de transmission pour différentes valeurs de la longueur du réflecteur L .

Longueur du Réflecteur L	Longueur d'onde λ [μm]	Transmission (%)	Facteur de qualité (Q)
4	1.5114	85.65	1511.4
5	1.5118	97.15	1897.25
6	1.5117	86.15	1162.23
7	1.5114	23.34	1678
8	1.5125	24.07	2158.42
9	1.5113	76.95	1007.26

TABLE III.5 – Caractéristiques du filtre pour différentes valeurs de la longueur du réflecteur ' L '.

D'après les résultats du tableau III.5, bien que l'amélioration du facteur de qualité soit notable avec une longueur de réflecteur de $L=8$, cela s'accompagne d'une faible transmission $T=24.07\%$. Ainsi, le meilleur compromis est obtenu pour une longueur du réflecteur de $L=5$, offrant un bon équilibre entre transmission et facteur de qualité.

III.4.2.3 Effet de la taille des tiges situées aux extrémités de la cavité sur les caractéristiques du filtre

Dans cette partie, nous cherchons à améliorer le confinement photonique. Notre approche pour obtenir un confinement amélioré implique de modifier le rayon r' , des tiges situées aux bords de la cavité, entre $0.109\ \mu\text{m}$ et $0.145\ \mu\text{m}$. Les résultats pour différentes valeurs du rayon

sont illustrés dans la Figure III.15 et leur spécifications sont indiquées dans le Tableau III.6.

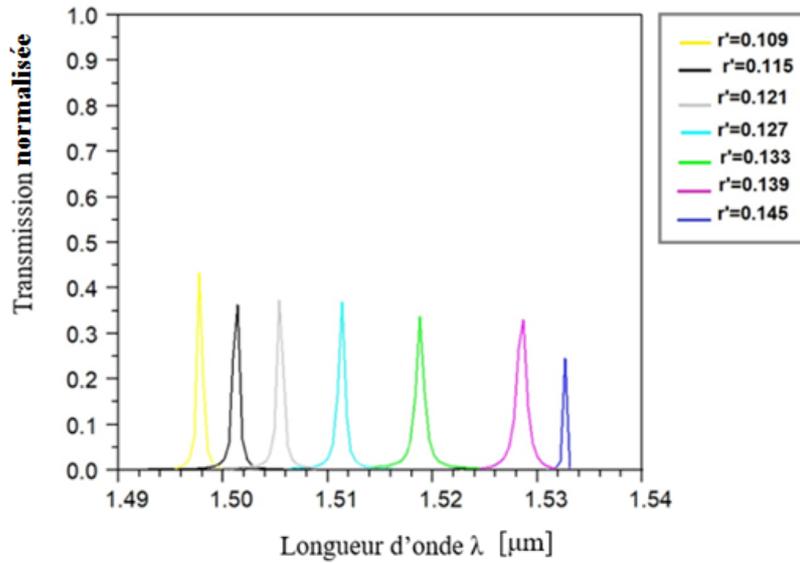


FIGURE III.15 – Spectres de transmission pour différentes valeurs de r' .

Rayon r' [μm]	Longueur d'onde λ [μm]	Transmission (%)	Facteur de qualité (Q)
0.109	1.4975	43.45	2495.83
0.115	1.5014	36.4	1668.22
0.121	1.5053	36.98	1881.63
0.127	1.5118	36.97	2159.57
0.133	1.5188	33.63	1687.55
0.139	1.5285	33.28	1389.54
0.145	1.5326	24.66	3065.2

TABLE III.6 – Caractéristiques du filtre pour différentes valeurs de r' .

Les résultats du Tableau III.6 montrent que la taille des tiges aux extrémités de la cavité joue un rôle crucial dans le confinement photonique. Le meilleur facteur de qualité est égal à 3065.2, il est atteint pour $r = 0.145\mu\text{m}$. Cependant la transmission reste à améliorer.

Pour démontrer la performance du filtre, une simulation de la distribution du champ a été effectuée pour une longueur d'onde λ de $1.5118\mu\text{m}$ pour une longueur du réflecteur de $L=5$. Les résultats sont illustrés dans la Figure III.16. On peut constater que, grâce au couplage efficace entre le guide d'onde et la cavité à la longueur d'onde de résonance, le signal est complètement extrait du guide d'onde d'entrée et transféré au guide d'onde de sortie.

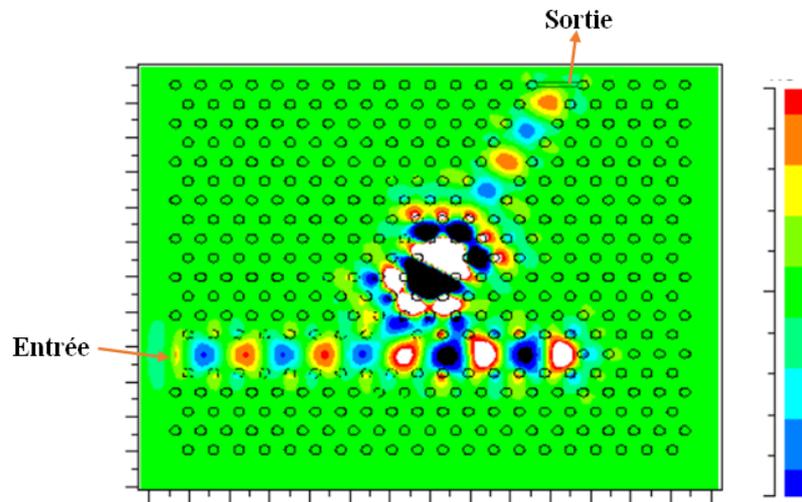


FIGURE III.16 – Représentation de la distribution du champ électrique pour le filtre pour $\lambda = 1.5117 \mu\text{m}$.

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé deux configurations différentes de filtres basés sur le couplage guide-cavité à cristaux photoniques bidimensionnels. Pour améliorer les performances de nos composants, nous avons analysé l'influence de certains paramètres sur leurs caractéristiques, notamment la réflectivité des miroirs de la cavité, la taille et la position des tiges situées aux extrémités de la cavité. Bien que les deux topologies ont montré des améliorations significatives après optimisation, la deuxième topologie est recommandée pour ses performances optimisées, offrant un meilleur compromis entre transmission et facteur de qualité.

Bibliographie

- [1] SYNOPSIS. **Photonic Solutions**. Consulté le 28 juin 2024. 2023. URL : <https://www.synopsys.com/photonic-solutions.html>.
- [2] Pierre R VILLENEUVE et Michel PICHE. Photonic band gaps in two-dimensional square and hexagonal lattices. In : Physical Review B 46.8 (1992), p. 4969.
- [3] Sandrine MASSY. Contribution à la réalisation de fonctions optiques à base de cristaux photoniques sur LiNbO₃. In : Doctorate theses, University of Limoges (2004).
- [4] M PLIHAL et AA MARADUDIN. Photonic band structure of two-dimensional systems : The triangular lattice. In : Physical Review B 44.16 (1991), p. 8565.

Conclusion générale

Notre étude démontre le potentiel révolutionnaire des cristaux photoniques (CPs) dans le domaine du filtrage optique. Ces matériaux se distinguent par une structure périodique unique, modulant l'indice de réfraction de la lumière. Cette propriété remarquable confère aux CPs la capacité inédite de contrôler la propagation de la lumière, créant des zones à l'intérieur du cristal où certaines longueurs d'ondes ne peuvent se propager. Ces zones, appelées bandes interdites photoniques, ouvrent la voie à des applications extraordinaires.

Dans le cadre de cette étude, nous avons exploré le potentiel des composants optiques basés sur les cristaux photoniques bidimensionnels (CP-2D). Notre attention s'est portée plus particulièrement sur la conception de filtres optiques, éléments clés des circuits photoniques intégrés et des systèmes de télécommunications optiques.

Notre travail a débuté par une présentation des principes fondamentaux des cristaux photoniques. Cette démarche nous a permis d'offrir un aperçu complet sur les différents types de cristaux photoniques et de leurs propriétés électromagnétiques uniques. Nous nous sommes ensuite penchés sur les diverses méthodes numériques employées dans la modélisation des cristaux photoniques, en mettant l'accent sur l'ingénierie de ces matériaux exceptionnels.

Après avoir posé les bases des cristaux photoniques, nous nous sommes concentrés sur les filtres optiques à base de ces matériaux révolutionnaires. Nous avons mis en évidence leurs caractéristiques distinctives et exploré en profondeur les principes de fonctionnement qui les rendent si prometteurs. Nous avons également présenté des exemples d'applications qui illustrent les différentes configurations de filtres à cristaux photoniques basés sur les cavités résonantes.

Dans la dernière partie de cette étude, nous avons exploré le développement de deux configurations innovantes de filtres optiques en utilisant la méthode des différences finies dans le domaine temporel bidimensionnel (FDTD-2D). Ces filtres reposent sur le couplage entre des guides d'onde et des cavités à cristaux photoniques. Une discussion autour des paramètres permettant l'amélioration du fonctionnement de ces composants a été mise au point. Le but étant d'ajuster ces paramètres pour atteindre les performances maximales possibles.

Le mémoire explore les concepts fondamentaux des cristaux photoniques, y compris leurs types (1D, 2D, 3D), leurs propriétés spécifiques telles que les bandes interdites photoniques, et leurs diverses applications, notamment dans les fibres optiques et les capteurs photoniques. Les techniques de modélisation, comme la méthode des ondes planes (PWE) et la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD), sont analysées pour leur utilité dans l'étude de ces structures complexes. L'étude met en avant l'importance des simulations numériques dans la conception des dispositifs photoniques. En utilisant des logiciels comme RSoft CAD, il a été démontré que des structures optimisées peuvent confiner et manipuler la lumière efficacement, ouvrant ainsi la voie à des applications avancées en communication optique et photonique intégrée. Les résultats obtenus montrent que la longueur d'onde de résonance des cristaux photoniques augmente avec le rayon des tiges et que le facteur de qualité (Q) atteint un maximum avant de diminuer. Le compromis idéal pour obtenir un haut facteur de qualité et une bonne transmission consiste à utiliser deux tiges dans le miroir périodique.

Enfin, la conclusion discute des principaux résultats, des implications pour les recherches futures et des perspectives d'évolution des technologies basées sur les cristaux photoniques. Les progrès dans ce domaine sont prometteurs pour l'amélioration des technologies existantes et le développement de nouvelles solutions innovantes dans divers domaines technologiques.

Résumé

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

Dans cette étude, nous nous sommes concentrés sur l'analyse des filtres optiques basés sur le couplage entre des guides d'onde et des cavités linéiques à cristaux photoniques. Nous avons présenté deux types de filtres : le premier comprenant une cavité positionnée entre deux guides d'onde horizontaux, tandis que le deuxième comporte une cavité insérée entre deux guides d'onde l'un horizontal et l'autre oblique. Les propriétés de ces filtres ont été étudiées numériquement en utilisant la méthode des différences finies dans le domaine temporel à deux dimensions (2D-FDTD).

Mot clés : Cristal Photonique, Bande interdite Photonique, Cavité Linéique, Filtre.

Abstract

Photonic crystals are artificial materials in which the refractive index varies periodically in one or more directions of space. This periodicity leads to the emergence of wavelength ranges for which light cannot propagate through the structure.

In this study, we focused on the analysis of optical filters based on the coupling between waveguides and photonic crystal cavities. We presented two types of filters : the first one consisting of a cavity positioned between two horizontal waveguides, while the second one involves a cavity inserted between two waveguides, one horizontal and the other oblique. The properties of these filters were numerically investigated using the two-dimensional finite-difference time-domain method (2D-FDTD).

Key words : Photonic Crystal, Photonic Band Gap, Linear Cavity, Filter.