

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



Département d'Automatique, Télécommunication et d'Electronique

Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Télécommunication

Spécialité : Réseaux et Télécommunications

Thème

Démultiplexage par cristaux photoniques bidimensionnels : modélisation de dispositifs à quatre canaux

Préparé par :

- Meftah Lisa
- Ouatmani Hanane

Soutenu le :

01\07\2024

Dirigé par :

R.Bendjelloul

Examiné par :

S.Hadji

L.Achour.

Année universitaire : 2023/2024

Remerciements

Au terme de ce mémoire, nous tenons à remercier le dieu Tout-Puissant pour nous avoir donné la force et le courage de mener à bien cet humble travail.

*Nous tenons à remercier Madame **BENDJELLOUL** pour son encadrement, son soutien, ses précieux conseils et le temps qu'elle nous a consacré en tant que superviseur.*

*Nous adressons également nos sincères remerciements aux membres du jury, Monsieur **S.Hadji** et Mademoiselle **L.Achour**, pour avoir accepté d'examiner et d'évaluer notre travail. Enfin, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à nos chères familles pour leur soutien, leur amour, leurs sacrifices et leurs encouragements, ainsi qu'à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce projet.*

Dédicace

Je souhaite dédier humblement ce travail à mes chers parents, dont les sacrifices, l'amour, la tendresse, le soutien et les prières ont été constants tout au long de mes études.

À ma chère grande sœur Salima, qui a toujours été là pour me soutenir avec l'aide, le courage, le soutien moral et l'amour.

À ma chère sœur Soraya et ces enfants.

À mes chers frères, Hanafi, Fares, Nabil et sa femme Nacira pour leur appui et leurs encouragements.

À mes amies Fatima, Roumayssa et Souhila et tous mes collègues de la promotion réseaux et télécommunication.

À ma binôme Lisa.

À toute personne qui m'a aidé de près ou de loin durant mes études.

Hanane

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à mes chers parents, en particulier à ma mère, dont l'amour et le soutien indéfectibles m'ont porté tout au long de ce parcours.

À mes chers frères, Khelifa et Rabah pour leur encouragement et leur présence constante.

À mon cher fiancé, Karim pour sa patience, son amour et son soutien inébranlable.

À ma chère tante Naima, pour son aide précieuse et son soutien constant.

À mes chères amies, Dalina, Feriel, Wissam, Fatima, Djaouida, Chahra pour leur compréhension, leurs conseils et les moments de joie partagés.

À ma binôme, Hanane pour son entente et sa sympathie.

Avec toute ma gratitude et mon affection.

Lisa

Table des matières

<i>Remerciements</i>	i
<i>Dédicace</i>	ii
<i>Dédicace</i>	iii
Table des figures	ix
Liste des tableaux	x
Liste des abréviations	xi
Introduction Générale	1
1 Généralités sur les cristaux photoniques	3
1-1 Introduction	4
1-2 Définition des cristaux photoniques	4
1-3 Types des cristaux photoniques	4
1-3-1 Les cristaux photoniques unidimensionnels 1D	5
1-3-2 Les cristaux photoniques bidimensionnels 2D	5
1-3-2-1 Les familles des cristaux photoniques	6
1-3-2-2 Diagramme de bande	7
1-3-2-3 réseau réciproque	7
1-3-2-4 La zone de Brillouin	8
1-3-2-5 Les modes TE et TM	9
1-3-3 Les cristaux photoniques 3D	9
1-3-4 Les cristaux photoniques naturelles	10
1-4 Défauts dans les cristaux photoniques	11
1-4-1 Défauts ponctuels	11

1-4-2	Défauts linéaires	12
1-5	Applications des cristaux photoniques	12
1-5-1	Les fibres optiques	13
1-5-2	Les filtres optiques	13
1-5-3	Les démultiplexeurs	14
1-6	Technologies et matériaux	14
1-6-1	Matériaux	14
1-6-2	Technologies	14
1-7	Techniques de modélisation	15
1-7-1	La méthode des ondes planes (PWE)	15
1-7-2	La méthode FDTD	15
1-8	Conclusion	16
2	Les démultiplexeurs à cristaux photoniques	17
2-1	Introduction	18
2-2	Principe de démultiplexage à base des cristaux photoniques	18
2-3	Démultiplexeur à cavité de résonance	20
2-4	Cavités dans les cristaux photoniques	20
2-4-1	Les différent types de cavités	20
2-4-1-1	Cavité Hexagonale	20
2-4-1-2	Cavité Linéique	21
2-4-2	Facteur de qualité	21
2-5	Quelques Topologie des démultiplexeurs	23
2-5-1	Première Topologie	23
2-5-2	Deuxième Topologie	23
2-5-3	Troisième Topologie	24
2-6	Conclusion	25
3	Résultats et Interprétations	27
3-1	Introduction.....	28
3-2	Présentation de logiciel	28
3-2-1	Fenêtre de RSOFT CAD.....	28
3-2-2	Simulateur BandSolve	29

Table des matières	vi
3-2-3 Simulateur Fullwave	29
3-3 Structure sans défauts	30
3-4 Structure avec défauts	32
3-4-1 Filtre à cristaux photonique	32
3-4-1-1 Effets des miroirs sur les caractéristiques du filtre.....	34
3-4-1-2 Effets de la longueur du réflecteur sur les caractéristiques du filtre.....	34
3-4-1-3 Effets des rayons sur la longueur d'onde	36
3-5 Démultiplexeur à base de couplage guide-cavité	37
3-5-1 Première topologie	37
3-5-1-1 Effets de la distance entre les canaux sur les caractéristiques du démultiplexeur.....	39
3-5-1-2 Effets de la longueur du réflecteur sur les caractéristiques du démultiplexeur.....	40
3-5-2 Deuxième topologie	42
3-5-2-1 Effets de la distance entre les canaux sur les caractéristiques du démultiplexeur.....	44
3-5-2-2 Effets de la longueur du réflecteur sur les caractéristiques du démultiplexeur.....	45
3-6 Comparaison des performances des deux topologies de démultiplexeur	47
3-7 Conclusion	47
Conclusion générale	49
Bibliographie	50

Table des figures

Figure 1.1	Représentation des cristaux photoniques unidimensionnels (1D), bidimensionnel (2D), et tridimensionnel (3D) [4].	4
Figure 1.2	Structure périodique unidimensionnel 1D [5]	5
Figure 1.3	a-structure connectée ; b-structure déconnectée [6]	6
Figure 1.4	Représentation des réseaux a) carré b) hexagonal c) triangulaire	6
Figure 1.5	Diagrammes de bandes pour a) réseau carré b) réseau triangulaire.	7
Figure 1.6	Représentation de la zone de brillouin , a) dans un réseau carré , b) dans un réseau triangulaire.	8
Figure 1.7	Représentation des polarisations TE et TM dans les cristaux photoniques 2D [12].	9
Figure 1.8	Exemple de cristal photonique tridimensionnel : la « Yablonovite » [14]	10
Figure 1.9	Structures tas de bois : Images MEB d'une structure fabriquée par lithographie UV dans du silicium . [16]	10
Figure 1.10	Représentation des cristaux photoniques naturelles a) opale b) les papillons [10]	11
Figure 1.11	Défauts ponctuels : (a) Défaut lacunaire, (b) et (c) Défauts de substitutions.	12
Figure 1.12	Exemples de défauts linéaires dans un cristal photonique 2D créés (a) en omettant une seule rangée de motifs, (b) en modifiant l'indice de réfraction d'une seule rangée de motifs, (c) en variant le rayon d'une seule rangée de motifs de la structure.	12
Figure 1.13	Exemple d'une fibre à cristaux photoniques	13
Figure 1.14	Cristal photonique sur une plateforme de silicium [29].	15
Figure 2.1	le multiplexage et le démultiplexage WDM	19
Figure 2.2	(a) démultiplexeur à base de cavités résonantes, (b) démultiplexeur à base de guides d'onde en cascade.	19

Figure 2.3	Cavité Hexagonale [35].	21
Figure 2.4	Exemples de cavités de types L_n : (a) cavité L3, (b) cavité L5, (c) cavité L7 [37].	21
Figure 2.5	Représentation fréquentielle de l'intensité Lorentzienne d'un mode dans la cavité centré à la fréquence λ_0	22
Figure 2.6	Structure et spectre de transmission pour la topologie étudiée	23
Figure 2.7	La structure et le spectre de transmission pour la topologie étudiée	24
Figure 2.8	(a) Structure schématique du démultiplexeur proposé dans la référence [43] (b) Son spectre de transmission	25
Figure 3.1	Fenêtre de RSOFT CAD.	29
Figure 3.2	Fenêtre de BandSolve.	29
Figure 3.3	Fenêtre de Fullwave.	30
Figure 3.4	Représentation schématique de la structure d'étude	31
Figure 3.5	Diagramme de bandes de la structure étudiée	32
Figure 3.6	Représentation schématique du filtre proposé	33
Figure 3.7	Spectre de transmission du filtre proposé.	33
Figure 3.8	Spectre de transmission du filtre proposé pour $N=2, L=9$	34
Figure 3.9	Spectres de transmission en fonction de la variation de la longueur de Réflecteur	35
Figure 3.10	Spectres de transmission en fonction des Rayons	36
Figure 3.11	Représentation de la distribution du champ électrique pour le filtre pour $\lambda=1.5109\mu m$	37
Figure 3.12	Représentation schématique de la structure du première topologie.	38
Figure 3.13	Spectre de transmission pour $D=4, L=6$	38
Figure 3.14	Spectres de transmission pour différents valeurs de D	39
Figure 3.15	Spectres de transmission pour différentes valeurs du réflecteur.	41
Figure 3.16	Représentation de la distribution du champ électrique pour le démultiplexeur pour (a) $\lambda_1 = 1.5048 \mu m$, (b) $\lambda_2 = 1.5105 \mu m$ (c) $\lambda_3 = 1.5184 \mu m$, (d) $\lambda_4 = 1.5294 \mu m$	42
Figure 3.17	Représentation schématique de la structure du 2eme topologie	43
Figure 3.18	Spectre de transmission de la 2eme topologie	44
Figure 3.19	Spectre de transmission pour différents valeurs de D	45

Figure 3.20	Spectres de transmission pour différentes valeurs du réflecteur.	46
Figure 3.21	Représentation de la distribution du champ électrique pour le démultiplexeur pour (a) $\lambda_1 = 1.5048 \mu m$, (b) $\lambda_2 = 1.5105 \mu m$ (c) $\lambda_3 = 1.5184 \mu m$, (d) $\lambda_4 = 1.5294 \mu m$	47

Liste des tableaux

Tableau 3.1	Caractéristiques du filtre pour $N=2$ et différentes valeurs de L	35
Tableau 3.2	Caractéristiques du démultiplexeur pour $D=4, L=6$	39
Tableau 3.3	Caractéristiques du démultiplexeur proposé pour différentes valeurs de D	40
Tableau 3.4	Caractéristiques du démultiplexeur pour différentes valeurs de L	41
Tableau 3.5	Caractéristiques du démultiplexeur pour $D=4, L=6$	44
Tableau 3.6	Caractéristiques du démultiplexeur proposé pour différentes valeurs de D	45
Tableau 3.7	Caractéristiques du démultiplexeur pour différentes valeurs de L	46

Liste des abréviations

- 1D** Une dimension
- 2D** Deux dimensions
- 3D** Trois dimensions
- a** Période du cristal photonique
- BIP** Bande interdite photonique
- CP** Cristaux photoniques
- CP-2D** Cristaux photoniques deux dimensionnels
- CT** Crosstalk
- FDTD** Finite Difference Time Domain
- λ Longueur d'onde
- L** Longueur du réflecteur
- n** Indice de réfraction
- PCF** Fibre à cristaux photoniques
- PWE** Plane Wave Expansion
- Q** Facteur de qualité
- r** Rayon du cristal photonique
- TE** Transverse électrique
- TM** Transverse magnétique
- WDM** Wavelength Division Multiplexing

Introduction générale

Dans les dernières années, avec le développement des technologies de la télécommunication et l'interconnexion de notre monde, la demande de bande passante a augmenté. Pour répondre à ce défi, nous avons besoin de solutions innovantes pour gérer et contrôler la distribution des données. C'est là que les travaux des chercheurs Yablonovitch et John interviennent. Leurs recherches ont abouti à la création d'une nouvelle génération de matériaux : les cristaux photoniques. Ces cristaux se distinguent par leur capacité à manipuler la lumière avec une grande précision.

En 1987, le terme « cristaux photoniques » a été utilisé pour la première fois par E. Yablonovitch [1], et le premier cristal photonique a été réalisé en 1991 [2]. Les cristaux photoniques sont des structures caractérisées par une variation périodique de l'indice de réfraction dans une, deux ou trois dimensions. Cette périodicité entraîne l'apparition de plages de longueurs d'onde, appelées bandes interdites photoniques (BIP), dans lesquelles aucune onde ne peut se propager. En introduisant des défauts ponctuels ou linéaires dans ces structures, la continuité de cette bande est rompue, ce qui provoque la localisation de la lumière dans la région du défaut.

Selon les chercheurs, les cristaux photoniques tridimensionnels (CP-3D) possèdent une bande interdite photonique complète, mais ils sont difficiles à réaliser. C'est pourquoi leur attention se concentre sur les cristaux photoniques bidimensionnels (CP-2D) et leur développement.

Les cristaux photoniques sont largement utilisés dans les télécommunications. À titre d'exemple, nous pouvons citer les démultiplexeurs qui font l'objet de notre étude. Un démultiplexeur à cristaux photoniques est un dispositif qui permet de séparer un signal optique composite en plusieurs signaux distincts à différentes longueurs d'onde. Il exploite les propriétés uniques des cristaux photoniques pour réaliser cette séparation de manière précise et compacte.

Ainsi, le but de ce travail est de concevoir un démultiplexeur en utilisant le logiciel Fullwave,

par le couplage des guides d'ondes à cristaux photoniques et les cavités.

Le présent manuscrit est structuré en trois chapitres répartis comme suit :

Le premier chapitre offre une introduction générale à l'étude des cristaux photoniques, en commençant par leur définition, les différents types et les bandes interdites photoniques (BIP). Ensuite, nous présenterons les défauts existants, quelques applications et les matériaux utilisés. Nous terminerons par les techniques de modélisation.

Dans le deuxième chapitre, nous aborderons les démultiplexeurs basés sur les cristaux photoniques 2D. Nous nous concentrerons particulièrement sur les cavités et les guides d'ondes, qui constitueront les éléments clés de notre démultiplexeur. Enfin, nous présenterons quelques topologies de démultiplexeurs utilisant le couplage des cavités et les guides d'ondes.

Au troisième chapitre, nous présenterons les outils numériques essentiels pour l'analyse des démultiplexeurs à cristaux photoniques. Nous examinerons les résultats de simulations obtenus à l'aide du simulateur FullWAVE. À partir de ces résultats, nous validerons la faisabilité d'un démultiplexeur à quatre canaux basé sur des cavités et des guides d'ondes couplés utilisant des cristaux photoniques.

Enfin, nous terminerons notre travail par une conclusion générale.

Chapitre 1

Généralités sur les
cristaux photoniques

1-1 Introduction

Une classe de matériaux artificiellement structurés, connue sous le nom de cristaux photoniques (CPs), a attiré une attention considérable dans le cadre de divers efforts de recherche au cours de la dernière décennie. Il s'agit d'une branche nouvelle et prometteuse de l'optique. De telles structures, également connues sous le nom de structures à bande interdite photonique (BIP), permettent de contrôler la lumière dans une, deux ou trois directions.

Dans ce chapitre, nous donnerons une introduction générale aux cristaux photoniques. Nous commencerons par présenter la définition des cristaux photoniques. Nous continuerons par les différents types de cristaux photoniques, leurs défauts et applications seront ensuite détaillés. Vers la fin de ce chapitre, nous aborderons quelques techniques de modélisation.

1-2 Définition des cristaux photoniques

Les cristaux photoniques sont des structures périodiques composées de matériaux diélectriques ou semi-conducteurs, utilisés pour contrôler la façon dont la lumière se déplace à des longueurs d'onde spécifiques à une, deux ou trois dimensions [3], comme le montre la figure (1.1). La disposition périodique des cristaux photoniques crée des bandes interdites pour certaines longueurs d'onde, mais il est nécessaire d'introduire des défauts dans la structure périodique pour générer une fréquence autorisée au sein de la zone interdite.

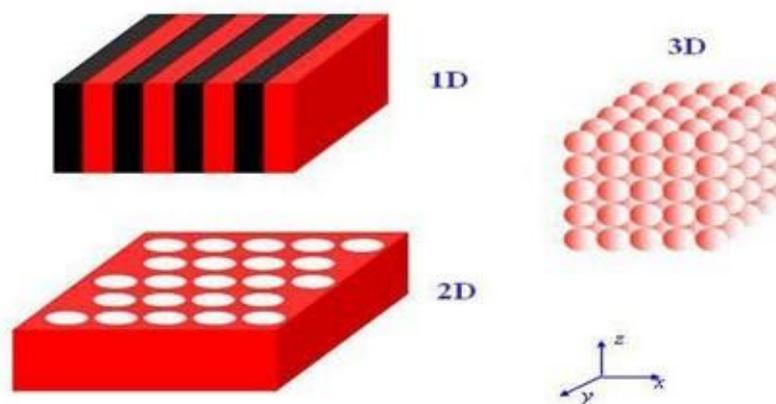


Figure 1.1. Représentation des cristaux photoniques unidimensionnels (1D), bidimensionnel (2D), et tridimensionnel (3D) [4].

1-3 Types des cristaux photoniques

Il existe trois types des cristaux photoniques, qui sont classé selon leurs dimensions :

- Cristal unidimensionnel 1D.

- Cristal bidimensionnel 2D.
- Cristal tridimensionnel 3D.

1-3-1 Les cristaux photoniques unidimensionnels 1D

Les matériaux à bandes photoniques interdites unidimensionnels (1D) possèdent une permittivité électrique périodique dans une seule direction et uniforme dans les deux autres directions, comme le montre la figure (1.2). Ils consistent en un empilement de deux couches alternées de matériaux homogènes ayant différent indice de réfraction. Ces structures existent depuis longtemps et sont utilisées en optique pour obtenir des miroirs sans pertes (miroirs de Bragg) ou des filtres [5].

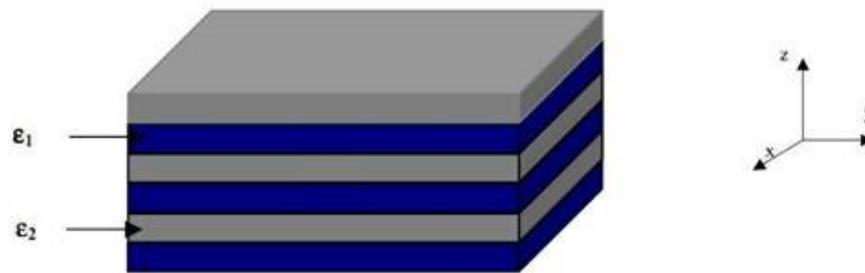


Figure 1.2. Structure périodique unidimensionnel 1D [5]

1-3-2 Les cristaux photoniques bidimensionnels 2D

Un cristal photonique 2D est une structure caractérisée par une périodicité de l'indice de réfraction dans deux dimensions de l'espace. Lorsqu'une onde lumineuse interagit avec ce cristal, elle sera soit transmise à travers la structure ou réfléchié si elle se situe dans une bande interdite photonique.

Les CP-2D se divisent en deux types de structures périodiques diélectriques :

Structures connectées : représentent des motifs élémentaires d'indice de réfraction n_1 et n_2 , agencés de manière à assurer une connectivité continue au sein du réseau cristallin. Ces éléments peuvent prendre la forme de piliers diélectriques disposés dans l'air ou trous d'air formés dans un matériau diélectrique comme il est présenté sur la figure (1.3.a).

Structures déconnectées : représentent des motifs élémentaires d'indice n_1 supérieure à n_2 qui sont séparés par des espaces vides, créant ainsi des discontinuités dans la structure (Figure 1.3.b) [6].

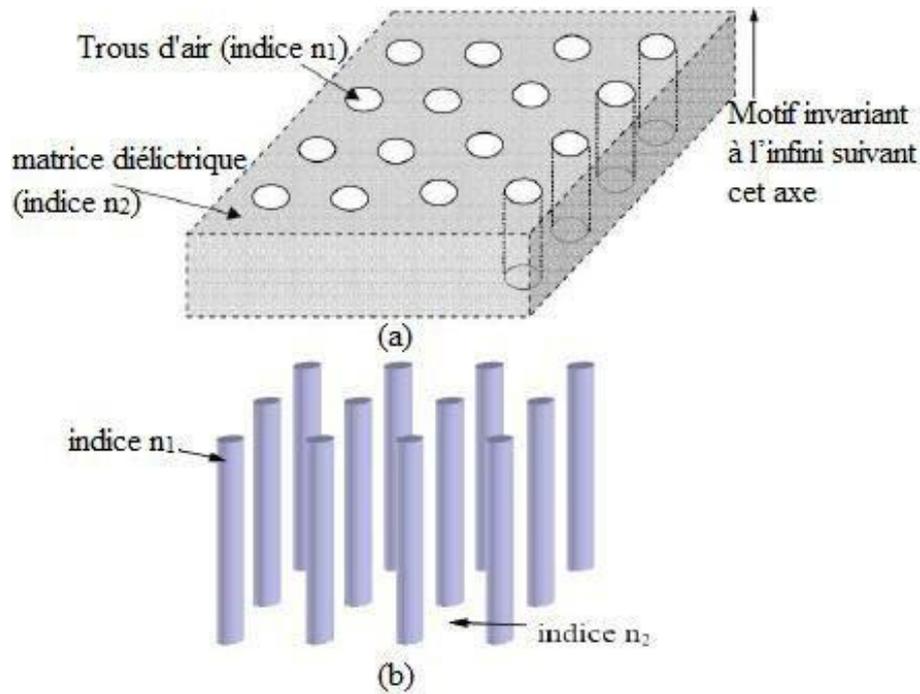


Figure 1.3. a) Structure connectée; b) Structure déconnectée [6]

1-3-2-1 Les familles des cristaux photoniques

Il existe différentes familles des cristaux photoniques 2D selon la forme du réseau périodique, on distingue :

1-Réseau carré : est une structure périodique dans laquelle les motifs se répètent de façon régulière et symétrique dans deux dimensions, créant ainsi une grille carré de côté « a » [7].

2-Réseau triangulaire : fait référence à un arrangement périodique de tiges ou de trous selon un motif triangulaire [8].

3-Réseau hexagonal : fait référence à un arrangement périodique de tiges ou de trous formant un motif hexagonal [9].

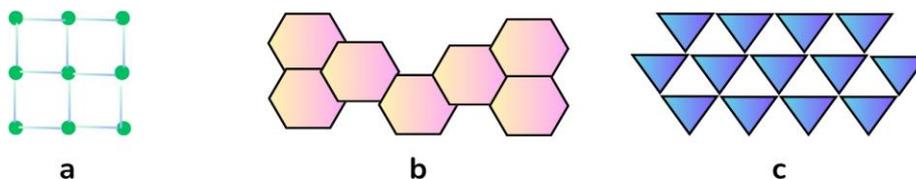


Figure 1.4. Représentation des réseaux : a) carré, b) hexagonal, c) triangulaire.

1-3-2-2 Diagramme de bande

Le diagramme de bande pour les cristaux photoniques 2D est un outil essentiel pour comprendre le comportement de la lumière dans ces structures. Il montre les états d'énergie permis et interdits pour la propagation de la lumière dans le cristal. Le champ électrique peut être décomposé en deux polarisations indépendantes, TE et TM.

Pour calculer les diagrammes de bandes, nous utilisons une approche similaire à celle utilisée en physique des matériaux. Nous savons que pour certains cristaux, en raison de leur symétrie particulière, nous pouvons limiter notre analyse à un ensemble spécifique de directions de propagation, représentées par des vecteurs d'onde k . Cette région restreinte est appelée la "zone de Brillouin irréductible".

À l'intérieur de cette zone, les vecteurs d'onde k varient le long des directions de haute symétrie qui font partie du réseau réciproque du cristal. En examinant les comportements de transmission le long de ces directions spécifiques, nous pouvons obtenir des informations cruciales sur la manière dont la lumière interagit avec le cristal et ses propriétés de transmission.

Nous présentons sur la figure (1.5) l'exemple des diagrammes de bande calculés pour un réseau carré et un réseau triangulaire [10].

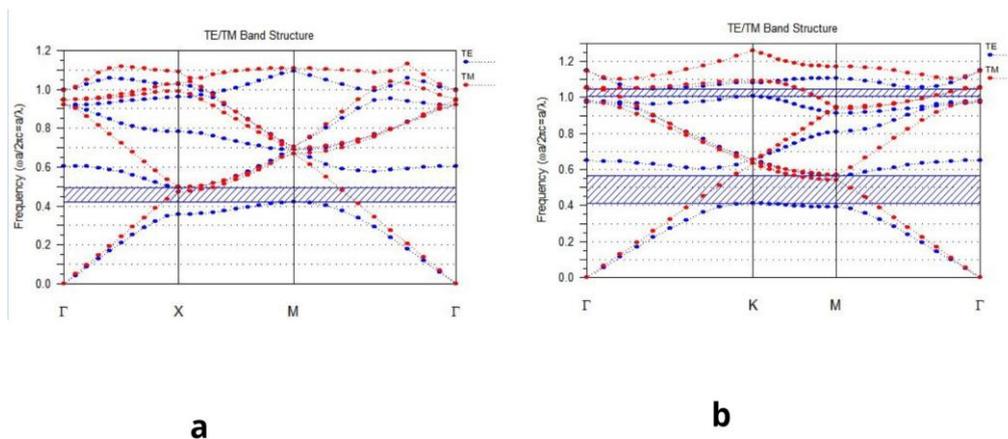


Figure 1.5. Diagrammes de bandes pour : a) réseau carré et b) réseau triangulaire.

1-3-2-3 Réseau réciproque

Le réseau réciproque est une notion importante pour décrire comment la lumière se propage à travers les cristaux photoniques, en particulier en ce qui concerne la bande interdite photonique.

Il est formé par la répétition périodique dans les trois dimensions de l'espace d'une maille élémentaire. Lorsque nous étudions les cristaux photoniques, nous représentons les diagrammes de bandes en fonction des composantes du vecteur d'onde k . Pour manipuler ce vecteur d'onde, nous utilisons une nouvelle base appelée base réciproque. Cette base est définie à partir des vecteurs de base du réseau direct (qui correspondent au réseau du cristal photonique dans l'espace physique) par une transformation spécifique.

1-3-2-4 Zone de Brillouin

La zone de Brillouin est une maille primitive dans l'espace réciproque d'un cristal, définie de manière unique en mathématiques et en physique du solide. Elle est associée à l'origine du réseau réciproque et joue un rôle crucial dans l'étude des propriétés des cristaux photoniques. Les zones de Brillouin, au nombre infini, sont définies à partir des plans de Bragg, qui sont des plans médiateurs formés par des combinaisons linéaires des vecteurs du réseau réciproque.

La zone de Brillouin irréductible est la plus petite zone permettant de déduire la relation de dispersion dans tout l'espace réciproque. Pour un réseau carré, elle est un triangle avec des sommets en des points de haute symétrie tels que M , Γ et X . Dans le cas d'un réseau triangulaire, la zone de Brillouin irréductible est également un triangle, mais avec des sommets correspondant à des points de haute symétrie comme M , Γ et K . Ces zones définissent les directions de haute symétrie que le vecteur d'onde peut parcourir, telles que $X\Gamma$, $M\Gamma$ et MX pour un réseau carré, ou $K\Gamma$, $M\Gamma$ et MX pour un réseau triangulaire.

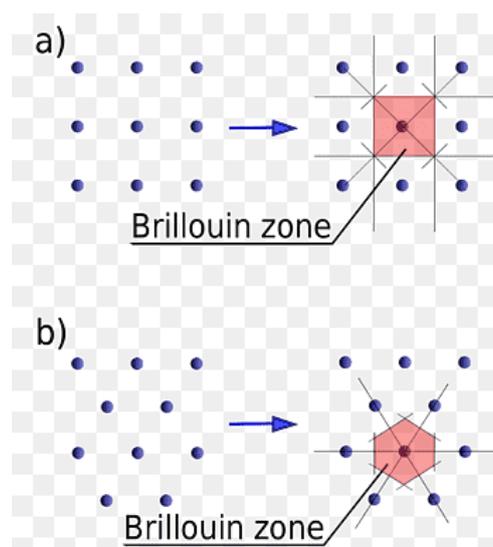


Figure 1.6. Représentation de la zone de Brillouin : a) dans un réseau carré, b) dans un réseau triangulaire.

1-3-2-5 Les modes TE et TM

Pour les réseaux bidimensionnels, il faut considérer deux directions de propagation au lieu d'une seule, comme pour les réseaux unidimensionnels. Il existe deux types de polarisation possibles pour les ondes électromagnétiques : la polarisation TE (transverse électrique) et la polarisation TM (transverse magnétique) (figure 1.7).

Les modes TE ont un champ électrique perpendiculaire à la direction de propagation, sans composante de champ magnétique dans la même direction. En revanche, les modes TM présentent un champ magnétique perpendiculaire à la direction de propagation, tandis que le champ électrique est parallèle à cette direction.[11].

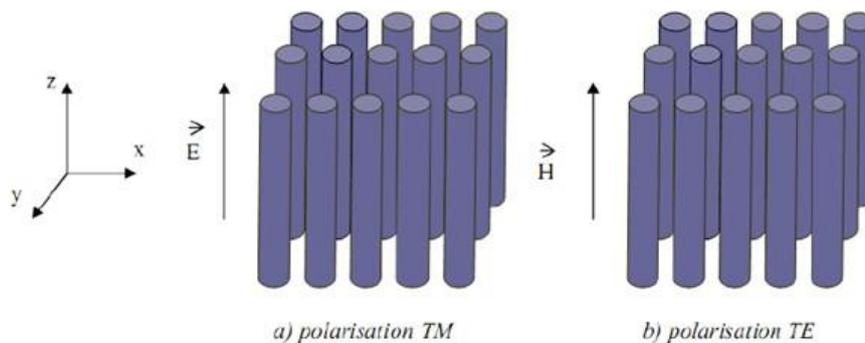


Figure 1.7. Représentation des polarisations TE et TM dans les cristaux photoniques 2D [12].

1-3-3 Cristaux photoniques 3D

Les cristaux photoniques tridimensionnels sont des structures constituées de matériaux diélectriques avec des indices de réfraction différents, arrangés périodiquement dans les trois directions. Ils sont les seules structures permettant d'obtenir une bande interdite complète pour toutes les directions de l'espace [13]. Il existe diverses méthodes pour fabriquer des structures en trois dimensions. Parmi celles-ci, deux approches ont attiré une attention particulière dans le domaine de la recherche.

1. **La structure yablonovite** : Créée initialement en 1993 par E. Yablonovitch, cette structure se caractérise par des trous cylindriques inversés disposés selon un motif en losange, comme le montre la figure (1.8). Elle est principalement proposée pour créer des cristaux photoniques avec une bande interdite photonique complète.

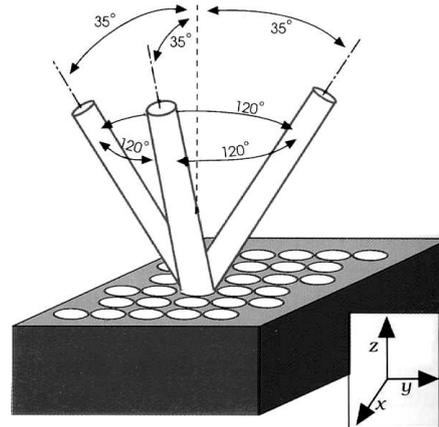


Figure 1.8. Exemple de cristal photonique tridimensionnel : la « Yablonoite » [14].

2. **La structure tas de bois** : Cette configuration consiste en des couches de silicium poreux (PSi) de différentes porosités empilées de manière alternée pour former une structure tridimensionnelle, comme le montre la figure (1.9) [15].

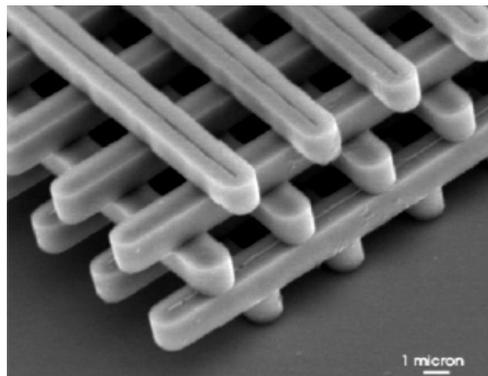


Figure 1.9. Structures tas de bois : Images MEB d'une structure fabriquée par lithographie UV dans du silicium [16].

1-3-4 Les cristaux photoniques naturelles

Ces structures existent dans la nature et ont des effets similaires sur la propagation des photons que les cristaux cités auparavant. A titre d'exemple on peut citer : les opales , les papillons, les oiseaux comme le montre la figure (1.10)[10]. Les plus parfait sont les cristaux photoniques naturelles trouvés dans l'opale qui est une roche minérale constituée de microbilles de silice réparties selon un arrangement plus ou moins régulier[17] .

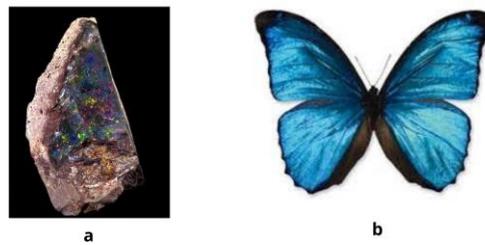


Figure 1.10. Représentation des cristaux photoniques naturels : a) L'opale, b) les papillons [10].

1-4 Défauts dans les cristaux photoniques

Les cristaux photoniques sont largement utilisés pour exploiter la bande interdite photonique, où la propagation de la lumière est interdite. Pour certaines applications, il est nécessaire d'introduire des défauts dans la structure périodique du cristal pour permettre la propagation à des fréquences spécifiques à l'intérieur de cette bande interdite. Ces défauts modifient localement la régularité du cristal, entraînant l'apparition de nouveaux modes permis pour les champs électromagnétiques dans le gap photonique, localisés autour de ces défauts. Parmi les défauts possibles, on distingue les défauts ponctuels, qui agissent comme des micro-résonateurs. [18, 19], et les défauts linéaires, qui permettent de guider les ondes lumineuses. En introduisant ces défauts, les cristaux photoniques peuvent être adaptés pour répondre à des besoins spécifiques dans diverses applications optiques et photoniques.[20, 21].

1-4-1 Défauts ponctuels

Il existe plusieurs façons de créer des défauts ponctuels dans les cristaux photoniques 2D : par le retrait, l'ajout ou la modification locale d'un ou plusieurs éléments du réseau périodique. Cela crée une microcavité à l'intérieur du cristal, ce qui permet de confiner et de contrôler la lumière à l'échelle nanométrique. Ces défauts ponctuels agissent comme des cavités optiques [22]. On distingue deux types de défauts : lacunaires et de substitution, comme le montre la figure (1.11).

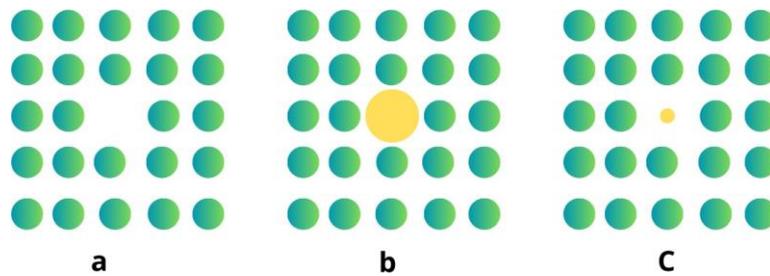


Figure 1.11. Défauts ponctuels : (a) Défaut lacunaire, (b) et (c) Défauts de substitutions.

Ces défauts ponctuels agissent comme des cavités optiques.

1-4-2 Défauts linéaires

Les défauts linéaires dans un cristal photonique 2D peuvent être créés suite à la suppression ou à la modification de la taille d'une ou plusieurs lignes de motifs, au changement d'indice de réfraction, ou encore par la modification de la distance entre les motifs élémentaires du réseau. Ces défauts linéaires, également appelés défauts 1D ou guides d'ondes W1, permettent de créer des guides de propagation de la lumière à l'intérieur du cristal photonique, en utilisant des fréquences appartenant à la bande interdite photonique du cristal. À l'intérieur de ces guides, des modes électromagnétiques peuvent se former, avec des fréquences correspondant à la bande interdite photonique, permettant ainsi un confinement efficace de la lumière dans ces structures. Un exemple de ces défauts est représenté sur la figure(1.12) [23].

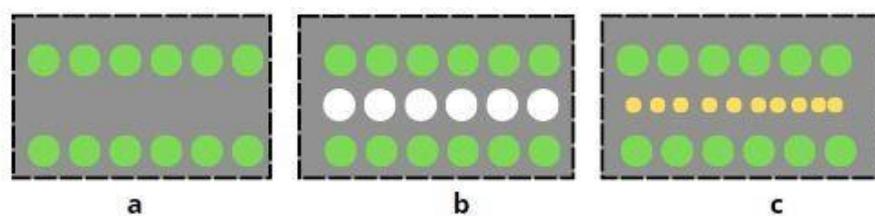


Figure 1.12. Exemples de défauts linéaires dans un cristal photonique 2D créés : (a) en omettant une seule rangée de motifs, (b) en modifiant l'indice de réfraction d'une seule rangée de motifs, (c) en variant le rayon d'une seule rangée de motifs de la structure.

1-5 Applications des cristaux photoniques

Les cristaux photoniques sont largement utilisés dans le domaine des télécommunications. On peut citer les filtres optiques, les fibres à cristal photonique, les microcavités, les capteurs, ... Dans cette partie, nous allons détailler quelques exemples :

1-5-1 Les fibres optiques

Les fibres à cristaux photoniques (PCF) offrent un large éventail d'applications dans le domaine des fibres optiques. Elles sont utilisées pour améliorer les communications optiques, notamment pour la transmission de données à très haut débit sur de longues distances. Les fibres optiques à cristaux photoniques sont des guides d'ondes diélectriques à symétrie circulaire, qui exploitent la modulation périodique de la permittivité diélectrique pour confiner la lumière (Figure. 1.13) . Les PCF présentent des avantages par rapport aux fibres optiques classiques, comme des bandes interdites photoniques permettant de contrôler la propagation de la lumière et d'augmenter l'efficacité de la transmission de données. De plus, les PCF sont utilisées pour la fabrication d'optiques capillaires : des guides d'ondes très fins et robustes. Ces capillaires peuvent être employés pour la transmission de données à très haut débit ainsi que pour des applications médicales telles que la fibroscopie [24].

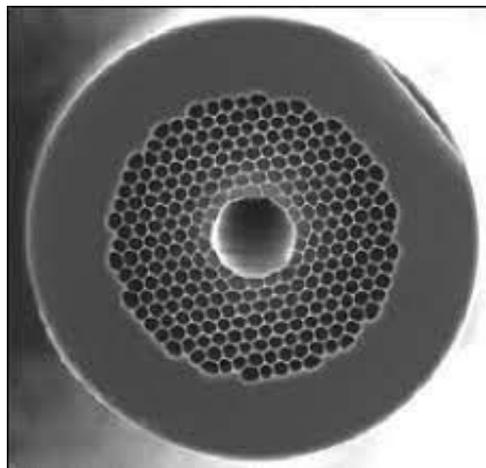


Figure 1.13. Exemple d'une fibre à cristaux photoniques.

1-5-2 Les filtres optiques

Les filtres basés sur des cristaux photoniques 2D offrent des performances élevées, notamment une transmittance élevée dans la bande passante, une réflectance élevée hors bande et une faible absorption parasite. Ils peuvent être utilisés pour créer des filtres bi-bandes sélectifs, permettant de sélectionner deux bandes de fréquences spécifiques et d'éliminer les autres. Dans les systèmes de communication optique, par exemple, ces filtres sont précieux pour séparer les signaux de données et les signaux de contrôle, améliorant ainsi l'efficacité globale du système.

De plus, les cristaux photoniques 2D peuvent être employés pour fabriquer des filtres à haute résolution spectrale. Ces filtres sont conçus pour sélectionner des bandes de fréquence très étroites, ce qui est crucial dans des applications telles que les spectromètres.[25].

1-5-3 Les démultiplexeurs

Les cristaux photoniques 2D sont très utiles dans les dispositifs de démultiplexage pour les systèmes de communication optiques. Ils contribuent à la création de dispositifs de démultiplexage qui transmettent efficacement, réduisent les interférences entre les signaux et occupent peu d'espace, facilitant ainsi leur intégration dans des circuits photoniques. Pour ce faire, différentes structures sont utilisées telles que les cavités ainsi que des guides d'ondes en forme de T ou de Y. L'analyse de ces dispositifs se fait à l'aide de méthodes telles que les différences finies dans le domaine temporel (FDTD) et l'expansion des ondes planes (PWE). Ces méthodes nous aident à comprendre leur fonctionnement et à garantir leur efficacité optimale.[26].

1-6 Technologies et matériaux

L'étude des matériaux et des technologies liées aux cristaux photoniques est essentielle pour comprendre leur conception, leur fabrication et leurs applications. Cette étude implique l'analyse des propriétés des matériaux utilisés, l'exploration de techniques de fabrication innovantes, ainsi que l'exploration des avancées technologiques qui nous permettent de manipuler et de contrôler la lumière à une échelle très petite. Ces efforts ouvrent la voie à de nouvelles applications passionnantes dans les domaines de l'optique et de la photonique.

1-6-1 Matériaux

Les matériaux utilisés dans les cristaux photoniques peuvent être divers. Les semi-conducteurs tels que le silicium (Si) et le gallium arséniure (GaAs) sont les matériaux les plus fréquemment

employés, ainsi que les polymères comme le polystyrène (PS)[27]. Les indices de réfraction de ces matériaux sont élevés, ce qui est crucial pour générer le contraste d'indice de réfraction requis pour le bon fonctionnement des cristaux photoniques. De plus, il est possible de produire des cristaux photoniques en utilisant des matériaux diélectriques tels que la silice (SiO_2) et le nitrure de silicium (Si_3N_4).

1-6-2 Technologies

La photonique intégrée sur silicium (Figure. 1.14) est une technologie qui consiste à utiliser les procédés de fabrication de l'industrie microélectronique pour réaliser des composants photoniques sur une plateforme de silicium. Cette technologie est considérée comme une technologie d'avenir critique en raison de ses avantages potentiels tels que la compacité, la diminution de la consommation, la possibilité d'intégration avec l'électronique et la réduction du coût de fabrication [28].

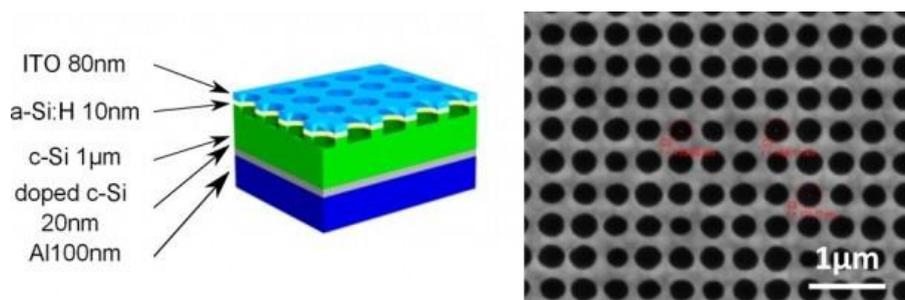


Figure 1.14. Cristal photonique sur une plateforme de silicium [29].

1-7 Techniques de modélisation

Les diverses approches employées pour décrire la propagation des ondes électromagnétiques dans les cristaux photoniques sont fondées sur des techniques couramment utilisées en électromagnétisme et en physique de l'état solide. Parmi les principales méthodes figurent la décomposition en ondes planes et la méthode des différences finies dans le domaine temporel

1-7-1 La méthode des ondes planes (PWE)

La technique utilisée pour étudier les propriétés optiques des cristaux photoniques 2D consiste à déterminer les fréquences pour lesquelles la lumière ne peut pas se propager dans ces structures. Cette méthode implique de résoudre l'équation d'onde dans le domaine fréquentiel en décomposant le champ électromagnétique en ondes planes. Elle permet ainsi de déterminer précisément la fréquence, la polarisation et la répartition du champ pour les modes d'une structure

photonique donnée. Cette approche est particulièrement adaptée à l'analyse des cristaux photoniques à périodicité infinie. Plusieurs chercheurs l'ont utilisée pour déterminer la bande interdite photonique des structures bidimensionnelles triangulaires et la structure du graphite.

Cependant, cette méthode n'est pas appropriée pour calculer la transmission à travers un cristal de taille finie ni pour étudier des structures complexes.

1-7-2 La méthode FDTD

La méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD, Finite Difference Time Domain) est très utile pour analyser la réponse spectrale de systèmes qui ne sont pas nécessairement périodiques, ainsi que pour calculer les distributions de champ dans des structures de taille finie. Contrairement à d'autres méthodes, elle ne nécessite aucune hypothèse initiale sur la forme des solutions ou des ondes se propageant dans la structure, ce qui la rend indépendante de la géométrie du système à modéliser. Cette approche consiste à discrétiser temporellement et spatialement les équations de Maxwell en remplaçant les dérivées partielles par des différences finies basées sur un développement de Taylor jusqu'à l'ordre deux. [30].

1-8 Conclusion

Les cristaux photoniques sont généralement des matériaux artificiels caractérisés par leur périodicité spatiale de la constante de permittivité, que ce soit en une, deux ou trois dimensions. Ce chapitre a exploré en détail cet univers fascinant, mettant en lumière les différentes catégories de cristaux, leurs matériaux et les technologies associées, ainsi que leurs multiples applications, notamment dans les communications optiques et les capteurs. De plus, nous avons étudié en profondeur les diagrammes de bandes pour comprendre comment ces structures influencent la propagation de la lumière. Ces avancées offrent un potentiel considérable pour le développement de nouvelles technologies optiques innovantes, susceptibles de révolutionner notre manière de communiquer et d'interagir avec le monde qui nous entoure.

Chapitre 2

Démultiplexeurs à
cristaux photoniques

2-1 Introduction

Dans le domaine des télécommunications et de l'optique intégrée, les démultiplexeurs à base de cristaux photoniques représentent une avancée significative. Ces dispositifs jouent un rôle essentiel dans la gestion efficace de la bande passante et le traitement des signaux en permettant la séparation des différentes longueurs d'onde dans un signal multiplexé sur une seule fibre, en différents canaux distincts. Cette technologie repose sur les propriétés uniques des cristaux photoniques, qui manipulent la propagation de la lumière à l'échelle nanométrique.

Dans ce chapitre, nous allons explorer le principe fondamental des démultiplexeurs à base de cristaux photoniques. Nous aborderons le démultiplexeur à cavité résonante ainsi que les différents types de cavités. Ensuite, nous examinerons en détail quelques topologies spécifiques. Enfin, nous terminerons par une conclusion qui récapitule tout ce que nous avons abordé.

2-2 Principe de démultiplexage à base des cristaux photoniques

Le démultiplexage utilisant les cristaux photoniques constitue une avancée majeure dans la gestion des signaux optiques au sein des réseaux de fibre optique. Il repose sur l'utilisation de structures périodiques qui manipulent la lumière de manière très précise grâce à leurs propriétés de bande interdite photonique. Leurs propriétés uniques sont exploitées pour séparer efficacement les différentes longueurs d'onde d'un signal multiplexé par répartition en longueur d'onde (WDM). Une seule fibre optique peut transmettre simultanément plusieurs signaux de longueurs d'onde différentes. Cette technologie permet d'obtenir des débits de transmission d'information très élevés. Le multiplexage est une technique qui permet d'injecter plusieurs signaux de différentes longueurs d'onde sur une même ligne de transmission. Le composant qui réalise cette opération est appelé un multiplexeur. Le démultiplexage est l'opération inverse du multiplexage. Il permet d'extraire, à partir d'un flux de données multiplexé, plusieurs longueurs d'onde bien distinctes les unes des autres. Le dispositif qui permet de réaliser cette opération de séparation des signaux est appelé un démultiplexeur [31]. La figure (2.1) montre cette opération.

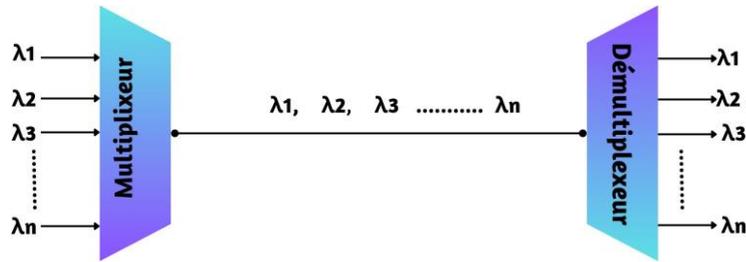


Figure 2.1. Le multiplexage et le démultiplexage WDM .

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

$$CT = 10 \log \left(\frac{\text{Transmission pour une longueur d’onde spécifique au port de sortie non souhaité}}{\text{Transmission pour une longueur d’onde spécifique au port de sortie souhaité}} \right)$$

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

Différentes techniques ont déjà été présentées dans la littérature afin de séparer plusieurs longueurs d’onde grâce aux cristaux photoniques. Les guides d’onde en cascade et les cavités résonantes [32] sont les dispositifs les plus couramment utilisés pour concevoir des démultiplexeurs optiques à base de CPs.

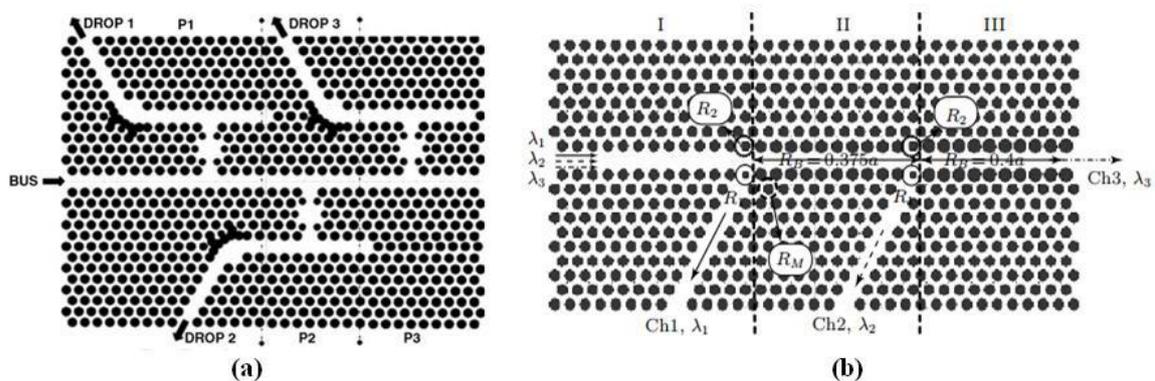


Figure 2.2. (a) Démultiplexeur à base de cavités résonantes en cascade, (b) démultiplexeur à base de guides d’onde.

2-3 Démultiplexeur à cavité résonante

Un démultiplexeur à cavité résonante est un composant optique qui divise un signal lumineux en plusieurs canaux distincts, chacun correspondant à une longueur d'onde spécifique. Il utilise des cavités résonnantes pour séparer le signal d'entrée. Ce type de démultiplexeur permet séparer plusieurs signaux optiques sur une seule fibre en les différenciant par leur longueur d'onde. Il présente de faibles pertes d'insertion et offre une bonne isolation entre les canaux [17].

2-4 Cavités à base de cristaux photoniques

Les cavités à cristaux photoniques sont des structures nanophotoniques qui permettent de confiner la lumière dans de petits volumes, offrant ainsi des facteurs de qualité élevés. Ces cavités sont obtenues lors de l'introduction d'un défaut ponctuel dans une structure périodique supposée parfaite, ce qui provoque la perturbation de sa périodicité. Le défaut se comporte comme une cavité entourée de miroirs, puisque les ondes à cette fréquence ne peuvent pas se propager dans le cristal photonique parfait [33].

Les cavités optiques sont définies par trois paramètres distincts. Le premier paramètre concerne la localisation et la présence des modes de résonance au sein de la bande interdite photonique, représentée par la longueur d'onde de résonance λ_0 . Le deuxième paramètre évalue la capacité du résonateur à stocker les photons résonants, exprimée par le facteur de qualité Q du mode de résonance. Enfin, le dernier paramètre évalue la capacité spatiale de la cavité à stocker un mode de résonance, représentée par le volume modal V .

2-4-1 Les différents types de cavités

Les types de cavités sont classés selon leur forme géométrique. Voici une description des différents types :

2-4-1-1 Cavité Hexagonale

Une cavité hexagonale est une forme géométrique caractérisée par six côtés égaux et six angles internes de 120 degrés chacun formant une symétrie parfaite [34]. Elles peuvent offrir une grande stabilité ce qui est un avantage dans certaine application architecturale et d'ingénierie. Un exemple de cavité hexagonale est représenté sur la figure (2.3).

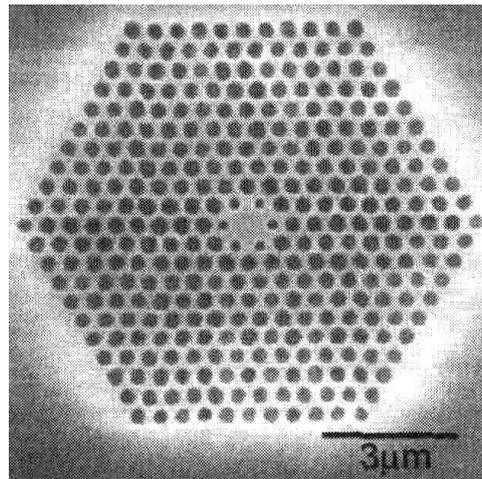


Figure 2.3. Cavité Hexagonale [35].

2-4-1-2 Cavité Linéique

Les cavités L_n dans les cristaux photoniques sont des structures linéaires où « n » trous consécutifs sont omis dans une rangée suivant la direction ΓK . Par exemple, les cavités L_3 , qui omettent trois trous, ont des modes avec des facteurs de qualité atteignant quelques milliers. Cependant, il est possible d'augmenter significativement ces facteurs de qualité. Des recherches, notamment par Akabane et ses collègues, ont montré qu'en optimisant la position des trous aux extrémités de la cavité, on peut obtenir un confinement progressif de la lumière, augmentant ainsi le facteur de qualité de ces cavités. En modifiant légèrement la structure linéaire des cavités, ils ont réussi à multiplier le facteur de qualité par 9, atteignant ainsi 45 000 contre 5 000 pour les cavités linéiques simples [36]. La figure (2.4) présente quelques exemples de cavité L_n à cristaux photoniques 2D .

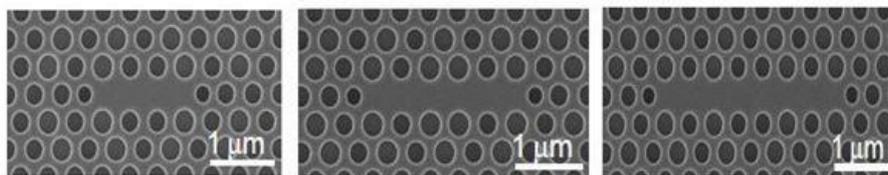


Figure 2.4. Exemples de cavités de types L_n : (a) cavité L_3 , (b) cavité L_5 et (c) cavité L_7 [37].

2-4-2 Facteur de qualité

Le facteur de qualité Q est une mesure de l'efficacité de la cavité à confiner la lumière. Il est défini comme le rapport de l'énergie stockée dans la cavité W à l'énergie perdue par cycle de la lumière oscillant à l'intérieur de la cavité P à la pulsation ω_0 . Le facteur de qualité Q est mathématiquement

donné par :

$$Q = \frac{\omega_0 W}{P} \quad (2.1)$$

Plus le facteur de qualité est élevé, moins il y a de perte d'énergie, ce qui signifie que la cavité est plus efficace pour confiner la lumière [38].

Une autre formulation du facteur de qualité est possible grâce à la représentation fréquentielle du champ qui est sous la forme d'une fonction de Lorentz (Figure. 2.5), centrée autour de ω_0 et avec une largeur à mi-hauteur $\Delta\omega$ (FWHM, full width at half maximum). En effet, le facteur de qualité peut être défini comme le rapport entre la fréquence de résonance ω_0 et la largeur spectrale à mi-hauteur $\Delta\omega$, ce qui se traduit par la formule suivante :

$$Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega} = \frac{\lambda_0}{\Delta\lambda} \quad (2.2)$$

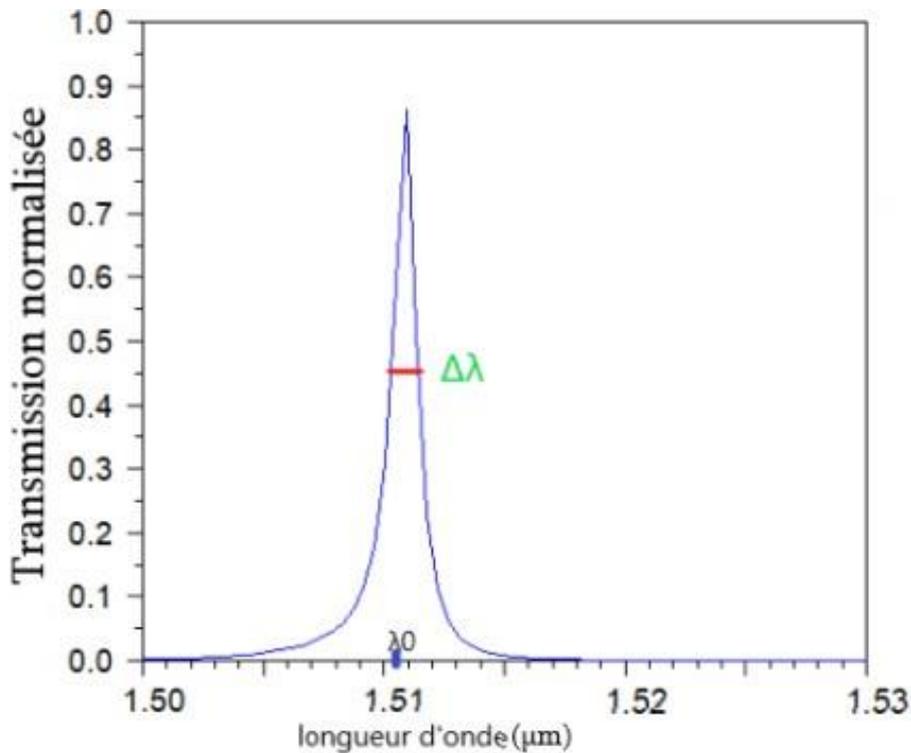


Figure 2.5. Réponse spectrale d'une cavité résonnante.

2-5 Quelques Topologie des démultiplexeurs

2-5-1 Première Topologie

En 2016, Absalan [41] a proposé un filtre à extraction conçu dans un cristal photonique bidimensionnel. Ce filtre est utilisé pour développer un démultiplexeur quatre canaux. Sa structure schématique est montrée sur la figure (2.6a). Ce démultiplexeur comporte un guide d'onde d'entrée et quatre cavités résonantes. Les différentes cavités sont créées en choisissant différents rayons pour les défauts de dimensions réduites, d'où quatre longueurs d'onde différentes. D'après les résultats de simulation, l'auteur a démontré l'efficacité de sa structure en séparant les quatre longueurs d'onde $\lambda_1 = 1.537 \mu m$, $\lambda_2 = 1.546 \mu m$, $\lambda_3 = 1.553 \mu m$ et $\lambda_4 = 1.560 \mu m$ avec des efficacités de transmission supérieures à 85 % et des niveaux de diaphonie compris entre -18 dB et -3 dB. Son spectre de transmission est illustré sur la figure (2.6b).

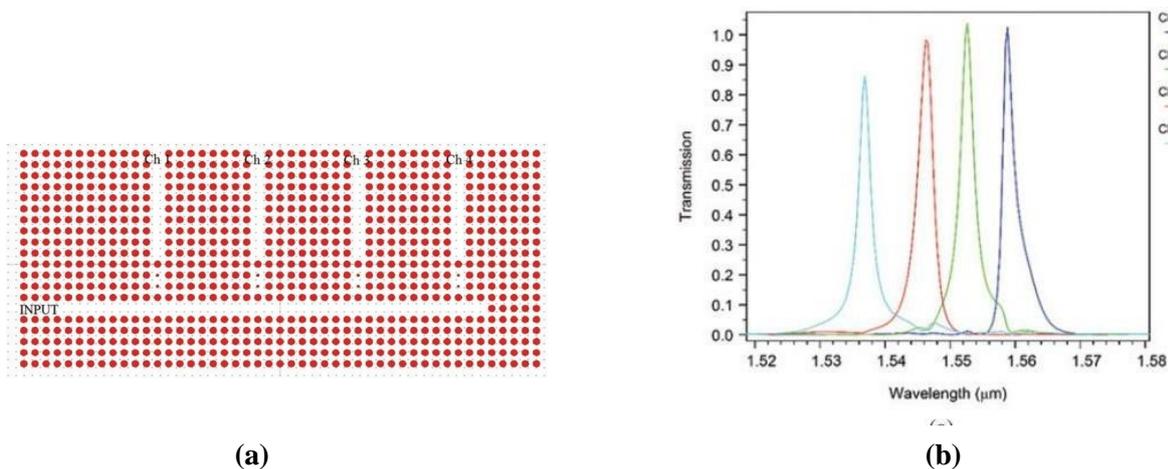


Figure 2.6. (a) Structure schématique du démultiplexeur proposé dans la référence[41] et (b) son spectre de transmission.

2-5-2 Deuxième Topologie

En 2017, Bouamami et al [42] ont proposé un démultiplexeur sept canaux en forme de Y, dans un cristal photonique bidimensionnel de réseau carré (Figure 2.7a). La sélection des différentes longueurs d'onde est réalisée par la modification du rayon du défaut de chaque cavité. En comparaison avec d'autres démultiplexeurs à base de cavités résonantes, leur structure est caractérisée par une dimension très réduite. D'après les résultats obtenus, ils ont confirmé la faisabilité de séparer les sept longueurs d'ondes : $1.345 \mu m$, $1.398 \mu m$, $1.411 \mu m$, $1.425 \mu m$, $1.472 \mu m$, $1.555 \mu m$, $1.639 \mu m$. Son spectre de transmission est illustré sur la figure (2.7b).

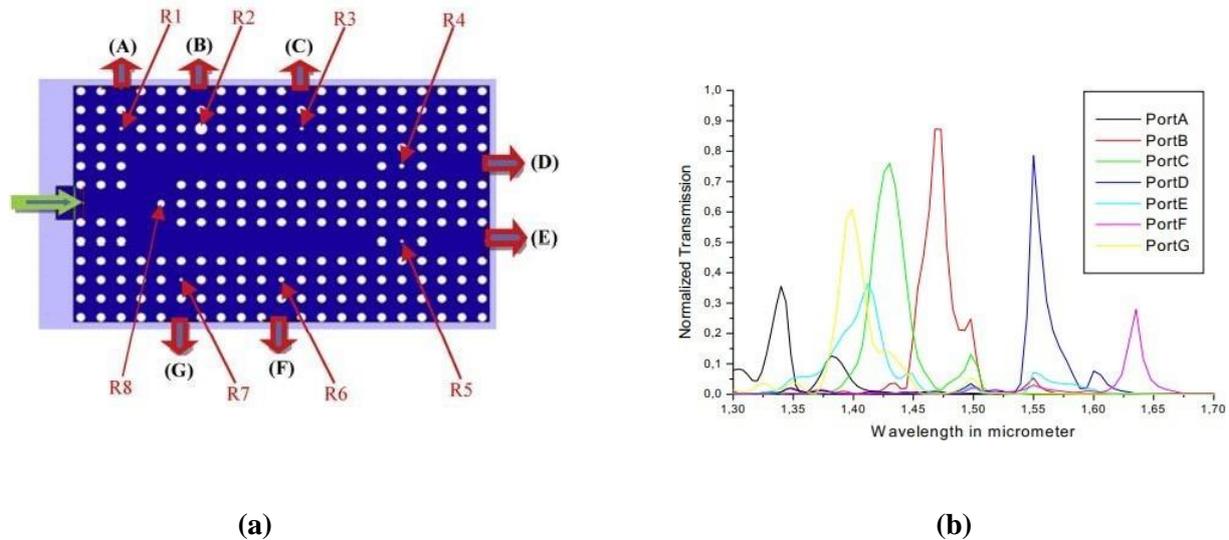


Figure 2.7. (a) Structure schématique du démultiplexeur proposé dans la référence [42] et (b) son spectre de transmission.

2-5-3 Troisième Topologie

En 2019, M. Ammari et al.[43] ont proposé un démultiplexeur à quatre canaux dans un cristal photonique bidimensionnel de réseau carré (Figure. 2.8). Le dispositif est composé de 5 ports, où le port d'entrée correspond au signal d'entrée et les ports A, B, C et D sont les ports de sortie. La représentation schématique de la structure est illustrée sur la figure (2.8 a). La figure (2.8 b) montre les spectres de transmission normalisés du démultiplexeur proposé. Les longueurs d'onde de sortie des canaux A, B, C et D sont respectivement $1.5604 \mu\text{m}$, $1.5613 \mu\text{m}$, $1.5625 \mu\text{m}$ et $1.5633 \mu\text{m}$.

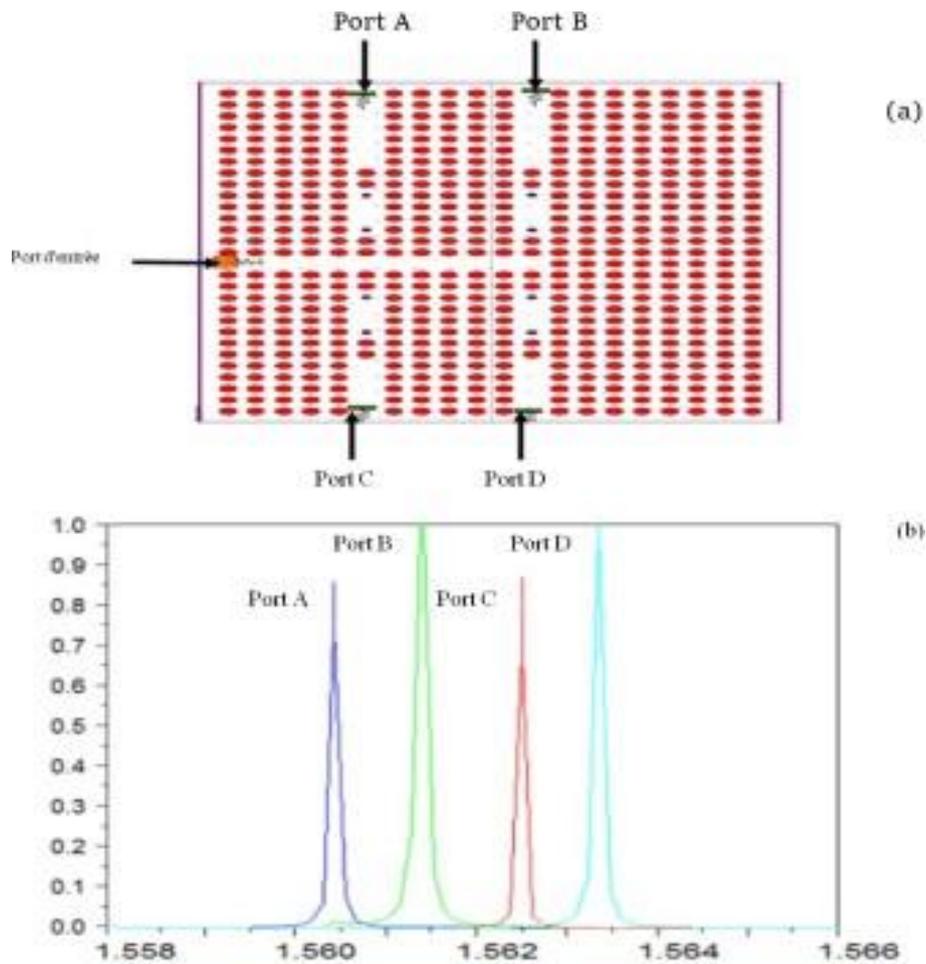


Figure 2.8. (a) Structure schématique du démultiplexeur proposé dans la référence [43] et (b) son spectre de transmission.

2-6 Conclusion

Les démultiplexeurs à base de cristaux photoniques offrent une solution avancée pour la gestion des signaux optiques dans les réseaux de télécommunications modernes. Leur capacité à séparer efficacement les différentes longueurs d'onde, tout en minimisant la diaphonie, les rend

essentiels pour les systèmes de communication à haut débit. Les différentes topologies et techniques présentées montrent le potentiel de cette technologie pour des applications diverses, soulignant l'importance de la recherche continue dans ce domaine pour améliorer les performances et l'efficacité des dispositifs optiques.

Chapitre 3

Résultats et

Interprétations

3-1 Introduction

Les démultiplexeurs à cristaux photoniques représentent une technologie avancée dans le domaine de l'optique intégrée, jouant un rôle crucial dans les systèmes de communication optique. Les cristaux photoniques sont des structures périodiques qui ont une capacité à manipuler et contrôler les propriétés de la lumière, tels que sa direction, sa vitesse et sa longueur d'onde. Ces cristaux sont utilisés pour séparer les différents canaux de longueur d'onde dans un signal optique multiplexé. Cela permet de transmettre plusieurs canaux de données à travers une seule fibre optique avec efficacité et une grande fiabilité.

Dans ce chapitre nous allons étudier des démultiplexeurs à base de cristaux photoniques bi-dimensionnels en utilisant la méthode (2D-FDTD). Notre premier objectif c'est la conception d'un filtre à cristaux photoniques, qui est l'élément clé de notre démultiplexeur. En nous appuyant sur les résultats que nous obtiendrons, nous démontrerons qu'il est possible de concevoir un démultiplexeur en longueurs d'onde à quatre canaux.

3-2 Présentation de logiciel

RSoft est un ensemble de logiciels dédiés à la conception et à la simulation des dispositifs photoniques, conçu pour répondre aux exigences des chercheurs et des ingénieurs. Il offre une suite complète d'outils pour la modélisation et la simulation de composants tels que les résonateurs optiques, les guides d'ondes et les circuits optiques. Parmi ces modules, on trouve : le RSoft CAD Environment qui fournit une plateforme intégrée pour le contrôle des modules de simulation , BeamPROP pour l'analyse des propagations d'ondes, FullWAVE pour la simulation électromagnétique complète, BandSOLVE pour la résolution des bandes de fréquences, et DiffractMOD pour l'étude des phénomènes de diffraction.

3-2-1 Fenêtre de RSOFT CAD

La fenêtre de RSOFT CAD est la zone de travail principale (Figure 3.1) . Elle est constituée de :

- **Barre de menus** : Située en haut de la fenêtre, elle donne accès à toutes les commandes et fonctions du logiciel .
- **Barre d'outils** : Regroupe les principaux outils et commandes sous forme d'icônes.
- **Barre d'état** : Donne des renseignements sur une position spécifique dans la structure.

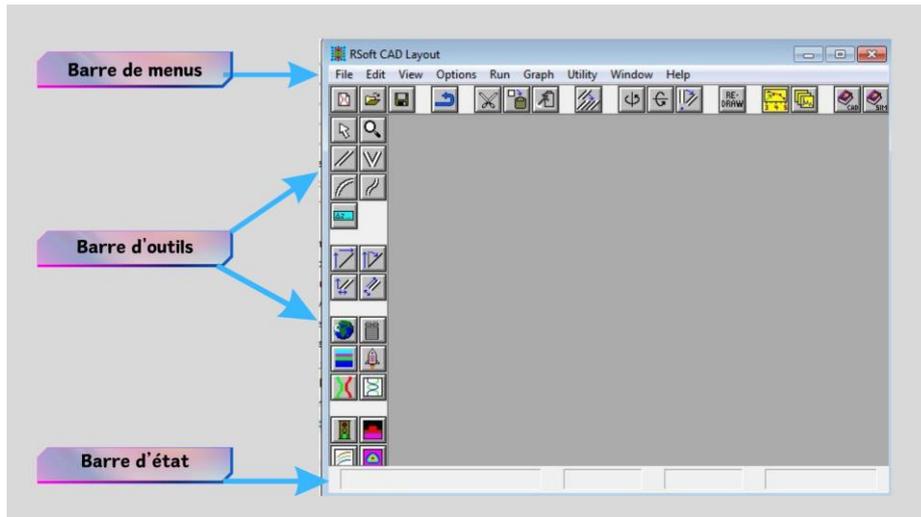


Figure 3.1. Fenêtre de RSOFT CAD.

3-2-2 Simulateur BandSolve

BandSOLVE est un module de simulation développé par Rsoft pour l'analyse des structures à bandes interdites photoniques. Cette méthode emploie la technique des ondes planes (PWE) pour déterminer les bandes interdites dans des structures périodiques. La fenêtre principale du simulateur BandSolve est représentée sur la figure (3.2).

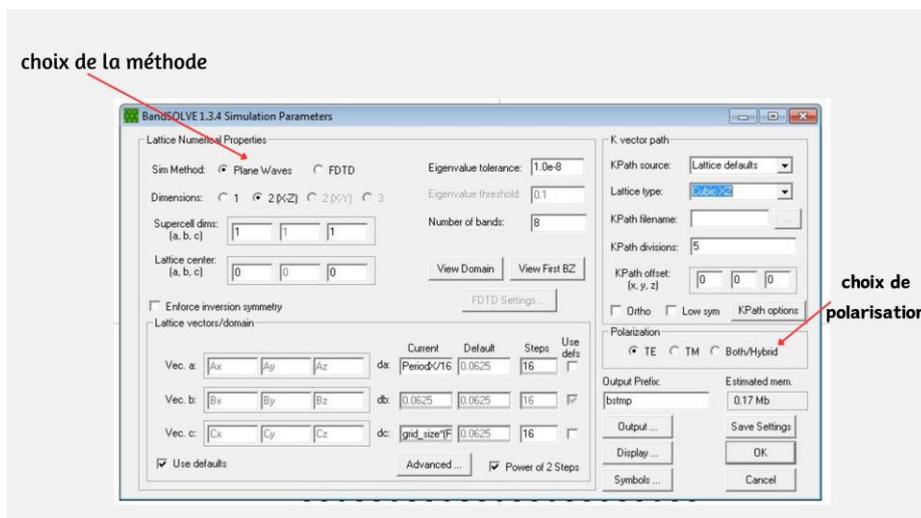


Figure 3.2. Fenêtre de BandSolve.

3-2-3 Simulateur Fullwave

Le simulateur FullWAVE est un outil de simulation intégré dans le logiciel RSoft . Il est basé sur la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD) pour simuler la propagation de la lumière dans des structures photoniques complexes. Son objectif principal est

de permettre aux utilisateurs de comprendre comment la lumière se propage dans ces structures, ce qui est essentiel pour concevoir et optimiser des dispositifs photoniques. La fenêtre principale du simulateur Fullwave est représentée sur la figure (3.3) .

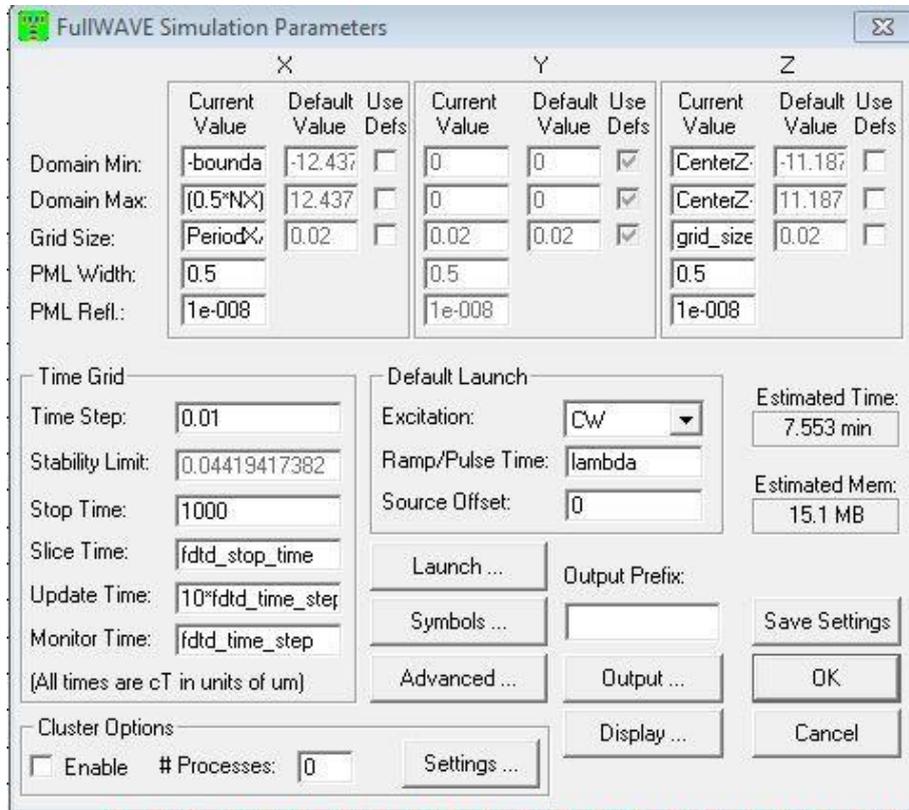


Figure 3.3. Fenêtre de Fullwave.

3-3 Structure sans défauts

Dans notre étude, nous avons choisi un cristal photonique bidimensionnel constitué de piliers à section circulaire disposés selon un réseau triangulaire avec une période de $a=0.6353\mu\text{m}$ ("a" représentant la distance entre les centres de deux motifs adjacents), immergés dans l'air dont l'indice de réfraction est $n_{\text{air}} = 1$. Le rayon des piliers est de $r = 0.2*a$ et leur indice de réfraction est $n=3.46$. La structure de base de notre cristal est composée de 20 piliers le long de l'axe "x" et de 20 piliers le long de l'axe "z". Le schéma de la structure est reporté sur la figure (3.4) .

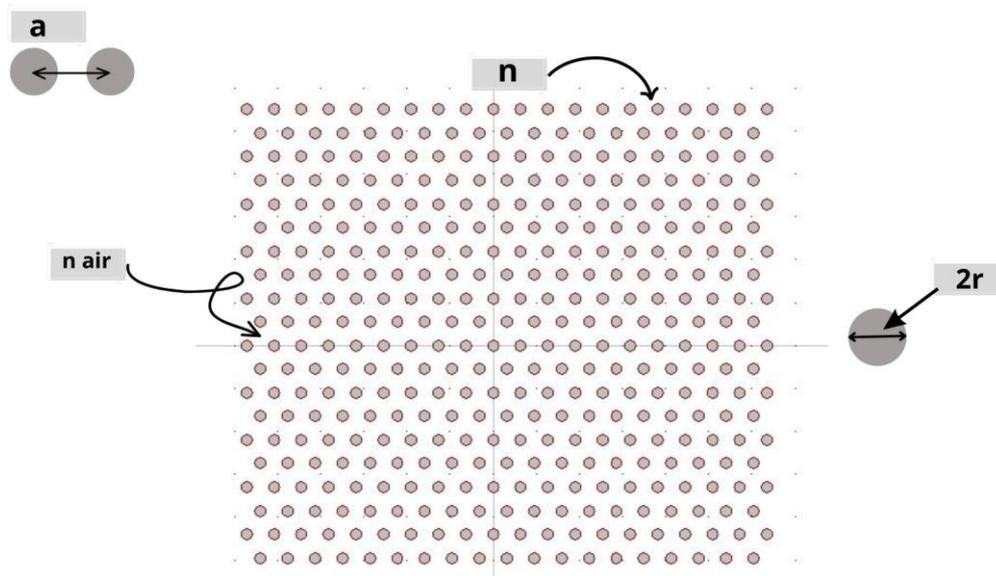


Figure 3.4. Représentation schématique de la structure d'étude.

Un cristal photonique est généralement caractérisé par son diagramme de bandes. La figure (3.5) présente le diagramme de bandes de la structure étudiée, calculé avec le logiciel de simulation Bandsolve de RSoft, basé sur la méthode des ondes planes (PWE). Grâce à ce calcul, nous pouvons identifier les bandes interdites photoniques (BIPs) du cristal considéré. Sur la figure (3.5), une bande interdite photonique est visible pour la polarisation TM, s'ouvrant pour des fréquences normalisées entre $0.275 < a/\lambda < 0.446$, ce qui correspond à des longueurs d'onde de $1.42 \mu\text{m} < \lambda < 2.31 \mu\text{m}$. Ainsi, une onde électromagnétique incidente perpendiculaire au réseau des tiges sera réfléchiée si sa fréquence se situe dans cet intervalle spectral.

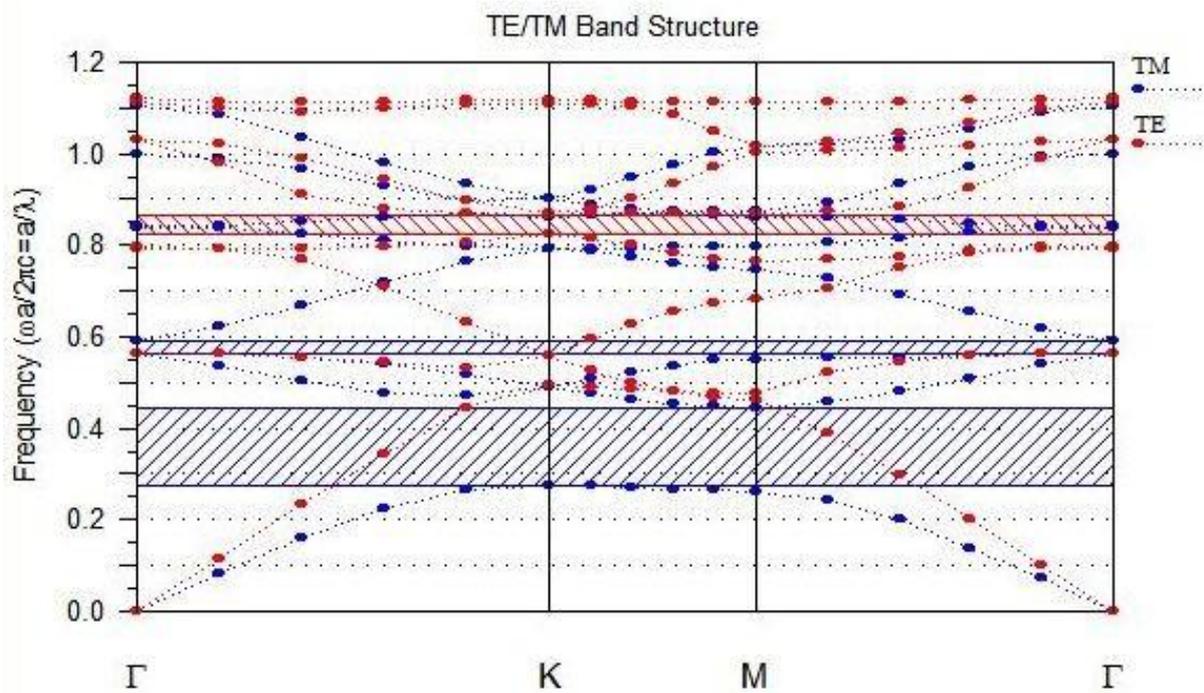


Figure 3.5. Diagramme de bandes de la structure étudiée .

3-4 Structure avec défauts

3-4-1 Filtre à cristaux photonique

Dans ce travail, nous allons étudier un démultiplexeur en longueur d'onde basé sur le couplage guide-cavité à cristaux photoniques. Mais avant d'entamer cette étude, nous allons d'abord nous intéresser à l'élément fondamental qui constitue le démultiplexeur : le filtre. La figure (3.6) représente la structure schématique de ce filtre.

La structure étudiée est formée de trois parties principales : La première partie est un défaut linéaire constituant un guide d'onde d'entrée, formé en supprimant plusieurs tiges dans la direction horizontale. La deuxième partie du filtre, la plus importante, est la cavité linéaire créée par le retrait de deux tiges de la structure. La troisième partie est un guide d'onde de sortie, formé par la suppression de quelques motifs de la structure. 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 ($L=9$).

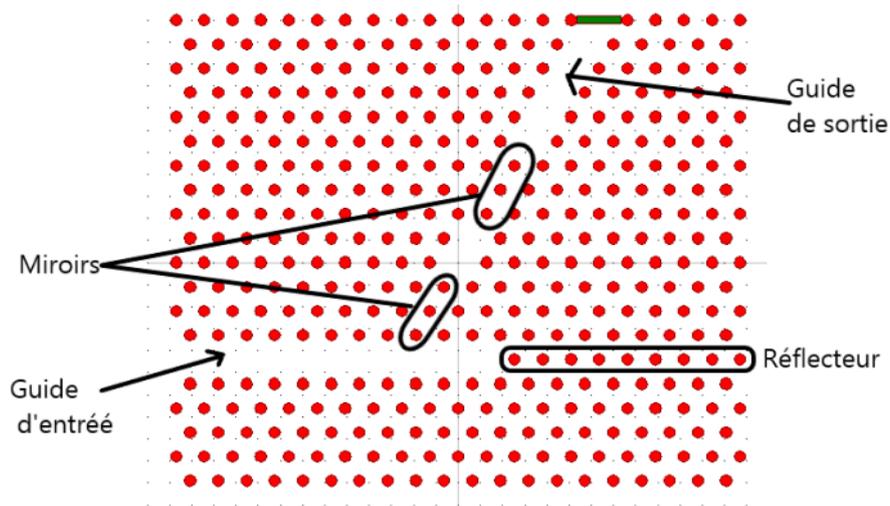


Figure 3.6. Représentation schématique du filtre proposé .

Après avoir simulé cette structure en utilisant le logiciel Fullwave, nous avons reportés les résultats sur la figure (3.7).

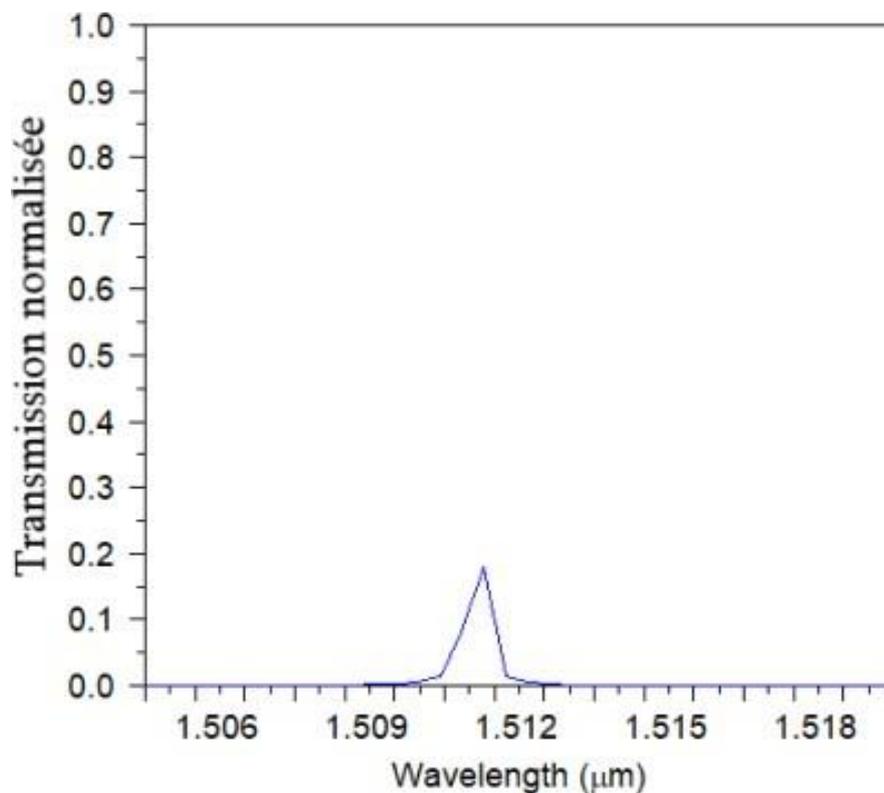


Figure 3.7. Spectre de transmission du filtre proposé.

Sur cette figure nous observons un pic résonant à la longueur d'onde $\lambda = 1.5109 \mu\text{m}$ caractérisé par un faible taux de transmission de 17.95% et un facteur de qualité de $Q=2519.66$. Afin d'améliorer ces caractéristiques nous allons modifier quelques paramètres dans la structure tel

que le nombre de tiges constituant les miroirs, la longueur du réflecteur et le rayon des tiges au bords de la cavité.

3-4-1-1 Effets des miroirs sur les caractéristiques du filtre

Dans cette section, nous fixons la longueur du réflecteur à $L = 9$ et explorons les performances du filtre pour des miroirs constitués de deux motifs $N = 2$. La figure (3.8) présente le spectre de transmission obtenu pour cette configuration spécifique. L'analyse de la courbe révèle une amélioration notable du taux de transmission (T), atteignant 76.95 % . Cependant, la courbe met également en évidence un facteur de qualité (Q) relativement faible de 1007.26.

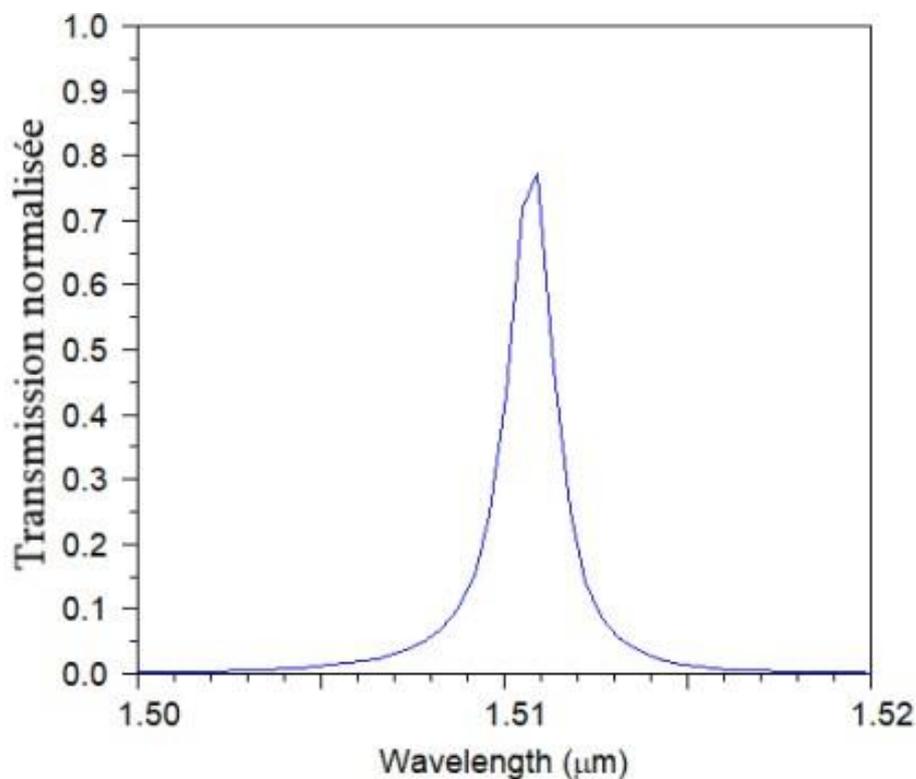


Figure 3.8. Spectre de transmission du filtre proposé pour $N=2$ et $L=9$.

3-4-1-2 Effets de la longueur du réflecteur sur les caractéristiques du filtre

Afin d'évaluer l'impact de la longueur du réflecteur sur les caractéristiques du filtre, nous avons réalisé une série de simulations numériques en faisant varier ce paramètre. Cette approche nous permet d'explorer la manière dont la longueur du réflecteur influence les performances du filtre. La figure suivante présente une comparaison des spectres de transmission obtenus pour $N = 2$ et différentes valeurs de la longueur du réflecteur. Cette analyse comparative permet d'évaluer l'impact du réflecteur sur les performances du filtre. Le résultat est résumé dans le

tableau (3.1).

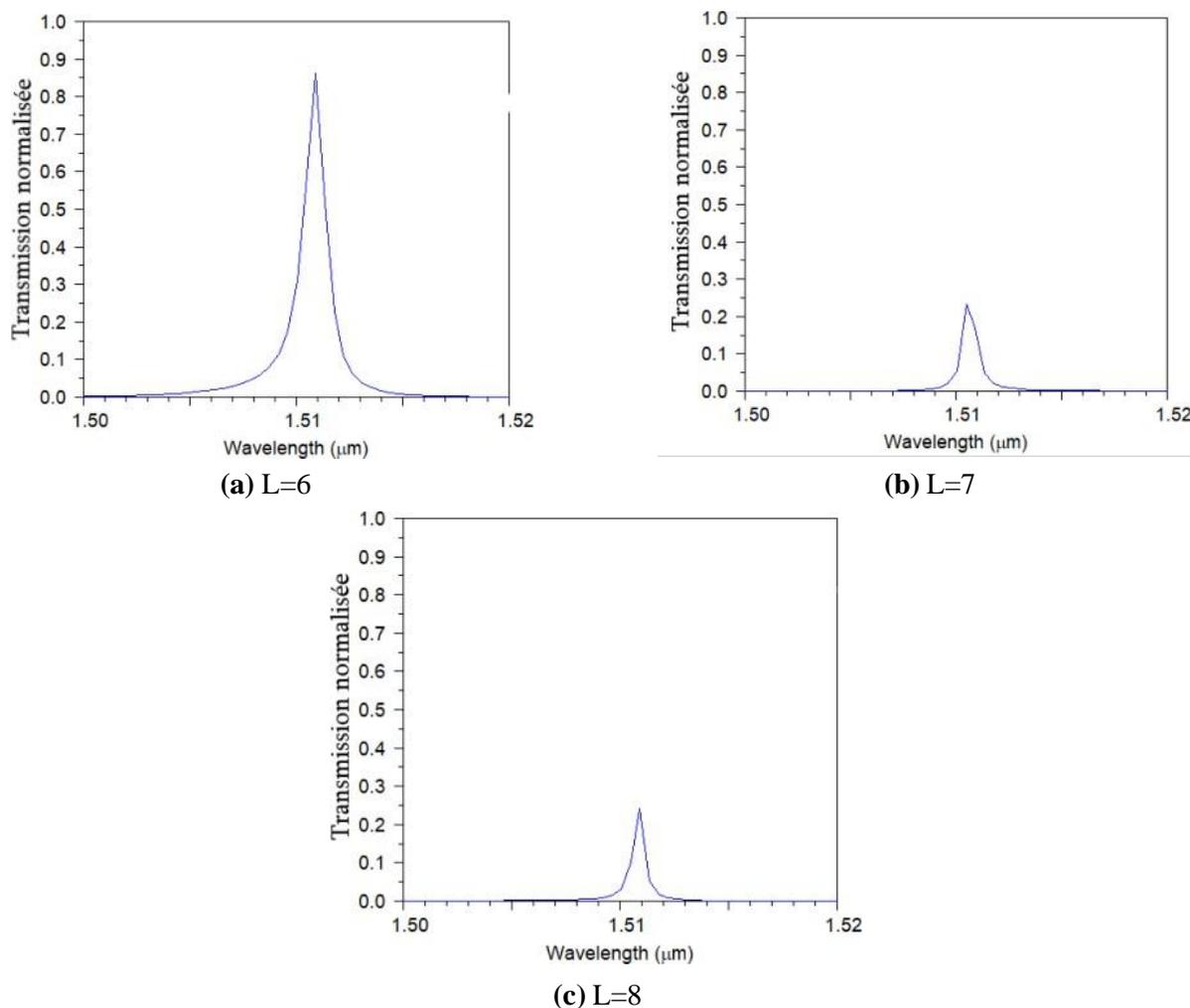


Figure 3.9. Spectres de transmission pour différentes longueurs du réflecteur.

Réflecteur	T(%)	Q
L=6	86.15	1162.23
L=7	23.34	1678
L=8	24.07	2158.42

Table 3.1. Caractéristiques du filtre pour N=2 et différentes valeurs de L.

L'analyse approfondie du tableau révèle des compromis entre l'amélioration du facteur de qualité et la transmission de la lumière pour différentes longueurs du réflecteur. Parmi les configurations explorées, la combinaison $N = 2$ et $L = 6$ se distingue comme le meilleur résultat, offrant un compromis optimal entre le facteur de qualité et la transmission de lumière. Cette configuration présente un facteur de qualité de 1162.23 et une transmission de 86.15 % .

3-4-1-3 Effets des rayons sur la longueur d'onde

Cette section s'intéresse à l'impact des rayons des tiges situées au bord de la cavité sur la longueur d'onde de résonance du filtre photonique. Pour mener cette analyse, nous considérons trois valeurs distinctes pour les rayons des tiges : $R_1 = 0.121 \mu\text{m}$, $R_2 = 0.133 \mu\text{m}$ et $R_3 = 0.139 \mu\text{m}$. Les résultats sont illustrés sur la figure (3.10).

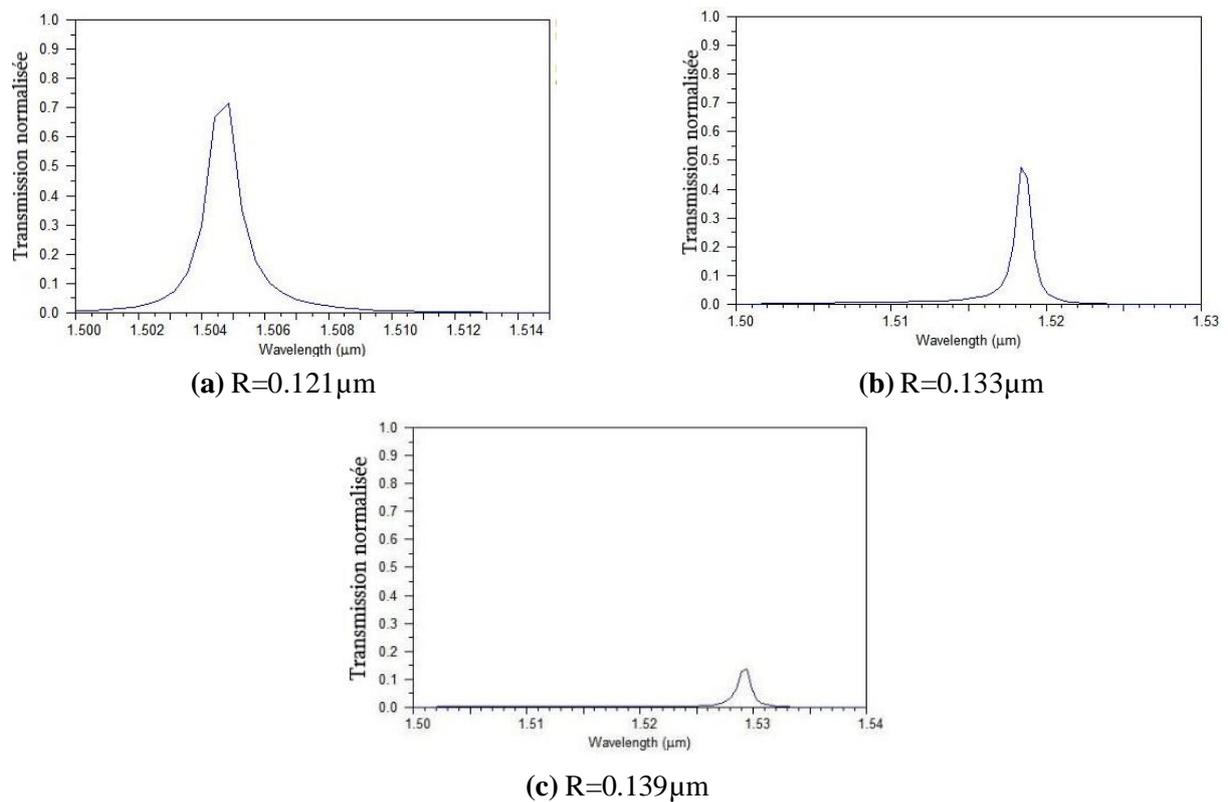


Figure 3.10. Spectres de transmission pour différentes valeurs de r .

Les résultats obtenus mettent en évidence une relation directe entre la modification du rayon des tiges et la variation de la longueur d'onde de sortie du filtre. Cette observation ouvre des perspectives intéressantes pour l'exploitation de cette spécification dans la conception de démultiplexeurs performants.

Afin de démontrer la performance du filtre, on simule la distribution du champ dans ce composant pour la longueur d'onde $\lambda = 1.5109 \mu\text{m}$. Le résultat est représenté sur la figure (3.11). On peut observer que, grâce au couplage entre le guide d'onde et la cavité à la longueur d'onde de résonance, le signal est entièrement extrait du guide d'onde d'entrée pour être transféré au guide d'onde de sortie.

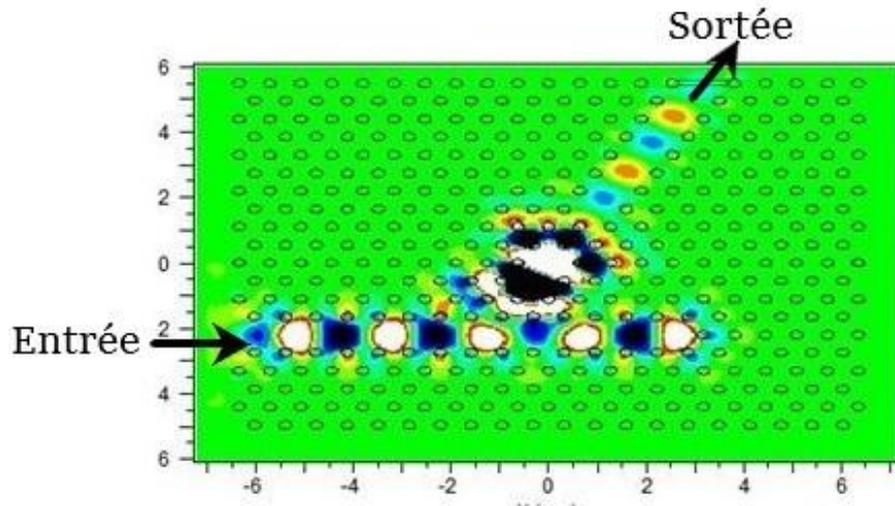


Figure 3.11. Représentation de la distribution du champ électrique pour le filtre pour $\lambda=1.5109\mu\text{m}$.

3-5 Démultiplexeur à base de couplage guide-cavité

En se basant sur les résultats précédemment obtenus, nous proposons de concevoir deux topologies de démultiplexeurs utilisant des cristaux photoniques bidimensionnels.

3-5-1 Première topologie

La première structure du démultiplexeur que nous proposons est illustrée dans la figure(3.12). Le démultiplexeur proposé peut séparer quatre longueurs d'onde. Il est composé d'un guide d'onde d'entrée et de quatre canaux de sortie. La sélection de la longueur d'onde de sortie pour chaque canal se fait par la variation du rayon des tiges situées aux bords de la cavité. Pour cela, nous avons considéré les rayons suivants : $R_1 = 0.121 \mu\text{m}$, $R_2 = 0.127 \mu\text{m}$, $R_3 = 0.133 \mu\text{m}$, $R_4 = 0.139 \mu\text{m}$ pour les canaux 1, 2, 3, 4 respectivement. Au départ, la distance entre chaque canal est fixée à quatre colonnes de tiges ($D=4$) et la longueur du réflecteur est définie par six tiges ($L=6$).

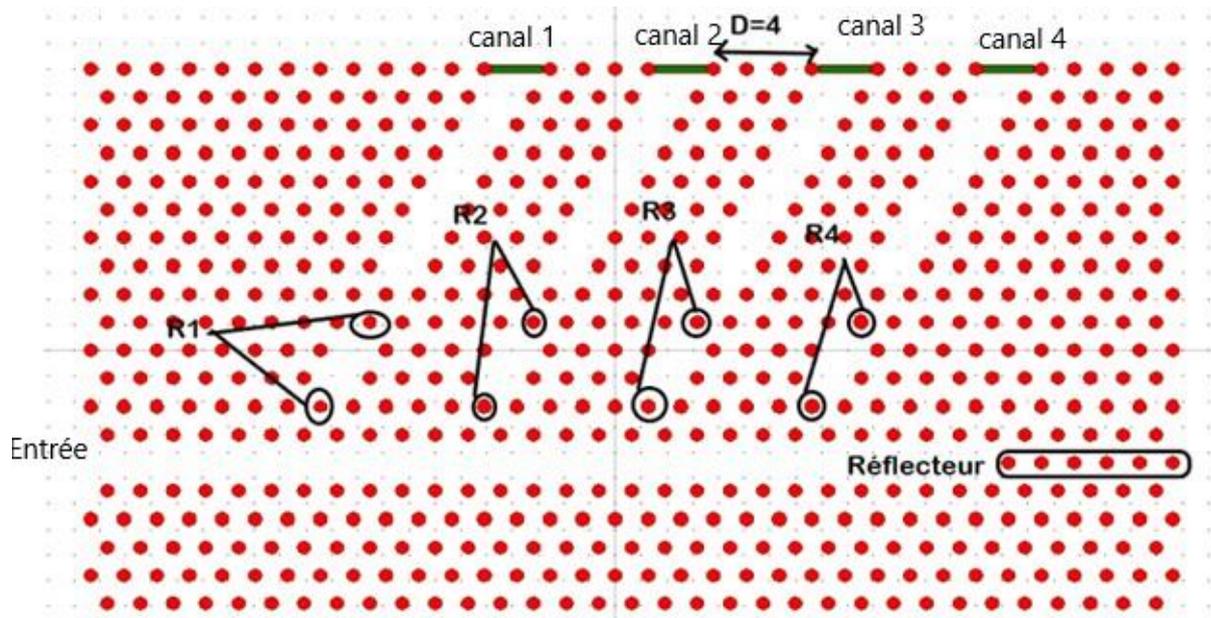


Figure 3.12. Représentation schématique de la structure de la première topologie.

Après avoir simulé cette structure en utilisant le logiciel Fullwave, nous avons reporté les résultats sur la figure (3.13). Cette figure illustre clairement la séparation de quatre longueurs d'onde à travers les sorties dédiées du dispositif. Les spécifications des quatre longueurs d'onde sont indiquées dans le tableau (3.2).

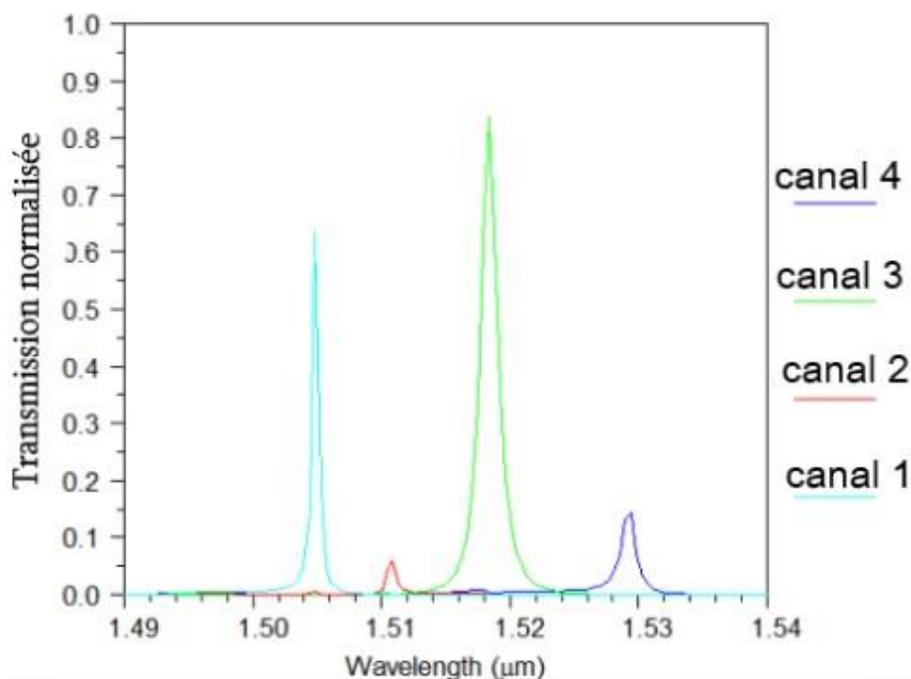


Figure 3.13. Spectre de transmission du démultiplexeur pour $D=4$ et $L=6$.

Canal	$\lambda(\mu\text{m})$	T(%)	Q	CT(dB)
1	1.5049	63.78	2508.16	-21.05
2	1.5109	5.849	1678.77	-12.89
3	1.5184	84.28	1012.26	-19.71
4	1.5294	14.136	1092.42	-26.73

Table 3.2. Caractéristiques du démultiplexeur pour $D=4$ et $L=6$.

Les résultats obtenus révèlent que les taux de transmission et les niveaux de diaphonie actuels du démultiplexeur ne répondent pas aux exigences attendues. Des améliorations significatives sont nécessaires pour garantir des performances optimales et répondre aux besoins des applications visées. Pour améliorer les caractéristiques du démultiplexeur, il est crucial d'identifier les paramètres clés qui influencent son comportement et de les optimiser de manière appropriée.

3-5-1-1 Effets de la distance entre les canaux sur les caractéristiques du démultiplexeur

Cette section explore l'influence de l'espacement entre les canaux de sortie sur les performances du démultiplexeur. Pour illustrer cet effet, les spectres de transmission obtenus pour deux valeurs différentes de l'espacement entre les canaux ($D = 5$ et $D = 6$) sont présentés dans la figure (3.14). Le tableau (3.3) résume les résultats obtenus.

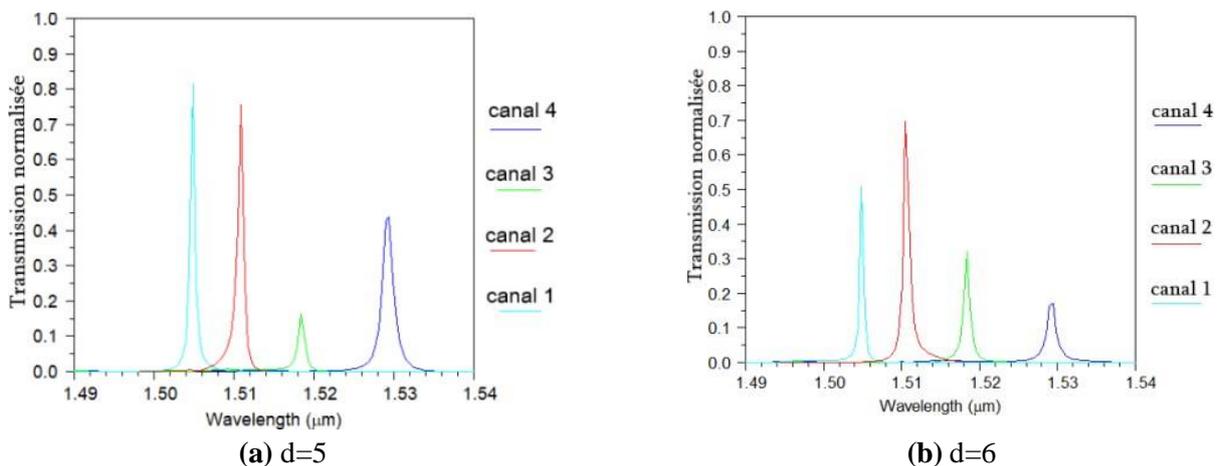


Figure 3.14. Spectre de transmission du démultiplexeur pour différentes valeurs de D .

Caractéristiques	D=4			D=5			D=6		
	T(%)	Q	CT(dB)	T(%)	Q	CT(dB)	T(%)	Q	CT(dB)
Canal 1	63.78	2508.16	-21.05	81.33	2149.7	-22.11	50.80	2508	-27.08
Canal 2	5.849	1678.77	-12.89	75.52	1888	-22.76	69.60	1078	-28.42
Canal 3	84.28	1012.26	-19.71	16.26	1518.4	-22.11	31.90	1678	-19.01
Canal 4	14.136	1092.42	-26.73	43.78	899.64	-27.38	17.19	1176	-25.36

Table 3.3. Caractéristiques du démultiplexeur proposé pour différentes valeurs de D.

En analysant les résultats du tableau, on constate que l'espacement des canaux affecte les caractéristiques du démultiplexeur. En considérant l'ensemble des caractéristiques analysées, il apparaît que l'espacement $D = 5$ offre un compromis optimal entre sélectivité spectrale élevée, niveau de transmission acceptable et diaphonie minimale. Cette configuration permet de maximiser la capacité du démultiplexeur à séparer efficacement les longueurs d'onde tout en maintenant un niveau de performance global satisfaisant.

3-5-1-2 Effets de la longueur du réflecteur sur les caractéristiques du démultiplexeur

La figure (3.15) illustre les spectres de transmission pour une distance $D=5$ et différentes valeurs du réflecteur' L' . Le tableau (3.4) indique les spécifications des changements obtenus, en considérant quatre différentes longueurs $L=3$, $L=4$, $L=5$ et $L=6$.

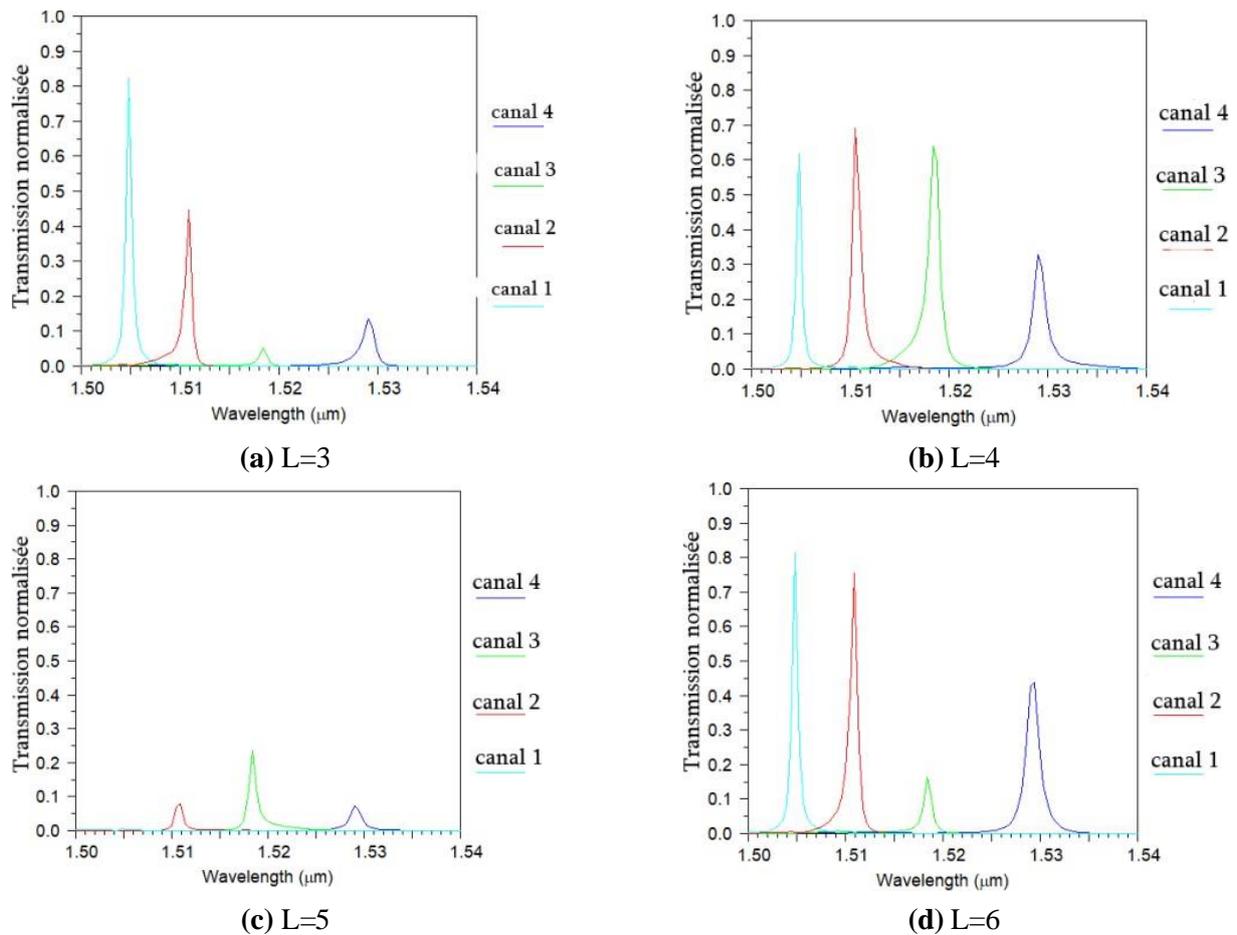


Figure 3.15. Spectres de transmission pour différentes valeurs du réflecteur.

Caractéristiques	L=3			L=4			L=5			L=6		
	T(%)	Q	CT(dB)	T(%)	Q	CT(dB)	T(%)	Q	CT(dB)	T(%)	Q	CT(dB)
Canal 1	82.2	2149.85	-22.15	61.91	2508	-23.14	0.68	1672.11	-8.80	81.3	2149.7	-22.11
Canal 2	44.68	2158	-19.51	69.02	1678.33	-19.93	7.7	1510.9	-20	75.52	1678	-19.23
Canal 3	54.45	1687	-27.35	64.07	1265	-18.06	23.71	1687	-23.71	16.25	1518.4	-22.18
Canal 4	13.43	1019	-28.27	33	1092.14	-28	7.145	1176.15	-21.55	43.8	899	-36

Table 3.4. Caractéristiques du démultiplexeur pour différentes valeurs de L.

A partir de ce tableau comparatif, on constate que la variation de la longueur du réflecteur influe sur les performances de notre démultiplexeur. Les meilleures caractéristiques de notre dispositif sont relevées pour L=4.

La distribution du champ dans le démultiplexeur correspondant aux longueurs d'onde à la sortie des canaux 1, 2, 3 et 4 est représentée sur la figure(3.16). Sur cette figure, il est clairement visible que les longueurs d'onde $\lambda_1 = 1.5048 \mu m$, $\lambda_2 = 1.5105 \mu m$, $\lambda_3 = 1.5184 \mu m$ et $\lambda_4 = 1.5294 \mu m$ sont extraites du guide d'onde d'entrée et transférées aux guides d'onde de

sortie.

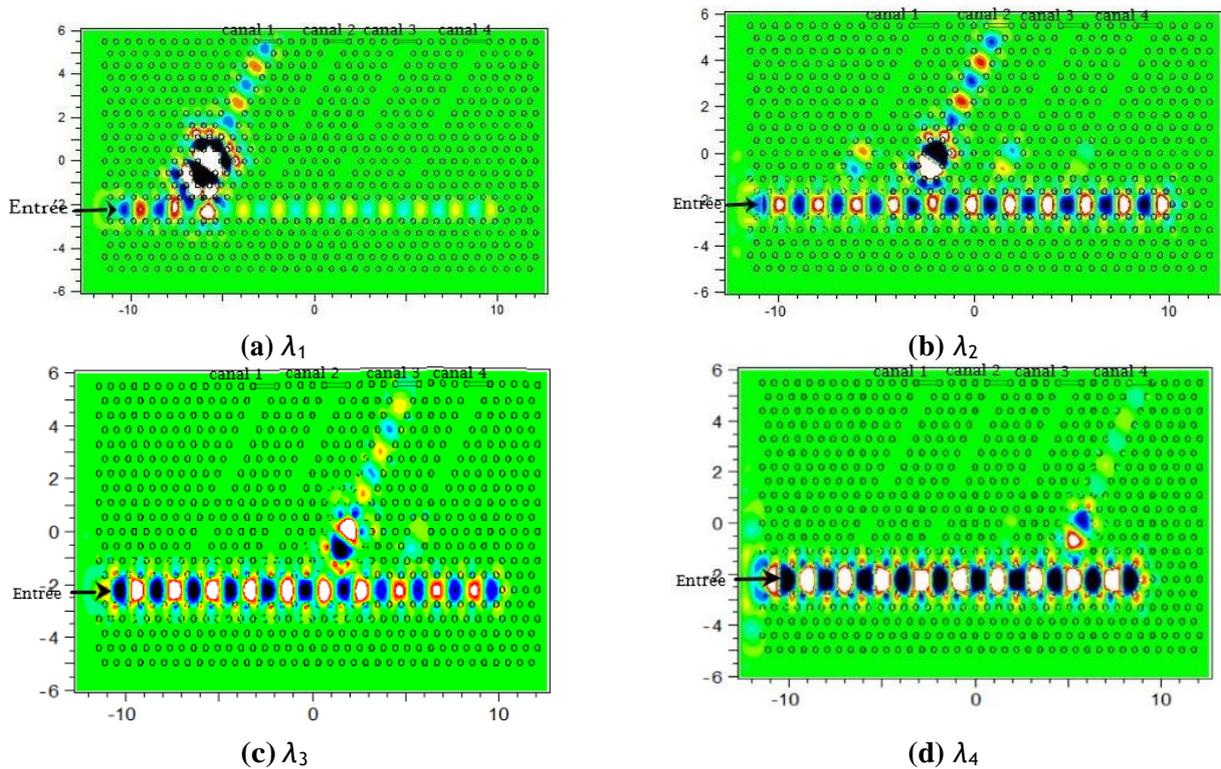


Figure 3.16. Représentation de la distribution du champ électrique du démultiplexeur pour (a) $\lambda_1 = 1.5048 \mu m$, (b) $\lambda_2 = 1.5105 \mu m$ (c) $\lambda_3 = 1.5184 \mu m$, (d) $\lambda_4 = 1.5294 \mu m$.

3-5-2 Deuxième topologie

La deuxième structure du démultiplexeur que nous proposons est illustrée dans la figure(3.17). Le démultiplexeur proposé peut séparer quatre longueurs d'onde. Il est composé d'un guide d'onde d'entrée et de quatre canaux de sortie (2 canaux en haut et 2 en bas). La sélection de la longueur d'onde de sortie pour chaque canal se fait par la variation du rayon des tiges situées aux bords de la cavité. Pour cela, nous avons considéré les rayons suivants : $R_1 = 0.121 \mu m$, $R_2 = 0.127 \mu m$, $R_3 = 0.133 \mu m$, $R_4 = 0.139 \mu m$ pour les canaux 1, 2, 3, 4 respectivement. Au départ, la distance entre chaque canal est fixée à quatre colonnes de tiges ($D=4$) et la longueur du réflecteur est définie par six tiges ($L=6$).

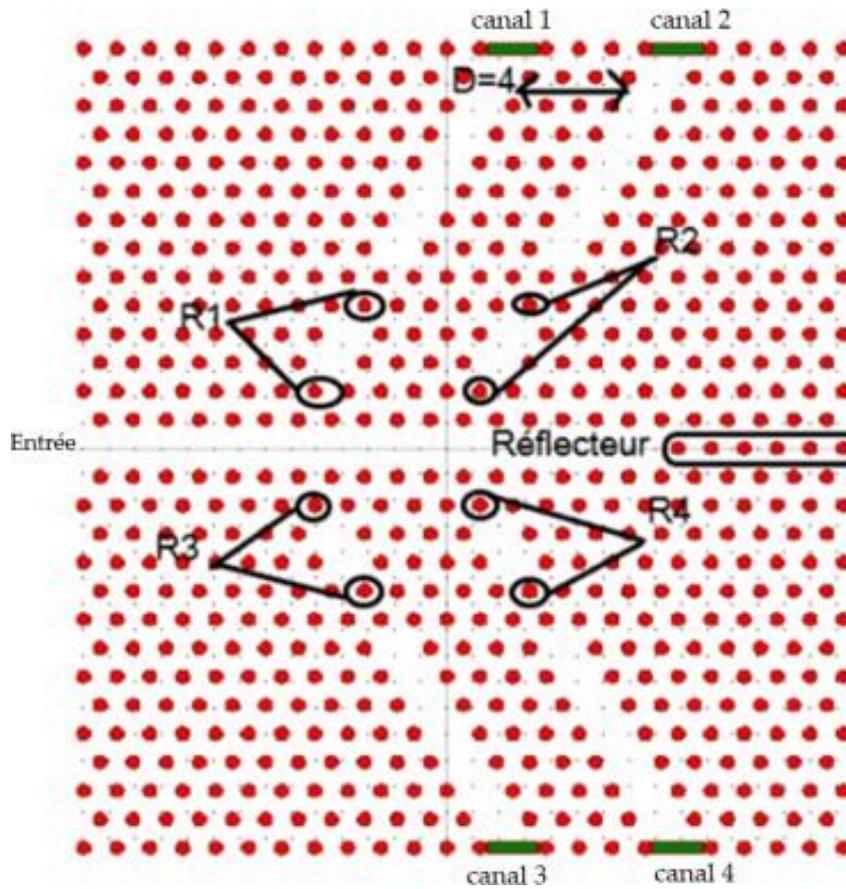


Figure 3.17. Représentation schématique de la deuxième topologie du démultiplexeur.

Afin de simuler la structure proposée, nous avons utilisé le logiciel FullWave basé sur la méthode 2D-FDTD. Les résultats obtenus sont représentés sur la figure (3.18). Sur cette figure nous observons l'existence de quatre pics résonants à $\lambda_1 = 1.5048 \mu m$, $\lambda_2 = 1.5105 \mu m$, $\lambda_3 = 1.5184 \mu m$, et $\lambda_4 = 1.5294 \mu m$ obtenus à la sortie des canaux 1, 2, 3 et 4, respectivement. Les spécifications des quatre longueurs d'onde sont indiqués dans le tableau (3.5).

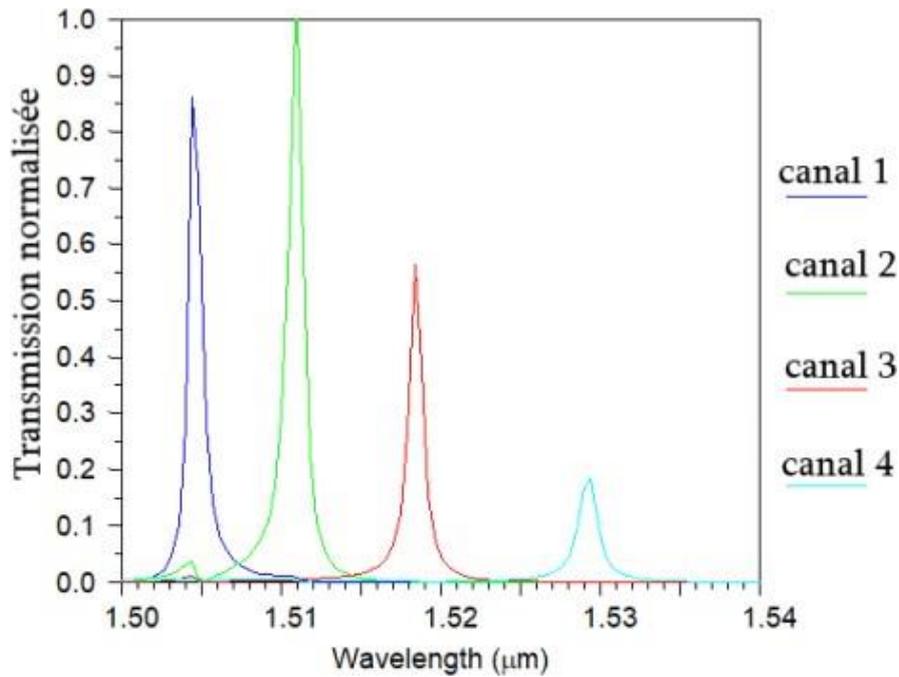


Figure 3.18. Spectre de transmission de la deuxième topologie.

Canal	$\lambda(\mu\text{m})$	T(%)	Q	CT (dB)
1	1.5048	86.27	1504.4	-11.99
2	1.5109	100	1373.54	-20.69
3	1.5184	56.42	1380.36	-20.52
4	1.5294	18.48	1092.48	-22.66

Table 3.5. Caractéristiques du démultiplexeur pour $D=4$ et $L=6$.

D'après le tableau, on constate que le niveau de diaphonie entre les canaux de la structure est compris entre -11.99 et -22.66 dB et que la transmission est très faible pour le quatrième canal. Afin d'améliorer ces résultats nous allons modifier deux paramètres clés : la distance entre les canaux et la longueur du réflecteur. En manipulant judicieusement ces paramètres, nous pouvons optimiser les performances de notre démultiplexeur, améliorant ainsi sa capacité à séparer efficacement les différentes longueurs d'onde et à transmettre la lumière avec de faibles pertes.

3-5-2-1 Effets de la distance entre les canaux sur les caractéristiques du démultiplexeur

Dans cette partie nous allons étudier l'effet de la distance entre les canaux sur les performances du démultiplexeur. Les spectres de transmission sont reportés sur la figure (3.19). Le tableau (3.6) résume les résultats obtenus en considérant trois différentes distance.

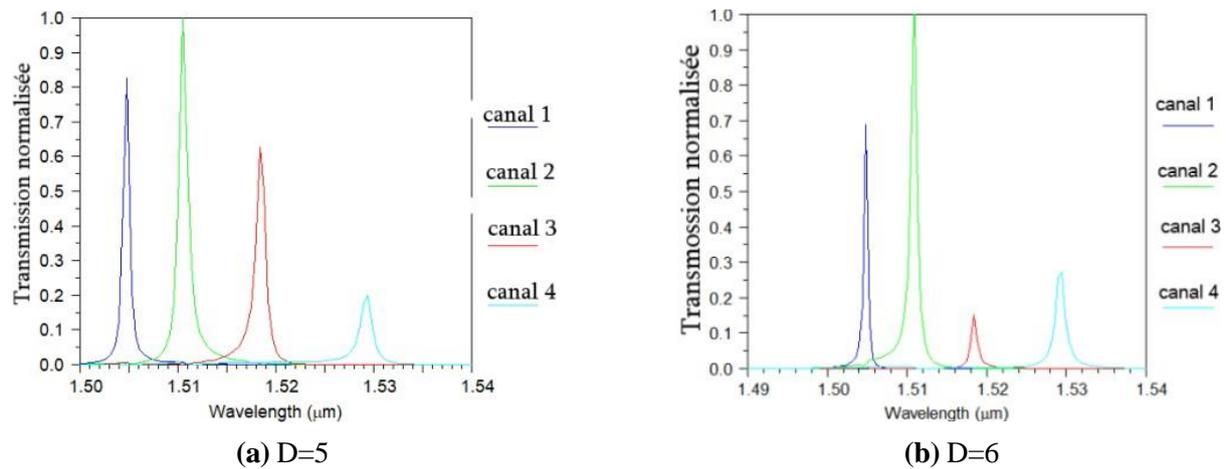


Figure 3.19. Spectre de transmission pour différentes valeurs de D.

Caractéristique	D=4			D=5			D=6		
	T(%)	Q	CT(dB)	T (%)	Q	CT(dB)	T(%)	Q	CT(dB)
Canal 1	86.27	1504.4	-11.99	82.55	1881	-18.37	68.5	3009.8	-18.02
Canal 2	100	1373,5	-20,69	100	1510,5	-17.25	100	1678	-23.12
Canal 3	56.42	1380.36	-20.52	62.6	1265	-18.93	15.07	1687.11	-17.46
Canal 4	18.48	1092	-22.66	19.86	1092.42	-28.20	27.3	1019.6	-27.37

Table 3.6. Caractéristiques du démultiplexeur proposé pour différentes valeurs de D.

Les résultats reportés sur ce tableau montrent une légère amélioration des taux de transmission pour les canaux 3 et 4 pour une distance de D=5. On retient donc cette valeur comme distance optimale.

3-5-2-2 Effets de la longueur du réflecteur sur les caractéristiques du démultiplexeur.

La figure (3.20) montre les spectres de transmission pour une distance D=5 et différentes valeurs de réflecteur (L=6, 7, 8, 9). Les caractéristiques du démultiplexeur sont résumées sur le tableau (3.7).

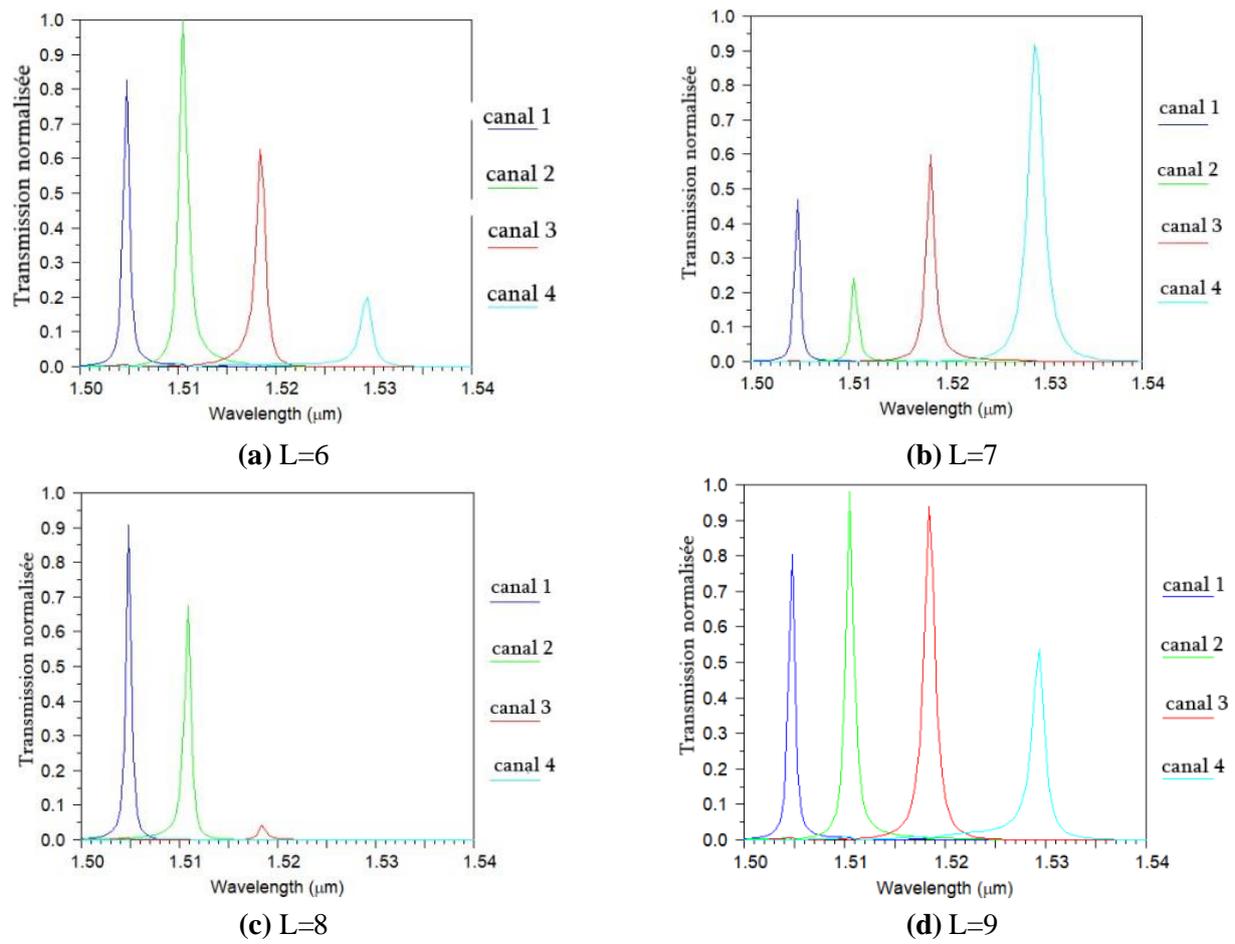


Figure 3.20. Spectres de transmission pour différentes longueurs du réflecteur.

Caractéristique	L=6			L=7			L=8			L=9		
	T(%)	Q	CT(dB)	T(%)	Q	CT (dB)	T(%)	Q	CT(dB)	T(%)	Q	CT (dB)
Canal 1	82.75	1672.22	-20.72	47	2149.71	-21.28	90.62	2508	-21.12	80.28	1510.5	18,63
Canal 2	100	1510.5	-17.75	24.6	2517.5	-19.13	67.3	1888.825	-23.50	98.14	1678	-18.15
Canal 3	62.44	1265.33	-19.5	60	1518.5	-20.79	4.2	1518.4	-21.46	93.8	1168	-20.69
Canal 4	19.71	1019.6	-29.93	92	764.5	-29.63	0.28	755.25	-4.47	53.5	1092	-27.28

Table 3.7. Caractéristiques du démultiplexeur pour différentes valeurs de L.

D’après ce tableau, nous avons constaté que la variation de la longueur du réflecteur affecte les caractéristiques de notre composant. Le meilleur résultat est obtenu avec une distance de L=9 où on note un taux de transmission élevé pour les quatre canaux.

La distribution du champ dans le démultiplexeur correspondant aux longueurs d’onde à la sortie des canaux 1, 2, 3 et 4 est représentée sur la figure (3.21). Sur cette figure, il est clairement visible que les longueurs d’onde $\lambda_1 = 1.5048 \mu m$, $\lambda_2 = 1.5105 \mu m$, $\lambda_3 = 1.5184 \mu m$, et $\lambda_4 = 1.5294 \mu m$ sont extraites du guide d’onde d’entrée et transférées aux guides d’onde de

sortie.

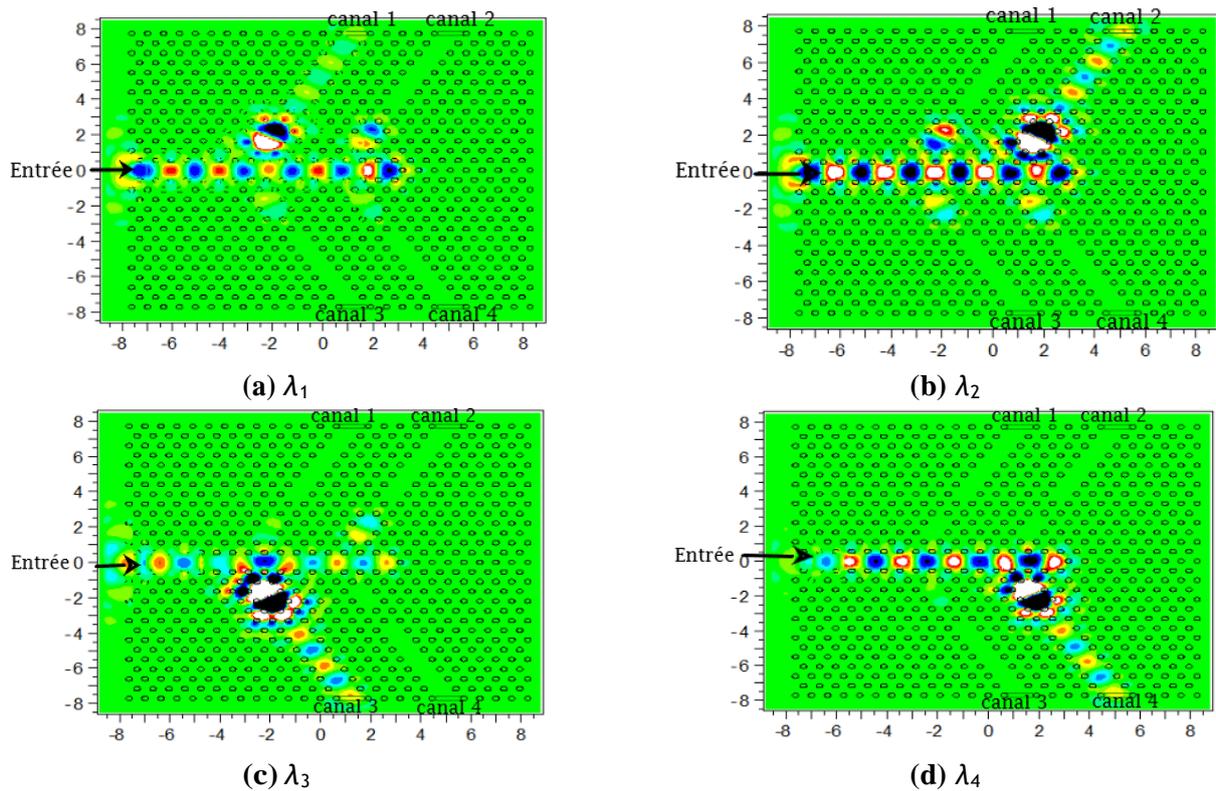


Figure 3.21. Représentation de la distribution du champ électrique pour le démultiplexeur pour (a) $\lambda_1 = 1.5048 \mu m$, (b) $\lambda_2 = 1.5105 \mu m$ (c) $\lambda_3 = 1.5184 \mu m$, (d) $\lambda_4 = 1.5294 \mu m$.

3-6 Comparaison des performances des deux topologies de démultiplexeur

Dans le but d'évaluer les performances des deux topologies des démultiplexeurs proposées, une analyse comparative approfondie a été menée. Les résultats obtenus, avant et après optimisation, révèlent des avantages et des limites distinctes pour chaque configuration.

- Après optimisation, la transmission dans la deuxième configuration s'est améliorée de manière significative pour tous les canaux. Elle est nettement supérieure que celle dans la première configuration. Cependant, en termes de facteur de qualité et de diaphonie, les deux configurations présentent des valeurs similaires.

3-7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé deux configurations différentes de démultiplexeurs basés sur le couplage guide-cavité à cristaux photoniques bidimensionnels. Pour améliorer les performances de ces démultiplexeurs, nous avons optimisé l'espacement entre les canaux et la

longueur du réflecteur situé à l'extrémité du guide d'onde d'entrée. Les résultats obtenus démontrent l'efficacité des composants proposés. Par conséquent, bien que les deux topologies aient montré des améliorations significatives après optimisation, la deuxième topologie est recommandée pour ses performances optimisées, offrant un meilleur compromis entre transmission, diaphonie, et facteur de qualité.

Conclusion générale

Les cristaux photoniques sont des matériaux artificiels présentant une constante diélectrique périodique dans une, deux ou trois directions de l'espace. Cette périodicité est à l'origine de propriétés intéressantes, telles que l'ouverture d'une bande interdite photonique (BIP) qui empêche la propagation de la lumière. La plupart des applications des cristaux photoniques reposent sur cette bande interdite photonique. Pour introduire une fréquence permise à l'intérieur de cette bande interdite, il est nécessaire d'incorporer des défauts dans la structure périodique en modifiant localement la géométrie du cristal.

Dans ce mémoire, nous avons étudié des composants optiques basés sur des cristaux photoniques bidimensionnels (CP-2D). En particulier, nous avons conçu des démultiplexeurs qui sont des composants photoniques essentiels pour le bon fonctionnement de la circuiterie photonique.

Pour atteindre ces objectifs, nous avons développé des composants utilisant des cristaux photoniques bidimensionnels à piliers à fort contraste d'indice, permettant un contrôle de la lumière dans des volumes restreints. Les composants proposés ont été simulés en utilisant la méthode des différences finies dans le domaine temporel à deux dimensions (FDTD-2D) et la méthode des ondes planes (PWE), adaptées à l'étude des structures à base de cristaux photoniques.

Ainsi, nous nous sommes concentrés sur l'étude de démultiplexeurs à quatre canaux basé sur le couplage entre des guides d'onde et des cavités à cristaux photoniques. Chaque canal est constitué d'une cavité linéaire, créée par la suppression de deux tiges de la structure, couplée à un guide d'onde. Nous avons discuté des paramètres permettant d'améliorer le fonctionnement de ces composants afin d'obtenir les meilleures transmissions possibles. Il a été constaté que la modification du nombre de tiges constituant le réflecteur améliore les caractéristiques des démultiplexeurs.

Bibliographie

- [1] E. Yablonovitch, “Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics”, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 58, no. 20, pp. 2059-2062, 1987.
- [2] H. Benisty, “Modal analysis of optical guides with two-dimensional photonic band-gap boundaries.” *J. Appl. Phys.*, vol. 79, n° 10, 1996.
- [3] Lourtioz, J.-M., Benisty, H., & Gérard, J.-M. (2003). *Les cristaux photoniques ou la lumière en cage*. Hermes-Science.
- [4] BELHASSOS Ahlam, METREF Sofiane . ”Etude et simulation des cristaux photoniques” mémoire Master , université KASDI MERBAH OUARGLA , 2017
- [5] F. Benaïssa , Etude et Simulation de la Propagation des Ondes Electromagnétiques dans les guides à Cristaux Photoniques-Application aux Fibres Optiques, Memoire De Magister, Universite De Abou-Bakr Belkaïd – Tlemcen, 2013.
- [6] Halima, AMAMOU & Zahra, MOKHTAR & Badaoui, Hadjira & Abri, Mehadji. ”Filtre bi-bandes sélectifs en cristaux photoniques 2D pour les systèmes très hauts débits”, 2018
- [7] J.-M. Lourtioz et al., *Photonic Crystals*, Ed. Springer, 2005
- [8] Heming, Chen., Wen, Zhou., Yuyang, Zhuang., Ke, Ji. (2015). Two-dimensional triangular lattice photonic crystal mode division multiplexing and demultiplexing device based on magneto-optic effect.
- [9] A., Gorbatsévich., A., V., Friman., Vladimir, S., Gorelik. (2014). Two-Dimensional Hexagonal Photonic Crystal with New Element Geometry. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*,
- [10] Fabian Gauffillet. *Cristaux photoniques à gradient : dispositifs et applications*. Optique [physics.optics]. Université Paris Sud 11, 2014
- [11] Wei, Jiang., Jie, Liu. (2022). TE and TM Modes in Metallic Waveguide Filled With a Lossless and Fully Anisotropic Medium.

- [12] Hadjer, MALACHE & Amel, MAHI & Badaoui, Hadjira & Abri, Mehadji. (2018). Nouvelles Structures Des Démultiplexeurs En Cristaux Photoniques 2D Pour Les systèmes Très Hauts Débits. 10.13140/RG.2.2.32110.46405.
- [13] Rose, K., Cersonsky., James, Antonaglia., Bradley, D., Dice., Sharon, C., Glotzer. (2021). The diversity of three-dimensional photonic crystals. *Nature Communications*,
- [14] Zelsmann, Marc. "Cristaux photoniques en silicium sur isolant pour le guidage, le filtrage, l'émission et l'extraction de lumière" (2003).
- [15] Recio-Sánchez, G., Torres-Costa, V., Manso-Silván, M., & Martín-Palma, R. J. (2012). Nanostructured Porous Silicon Photonic Crystal for Applications in the Infrared.
- [16] L.BENACHOUR , "Etude et modélisation d'un guide à cristaux photoniques" ,These Doctorat, Université DES FRERES MENTOURI CONSTANTINE , 2018
- [17] C.Sauvan, études de la propagation et du confinement de la lumière dans des nanostructures, thèse de doctorat en science, Université de paris XI Orsay, 2005
- [18] A. M. Yacomotti, F. Raineri, C. Cojocar, P. Monnier, J. A. Levenson, et R. Raj, <Nonadiabatic dynamics of the electromagnetic field and charge carriers in high-Q photonic crystal resonators," *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 96, p. 093901, 2006
- [19] P. E. Barclay, K. Srinivasan, et O. Painter, <Nonlinear response of silicon photonic crystal microresonators excited via an integrated waveguide and fiber taper=" , *Optics Express*, Vol. 13, p. 801, 2005.
- [20] X. Letartre, C. Seassal, C. Grillet, P. Rojo-Romeo, P. Victorovitch, M. Le Vassor d'Yerville, D. Cassagne, et C. Jouanin, <Group velocity and propagation losses measurement in a single-line photonic crystal waveguide on InP membranes=" , *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 79, p.2312-2314, 2001
- [21] C. Jamois, R. Wehrspohn, L. C. Andreani, C. Hermann, O. Hess, et U. G. Aosele, <Silicon-based two-dimensional photonic crystal waveguides," *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications*, Vol. 1, p. 1-13, 2003.
- [22] Ahlembenmerkhi, « Optimisation du confinement de la lumière dans des cavités a cristaux photoniques », Thèse de doctorat, Université Mentouri 3 Constantine, 20 /05 / 2012.
- [23] Y-N. Zhang, Y. Zhao and Q. Wang, Multi-component gas sensing based on slotted photonic crystal waveguide with liquid infiltration, *Sensors and Actuators B* 184, 179 (2013).
- [24] Лиман, А.А.. (2023). Photonic Crystal Fibers for Sensing Applications.

- [25] Liu, W., Zhang, L., & Zhang, F. (2022). Performance Analysis of Three-Wavelength Multi-Channel Photonic Crystal Filters of Different Sizes. *Crystals*, 12(1), 91.
- [26] Brik, F., & Labbani, A. (2020). Optimization of a Tunable Photonic Crystal Filter for Coarse Wavelength Division Multiplexing. *Journal of Nano-and Electronic Physics*, 12(6), 06053.
- [27] 26 Woldering, L.A., Tjerkstra, R.W., Vos, W.L. (2011). Photonic Crystal Fabrication.
- [28] Sylvie Menezo. (2024). La photonique intégrées sur silicium
- [29] Cristaux Photoniques et cellules photovoltaïques Silicium - INL CNRS. (2024- 04-05). Cristaux Photoniques et cellules photovoltaïques Silicium. Récupéré de <https://inl.cnrs.fr/cristaux-photoniques-et-cellules-photovoltaïques-silicium/>
- [30] H. Takano, B.S. Song, T. Asano, S. Noda, <Highly efficient multi-channel drop filter in atwo-dimensional hetero photonic crystal,= *Optics Express*, vol. 14, pp. 349133496, 2006.
- [31] A.E. Akosman, M. Mutlu, H. Kurt, E. Ozbay, "Dual-frequency division de-multiplexer based on cascaded photonic crystal waveguides," *Physica B : Condensed Matter*, vol. 407, pp. 4043–4047, 2012.
- [32] G. Manzacca, D. Paciotti, A. Marchese, M. SvalutoMoreolo, G. Cincotti, "2D photonic crystalcavity-based WDM multiplexer," *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications*, vol. 5, pp. 164–170, 2007.
- [33] F. Lacour, Propagation de la lumière dans les nanostructures et cristaux photoniques planaires associés aux guides d'onde : fabrication et caractérisation, thèse de doctorat en Optique., Université de Franche-Comté, 2005.
- [34] Thomson, W. (2008). LXIII. On the Division of Space with Minimum Partitional Area. *Philosophical Magazine Letters*, 103-114. <https://doi.org/10.1080/09500830701698298>
- [35] Zelsmann, M. (n.d.). 11 Exemple de cavité dans un cristal photonique hexagonal de trous d'air - Cette cavité. ResearchGate. Retrieved from <https://www.researchgate.net/figure/11-Exemple-de-cavite-dans-un-cristal-photonique-hexagonal-de-trous-dair-Cette-cavite-fig8-281658423>
- [36] Zelsmann, M. (2003). Nano-structures à base de cristaux photoniques en silicium sur isolant pour les circuits intégrés photoniques et l'émission de lumière (Doctoral dissertation, Université Joseph Fourier Grenoble 1).
- [37] Lin, L.-L., & Li, Z.-Y. (2001). Interface States in Photonic Crystal Heterostructures.

- [38] C. Blin, Développement de cristaux photoniques en diamant : modélisation, technologie et application à la biodétection, Thèse de doctorat en Chimie - Physique des matériaux, Université de Pierre et Marie Curie, 2015.
- [39] A. Yariv, Y. Xu, R. K. Lee et A. Scherer, « Coupled-resonator optical waveguide : a proposal and analysis », *Optics Letters*, vol. 24, n° 11, pp. 711-713, 1999.
- [40] M. Bayindir, B. Temelkuran et E. Ozbay, « Propagation of photons by hopping : A waveguiding mechanism through localized coupled cavities in threedimensional photonic crystals », *Phys. Rev. B*, vol. 61, n° 18, pp. 11855–11858, 2000
- [41] H. Absalan, "A Four-Channel Optical Demultiplexer Using Photonic Crystal-Based Resonant Cavities", *Optics Communications*, 2017.
- [42] Bouamami, S., & Naoum, R. "New version of seven wavelengths demultiplexer based on microcavities in a two-dimensional photonic crystal." *Optik*, 2014, v125, pp. 7072–7074.
- [43] MERZOUGAMMARI, AHLEMBENMERKHI*, MOHAMEDBOUCHEMAT. "Démultiplexeur optique à quatre canaux basé sur L2 microcavité à cristal photonique". DOI : 10.37190/oa220411

Résumé

Les cristaux photoniques sont des structures dont l'indice diélectrique varie périodiquement selon une ou plusieurs directions de l'espace. Cette variation périodique de l'indice optique entraîne l'apparition de bandes interdites photoniques : gammes de fréquences pour lesquelles la lumière ne peut pas se propager dans la structure, quel que soit sa polarisation et sa direction de propagation.

Dans ce travail, nous étudions deux topologies de démultiplexeurs en longueur d'onde basées sur des cristaux photoniques bidimensionnels constitués de tiges diélectriques disposées en réseau triangulaire. Les démultiplexeurs étudiés sont basés sur des filtres optiques dont les paramètres ont été optimisés afin d'extraire quatre longueurs d'onde distinctes. Les résultats de simulation présentés dans ce travail sont obtenus et analysés à l'aide de la méthode FDTD.

Mots-clés : cristaux photoniques, cavité, filtre, démultiplexeur.

Abstract

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

In this work, we investigate two topologies of wavelength demultiplexing based on two-dimensional photonic crystals constituted of dielectric rods spread in a triangular network. The studied demultiplexers are based on optical filters with optimized parameters in order to extract four different wavelengths. The simulation results presented in this work are performed and analyzed using the FDTD method.

Keywords: photonic crystals, cavity, filter, demultiplexer.