

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane Mira – Bejaïa



Projet de fin d'étude

Faculté de Technologie

Département d'Automatique, Télécommunication et d'Électronique

Spécialité : Réseaux télécommunication

Pour l'obtention du diplôme de Master en télécommunication

Thème

Conception de démultiplexeurs 4 canaux à base de résonateurs en anneaux à cristaux photoniques et optimisation de leurs performances

Réalisé par :

Tigrine samy

Ousalem mohand seghir

Encadré par :

Mme. R Bendjelloul

Examiné par :

Mr. S. Berrah

Mme. S Bouncer

Année Universitaire 2022/2023

Remerciements

*Je tiens tout d'abord à remercier **Allah** le tout puissant de m'avoir donné de la connaissance, la force et la patience pour accomplir cet humble travail.*

*Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre encadreur madame **R.Bendjelloul** pour son aide sans réserve et ses conseils précieux qu'il nous ont dispensés tout au long de ce travail.*

Nous tenons également à remercier les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de siéger à notre soutenance.

Nous tenons à remercier aussi tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.

Enfin, que toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, trouve ici l'expression de nos sincères remerciements.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail particulièrement :

A mes chers parents, qui ont consacré leur existence à bâtir la mienne, pour leur soutien, patience et souci de tendresse et d'affection pour tout ce qu'ils ont fait pour que je puisse aller aussi loin.

A mes très chers frères et très chères sœurs

A Tous mes amis(R,F,Z,W,Y,A,k, chepnouk)et ma chère copine(Naouel) .

OUSALEM.Md.S

Dédicace

*A mes parents avec ma gratitude pour toutes ces années de sacrifices et
d'encouragement*

A mes sœurs (Dyna et Maya) et à ma cousine (Sonia)

A ma grand-mère (Mamaia)

*A toute la famille **TIGRINE***

*A mon cher encadreur **Mme R. BENDJELLOUL***

*A tous mes amis (Jo, Tchitchi, Zteu, Lawi) et mes collègues à l'université de
BEJAIA*

TIGRINE.S

Table des matières :

Remerciements	i
Dédicace.....	ii
Liste des figures :	vii
Liste des tableaux :	x
Introduction générale :.....	1
Chapitre I : Generalites sur les cristaux photoniques	
I.1. Introduction :.....	3
I.2. Définition :	3
I.3. Cristaux photoniques naturel :	4
I.4. Différents types des cristaux photoniques :	5
I.4.1. Les cristaux photoniques unidimensionnels :	5
I.4.2. Les cristaux photoniques bidimensionnels :	6
I.4.2.1 La structure connectée :	6
I.4.2.2 La structure déconnectée :.....	7
I.4.2.3 Différentes familles des cristaux photoniques bidimensionnelles	7
I.4.2.4 Diagramme de bande :	8
I.4.2.5 Carte des bandes interdite :	8
I.5 Les cristaux photoniques tridimensionnels :.....	9
I.5.1 La Yablonovite :.....	9

I.5.2 La structure « tas de bois » :	10
I.6 Défauts dans les cristaux photoniques :	10
I.6.1 Les défauts ponctuels :	10
I.6.2 Les défauts linéaires :	11
I.7 Applications des cristaux photoniques :	11
I.7.1 Les fibres à CPs :	12
I.7.2 Le filtre en CPs:	13
I.8 Les différents technologies et matériaux utilisés :	13
I.8.1 Le Silicium :	13
I.8.1.1 Si de type p :	13
I.8.1.2 Silicium macroporeux :	14
I.8.1.3 Si/SiO ₂ :	14
I.9 Techniques de modélisation	14
I.9.1 Décomposition en ondes planes :	15
I.9.2 Différences finies dans le domaine temporel :	15
I.10 Conclusion :	15
Chapitre II. : Demultiplexeurs a base de cristaux photoniques	
II. Introduction :	17
II.1 Définition d'un démultiplexeur :	17
II.2 Démultiplexeurs à base de Cristaux photoniques :	18

II.3 Démultiplexeurs à base de cavités à CPs :.....	19
I.4 Démultiplexeur à base de résonateurs en anneaux à cristaux photoniques :	22
II.5 Caractéristiques des résonateurs en anneaux :.....	23
II.5.1 Facteur de qualité :.....	23
II.5.2 Finesse :	24
II.6 Couplage des résonateurs avec les guides d'onde :	24
II.7 Quelques exemples de configurations de démultiplexeurs basés sur les PCRRs :.....	25
II.7.1 Démultiplexeur huit canaux à base de résonateurs en anneaux :.....	25
II.7.2 Démultiplexeur optique 4 canaux basé sur un résonateur en anneau de cristal photonique utilisant une branche Y modifiée :	26
II.8 Conclusion :	27
Chapitre III. : Resultats et simulations	
III.1 Introduction :	29
III.2 Présentation de l'outil de simulation :.....	29
III.3 Le simulateur « FullWAVE » :	30
III.4 Simulateur BandSOLVE :.....	31
III.5 Structure d'étude :	31
III.6 Filtre à base de résonateur en anneaux à cristaux photoniques :.....	33
III.6.1 Première topologie :	33
III.6.1.1 Etude de l'effet du rayon sur la longueur d'onde de sortie du filtre :	36
III.6.2 Deuxième topologie :	36

III.6.2.1 Etude de l'effet du rayon sur la longueur d'onde de sortie du filtre :	38
III.7 Démultiplexeur à base de résonateurs en anneaux à cristaux photoniques :	39
III.7.1 Première topologie :	39
III.7.2 Deuxième topologie :	42
III.7.3 Troisième topologie :	46
III.7.4 Quatrième topologie :	48
III.8 Récapitulation :	52
III.9 Conclusion :	52
Conclusion générale :	53
Références bibliographie :	xiii

Liste des figures :

Chapitre I	
Figure I.1 : Différents types des cristaux photoniques.	4
Figure I.2: Représentation d'un cristal photonique naturel : L'opale.	4
Figure I.3: Exemples de cristaux photoniques naturels : (a) Aile de papillon et (b) plume de paon.	5
Figure I.4: Structure unidimensionnelle.	5
Figure I.5 : Représentation schématique de l'interférence des ondes réfléchies par chaque dioptré.....	6
Figure I.6: Structures bidimensionnelles connectée.....	6
Figure I.7: Structures bidimensionnelles déconnectée.....	7
Figure I.8: Réseau 2D : (a) structure carrée, (b) structure triangulaire, (c) structure hexagonale.....	7
Figure I.9: Diagrammes de bandes de CP2Ds pour les polarisations TE (en rouge) et TM (en bleu) pour (a) réseau carré, (b) réseau triangulaire	8
Figure I.10: Carte de bande pour (a) les piliers carrés, (b) les piliers hexagonaux et (c) les piliers circulaires en nid d'abeille	9
Figure I.11 : Structure tridimensionnelle : (a) La Yablonivite et (b) la structure tas de bois.	10
Figure I.12: (a) Défaut lacunaire, (b) et (c) Défauts de substitutions.....	10
Figure I.13 : les défauts linéaires.....	11
Figure I.14: Dispositifs à base de cristaux photoniques 2D : (a) Coupleur directionnel ; (b) Biocapteur ; (c) Diviseur de puissance ; (d) Filtre ; (e) Démultiplexeur ; (e) Double virage.	12
Figure I.15: Exemples d'une fibre optique à cristaux photoniques	12
Figure I.16: Image en MEB d'une fonction Fabry-Pérot intégrée à un guide	13
Figure I.17: a) Dépôt de Si ₃ N ₄ par PECVD, b) création du masque par photolithographie, c) gravure des trous dans une cellule électrochimique.	14
Figure I.18: a) lithographie holographique, b) traitement KOH, c) gravure électrochimique.	14
Chapitre II	
Figure II.1 : Schéma du principe de fonctionnement d'un démultiplexeur.....	17

Figure II.2 : Types de cavités : (a) une cavité H ₂ et (b) une cavité L ₃	19
Figure II.3 : Structure schématique du démultiplexeur proposé par la référence	20
Figure II.4 : Spectre de transmission pour la structure proposée	20
Figure II.5 : (a) Schéma du démultiplexeur proposé par, (b) Réponse en transmission	21
Figure II.6 : 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	22
Figure II.7 : Réponse spectrale d'un résonateur en anneau.....	23
Figure II.8 : les tiges et la zone de couplage des résonateurs avec les guides d'onde.	24
Figure II.9 : Structure schématique du démultiplexeur proposé par	25
Figure II.10 : Le spectre de transmission du démultiplexeur proposé	26
Figure II.11 : Structure schématique du démultiplexeur présenté par	27
Figure II.12 : Spectre de la transmission de ce démultiplexeur	27
Chapitre III	
Figure III.1 : Fenêtre principale du programme RSoftCAD.	30
Figure III.2 : Fenêtre principale de FullWAVE.	30
Figure III.3 : Fenêtre principale de BandSOLVE.	31
Figure III.4 : Structure sans défauts.	32
Figure III.5 : Diagramme de bandes de la structure d'étude.	33
Figure III.6 : (a) Structure schématique du filtre, (b) Spectre de transmission du filtre proposé.	34
Figure III.7 : Représentation de la distribution du champ électrique dans le filtre pour $\lambda=1.5409\mu\text{m}$	35
Figure III.8 : (a) structure schématique du filtre. (b) son spectre de transmission.....	37
Figure III.9 : Représentation de la distribution du champ électrique dans le filtre pour $\lambda=1.5336\mu\text{m}$	38
Figure III.10 : (a) Représentation schématique du démultiplexeur, et (b) son spectre de transmission pour D=10.	40
Figure III.11 : Représentation de la distribution du champ électrique dans le démultiplexeur aux longueurs d'onde : (a) $\lambda_1=1.5409 \mu\text{m}$, (b) $\lambda_2=1.5536 \mu\text{m}$, (c) $\lambda_3=1.5605 \mu\text{m}$, (d) $\lambda_4=1.5740 \mu\text{m}$	42
Figure III.12 : Représentation schématique du démultiplexeur, et son spectre de transmission pour D=9.....	43

Figure III.13 : Représentation de la distribution du champ électrique dans le démultiplexeur aux longueurs d'onde : (a) $\lambda_1= 1.5409 \mu\text{m}$, (b) $\lambda_2=1.5536 \mu\text{m}$, (c) $\lambda_3=1.5605 \mu\text{m}$, (d) $\lambda_4=1.5740 \mu\text{m}$	45
Figure III.14 : (a) Représentation schématique du démultiplexeur, (b) spectre de transmission pour $D=12$	46
Figure III.15 : Représentation de la distribution du champ électrique dans le démultiplexeur aux longueurs d'onde : (a) $\lambda_1= 1.5220 \mu\text{m}$, (b) $\lambda_2=1.5536 \mu\text{m}$, (c) $\lambda_3=1.5433 \mu\text{m}$, (d) $\lambda_4=1.5481 \mu\text{m}$	48
Figure III.16 : (a) Représentation schématique du démultiplexeur, et (b) son spectre de transmission pour $D=11$	49
Figure III.17 : Représentation de la distribution du champ électrique dans le démultiplexeur aux longueurs d'onde (a) $R_1=0.065\mu\text{m}$, (b) $R_2=0.071\mu\text{m}$, (c) $R_3=0.077\mu\text{m}$, (d) $R_4=0.083\mu\text{m}$	51

Liste des tableaux :

Tableau III-1 : Influence du rayon ‘R’ sur la longueur d’onde de sortie du filtre.....	36
Tableau III-2 : influence du rayon ‘R’ sur la longueur d’onde de sortie du filtre.....	39
Tableau III-3 : Caractéristiques du démultiplexeur pour D=10.	40
Tableau III-4 : Caractéristiques du démultiplexeur proposé pour différentes valeurs de ‘D’.	41
Tableau III-5 : Caractéristiques du démultiplexeur pour D=9.	44
Tableau III-6 : Caractéristiques du démultiplexeur proposé pour différentes valeurs de ‘D’.	44
Tableau III-7 : Caractéristiques du démultiplexeur pour D=12.	47
Tableau III-8 : Caractéristiques du démultiplexeur proposé pour différentes valeurs de ‘D’.	47
Tableau III-9 : Caractéristiques du démultiplexeur pour D=11.	50
Tableau III-10 : Caractéristiques du démultiplexeur proposé pour différentes valeurs de ‘D’.....	50

Liste des acronymes :

BIP	Bande Interdite Photonique.
1D	Unidimensionnel.
2D	Bidimensionnel.
3D	Tridimensionnel.
λ	Longueur d'onde.
ϵ	Permittivité diélectrique.
a	Période du cristal photonique.
TE	Transverse Electrique.
TM	Transverse Magnétique.
CPs	Cristaux photoniques.
f	Facteur de remplissage.
FCC	Réseau cubique à faces centrées.
FCP	Filtre à Cristal Photonique.
WDM	Démultiplexeur en longueur d'onde.
CMOS	Complementary metal-oxide-semiconductor.
Si	Silicium.
PECVD	Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition.
HF	Haute fréquence.
LPCVD	Low Pressure Chemical Vapor Deposition.
PWE	Plane Wave Expansion.
FDTD	Finite Difference Time Domain.
CT	Crosstalk.
PCRRs	Résonateurs en anneaux.
H_n	Cavité Hexagonale.
L_n	Cavité Linéique.
Q	Facteur de Qualité.
F	Finesse.
τ	Durée de vie des Photons.
ω_r	Pulsation.
FWHM	Full Width at Half Maximum.

ISL	Intervalle Spectrale Libre.
$\Delta\omega$	La longueur à mi-hauteur d'une résonance.
PICs	Photonic Integrated Circuits.

Introduction générale

Introduction générale :

L'amélioration des performances des composants à cristaux photoniques est un domaine de recherche crucial dans le domaine de l'optique et des communications optiques. Les cristaux photoniques offrent des fonctionnalités uniques en contrôlant et en manipulant la propagation de la lumière à l'échelle nanométrique. Des performances améliorées permettent d'atteindre des débits de données plus élevés, des distances de transmission plus longues et une meilleure efficacité énergétique.

Au cours de ces dernières années, la recherche se concentre sur le développement de nouvelles techniques de caractérisation et de mesure des performances des composants à cristaux photoniques. Ces techniques jouent un rôle fondamental dans le développement et l'amélioration de ces dispositifs. Elles fournissent des informations essentielles pour optimiser leur conception, évaluer leur aptitude aux applications spécifiques et stimuler l'innovation continue dans ce domaine en constante évolution.

Les démultiplexeurs à cristaux photoniques comptent parmi les composants les plus importants des systèmes de communication optique à multiplexage en longueur d'onde (Wavelength Division Multiplexing, WDM). Ils sont conçus pour séparer les signaux optiques multiplexés sur différentes longueurs d'onde en canaux individuels, permettant ainsi la transmission simultanée de multiples flux de données à des fréquences lumineuses différentes. Ils sont généralement composés de guides d'ondes et de résonateurs en anneaux à cristaux photoniques. Les résonateurs en anneaux permettent d'isoler sélectivement les différentes longueurs d'onde, tandis que les guides d'ondes acheminent les signaux optiques vers les canaux de sortie correspondants.

La recherche et le développement continus dans le domaine des démultiplexeurs à cristaux photoniques visent à améliorer leurs performances en termes de sélectivité spectrale, d'efficacité de séparation des canaux et de réduction de la largeur de bande. De nouvelles conceptions, de nouveaux matériaux et de nouvelles techniques de modélisations sont explorés pour répondre aux besoins croissants des systèmes de communication optique avancés.

Ainsi, L'objectif de cette étude est de caractériser les démultiplexeurs à base de résonateurs en anneaux à cristaux photoniques. Cela implique d'analyser leurs performances optiques, telles que l'efficacité de transmission, la sélectivité spectrale et la diaphonie. Des techniques de modélisation sont utilisées pour quantifier et évaluer ces performances.

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

Dans le premier chapitre, nous aborderons les notions générales sur les cristaux photoniques, en mettant l'accent sur les bandes interdites et les différents types de cristaux photoniques. Nous nous concentrerons ensuite sur les cristaux bidimensionnels (CPs-2D) et explorerons leurs caractéristiques spécifiques. Une présentation des principaux défauts présents dans les cristaux photoniques sera également incluse. Enfin, nous conclurons ce chapitre en mettant en évidence quelques applications des cristaux photoniques dans différents domaines.

Le deuxième chapitre est consacré aux démultiplexeurs à cristaux photoniques, avec pour objectif de décrire leur fonctionnement, leurs principes de base et de présenter des exemples d'applications récentes utilisant différentes configurations de démultiplexeurs à cristaux photoniques.

Dans le dernier chapitre, nous examinerons les caractéristiques des démultiplexeurs basés sur les résonateurs en anneaux à cristaux photoniques en utilisant la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD). En analysant ces caractéristiques, nous confirmerons la possibilité de réaliser des démultiplexeurs à quatre canaux utilisant des résonateurs en anneaux à cristaux photoniques.

Enfin, nous terminerons notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I. Généralités sur les cristaux photoniques

I.1. Introduction :

Les chercheurs portent un intérêt considérable aux cristaux photoniques en raison de leur potentiel révolutionnaire dans le domaine des télécommunications. Ces matériaux artificiels périodiques sont susceptibles de transformer la manière dont la lumière se propage, ce qui ouvrirait la voie à une alternative aux méthodes traditionnelles de communication utilisant le courant électrique. En conséquence, cela permettrait d'obtenir des gains considérables en termes de vitesse de transmission des informations [1].

En 1987, Eli Yablonovitch et Sajeev John ont introduit le concept de "cristaux photoniques" dans le but d'inhiber l'émission spontanée de la lumière. Le premier cristal photonique a été créé en 1991[2]. Les cristaux photoniques sont des matériaux artificiels ou naturels dont l'indice de réfraction varie périodiquement dans les différentes directions de l'espace. Ils constituent à l'heure actuelle une nouvelle classe de matériaux dont l'utilisation permet d'envisager une réduction en taille des composants d'optique guidée.

Ce chapitre a pour but de fournir une introduction générale sur les cristaux photoniques, ainsi que de présenter les cristaux photoniques bidimensionnels qui sont pertinents pour notre travail. Ensuite, nous passerons en revue les différentes catégories de ces cristaux. Nous aborderons leurs défauts et leurs domaines d'application. Enfin, nous concluons en présentant quelques méthodes de modélisation des cristaux photoniques.

I.2. Définition :

Les cristaux photoniques, également connus sous le nom matériaux à Bande Interdite Photonique (BIP), sont des structures périodiques qui présentent une variation de l'indice de réfraction de manière périodique dans une, deux ou trois directions de l'espace, comme le montre la figure I.1. En raison de leur structure périodique, les cristaux photoniques peuvent présenter des bandes interdites, également appelées bandes de fréquences interdites ou bandes interdites photoniques. Ces bandes correspondent à des gammes de fréquences pour lesquelles la propagation de la lumière est interdite dans certaines directions du cristal photonique [3].

En exploitant cette caractéristique, les cristaux photoniques peuvent donc être utilisés pour créer divers composants optiques tels que des filtres optiques, des miroirs réflecteurs hautement réfléchissants, des guides d'ondes, des cavités optiques, des dispositifs de dispersion de la lumière, des lasers et d'autres composants optiques.

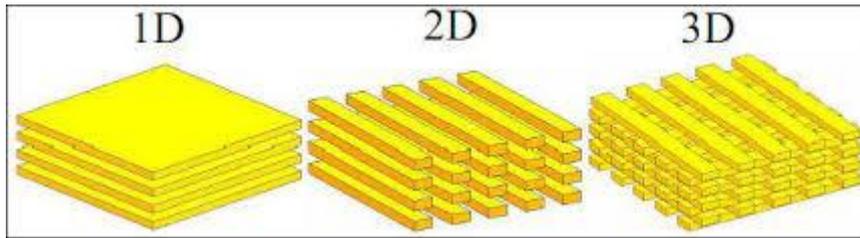


Figure I.1 : Différents types des cristaux photoniques.

I.3. Cristaux photoniques naturel :

Les cristaux photoniques naturels sont des structures cristallines qui se forment naturellement dans certains matériaux. Ils présentent des arrangements périodiques d'indices de réfraction qui interfèrent avec la propagation de la lumière, ce qui leur confère des propriétés optiques uniques.

Un exemple bien connu du cristal photonique naturel est l'opale qui est représentée sur la figure I.2. L'opale est composée de sphères microscopiques de silice, disposées en une structure ordonnée. La lumière qui traverse ces sphères subit une diffraction et une interférence, donnant lieu à l'effet chatoyant caractéristique de l'opale. Cette structure périodique des sphères de silice confère à l'opale des propriétés optiques remarquables, telles que la réflexion sélective de certaines longueurs d'onde [4].

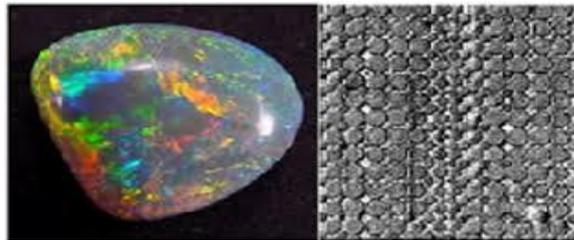


Figure I.2: Représentation d'un cristal photonique naturel : L'opale.

D'autres exemples de cristaux photoniques naturels incluent les coquilles d'organismes marins tels que les nacres et les ailes de certains papillons et plume de paon comme le montre la figure I.3. Ces structures présentent des arrangements périodiques de microstructures qui interfèrent avec la lumière de manière sélective, créant des effets de couleur brillants et iridescents.

Les cristaux photoniques naturels ont attiré beaucoup d'attention en raison de leurs propriétés optiques fascinantes. Ils ont également inspiré le développement de cristaux photoniques artificiels, où des structures périodiques sont créées artificiellement pour contrôler la propagation de la lumière de manière précise.

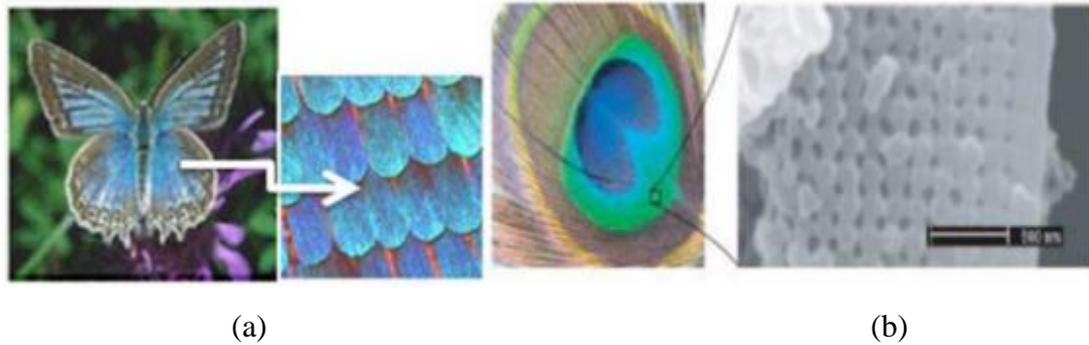


Figure I.3: Exemples de cristaux photoniques naturels : (a) Aile de papillon et (b) plume de paon.

I.4. Différents types des cristaux photoniques :

Le type du cristal photonique peut être déterminé en fonction du nombre de directions de la périodicité de l'indice de réfraction. Dans ce cas, on distingue trois types : les cristaux photoniques unidimensionnels (1D), les cristaux photoniques bidimensionnels (2D) et les cristaux photoniques tridimensionnels (3D).

I.4.1. Les cristaux photoniques unidimensionnels :

Ces structures sont couramment connues sous le nom de réseau de Bragg [5]. Elles sont généralement réalisées par un empilement de couches d'indice de réfraction différent et d'épaisseur optique $\lambda/4$, comme le montre la figure I.4, λ étant la longueur d'onde guidée autour de laquelle le matériau doit interdire la propagation des ondes électromagnétiques sous incidence normale. Les réseaux de Bragg ont prouvé leur utilité dans de nombreuses applications : convertisseurs de modes pour fibres optiques, filtres sélectifs de longueur d'onde, multiplexeurs, lasers spéciaux à bande étroite...

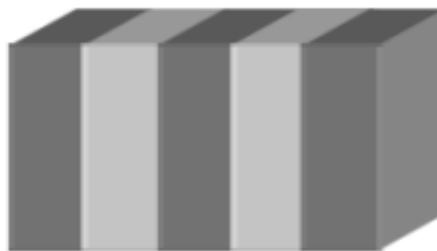


Figure I.4: Structure unidimensionnelle.

Les réseaux de Bragg sont des successions de couches d'indice de réfraction différent, empilées, de manière périodique. Le comportement du réflecteur de Bragg est expliqué à partir de processus d'interférences multiples, comme il est schématisé sur la figure I.5, une onde qui

se propage dans le système multicouche, subit une réflexion à chaque interface. Cette réflexion s'accompagne d'un changement de phase Π , si l'onde va d'un milieu de faible indice vers un milieu de fort indice. Elle s'effectue sans changement de phase dans le cas contraire. Lorsque l'épaisseur optique totale des alternances est de $\lambda/2$, l'onde réfléchi par l'interface (1) est en phase avec celles réfléchies par les interfaces (3), (5), (7) ... Par suite de ces interférences constructives, on finit ainsi par aboutir à une réflexion totale, ce qui revient à dire que l'onde ne peut se propager et que l'on est en présence d'une bande interdite photonique ou BIP [5].

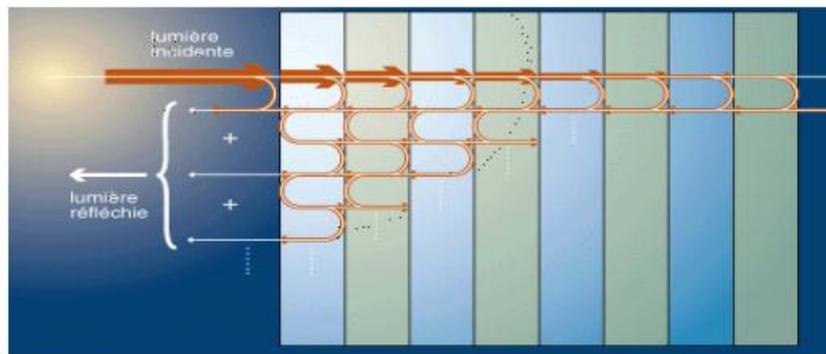


Figure I.5 : Représentation schématique de l'interférence des ondes réfléchies par chaque dioptre.

I.4.2. Les cristaux photoniques bidimensionnels :

Les cristaux photoniques à deux dimensions sont composés d'un réseau périodique de piliers diélectriques dans l'air (structure déconnectée) ou de trous d'air percés dans une matrice diélectrique (structure connectée) [6].

I.4.2.1 La structure connectée :

Les structures dites « connectées » sont constituées par des trous d'air percés dans une membrane diélectrique comme il est montré sur la figure I.6. Dans ce cas les motifs élémentaires sont d'indice n_1 inférieur à l'indice n_2 de la matrice diélectrique.

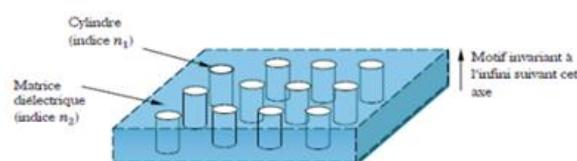


Figure I.6: Structures bidimensionnelles connectée.

I.4.2.2 La structure déconnectée :

Les structures dites « déconnectées » sont des structures dont lesquel les l'indice du motif élémentaire n_1 est supérieur à l'indice n_2 de l'espace inter motifs, comme il est représenté sur la figure I.7. Elles sont généralement constituées de tiges diélectriques alignées périodiquement dans l'air.

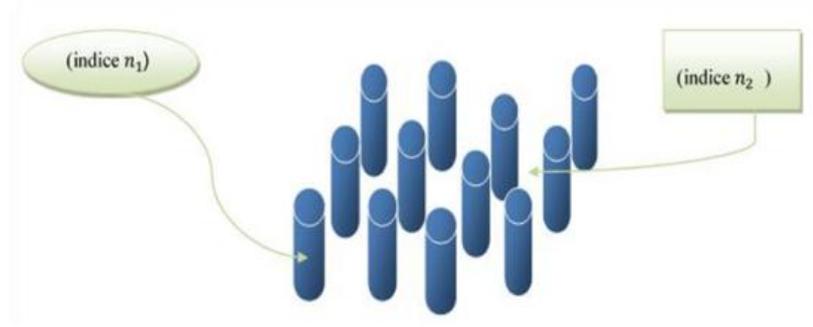
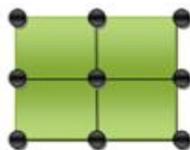


Figure I.7: Structures bidimensionnelles déconnectée.

I.4.2.3 Différentes familles des cristaux photoniques bidimensionnelles

Les réseaux périodiques à deux dimensions se regroupent principalement suivant deux familles :

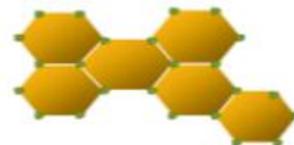
- Le réseau carré : La figure I.8.a illustre la disposition des nœuds du réseau, disposés de manière régulière sur un carré de côté "a".
- Le réseau triangulaire : Chaque nœud du réseau est séparé de manière équidistante de son voisin le plus proche, avec une distance uniforme de "a", comme représenté dans la figure I.8.b.
- Le réseau hexagonal : Dans le cas où tous les nœuds du réseau sont identiques et séparés par une distance constante de "a", cela est illustré par la figure I.8.c.



(a)



(b)



(c)

Figure I.8: Réseau 2D : (a) structure carrée, (b) structure triangulaire, (c) structure hexagonale.

I.4.2.4 Diagramme de bande :

La figure I.9 présente les diagrammes de bandes pour des cristaux photoniques bidimensionnels. Dans le cas du réseau carré, la structure est composée de tiges plongées dans l'air avec une permittivité $\varepsilon = 1$ et un diamètre de $0.2*a$. Pour le réseau triangulaire, la structure consiste en une matrice de trous d'air avec une permittivité $\varepsilon = 1$ dans un matériau de permittivité $\varepsilon = 13$, et un diamètre de trou de $0.48*a$.

Sur cette figure I.9.a, une bande interdite photonique est clairement observée en polarisation TM pour le réseau carré. En revanche, pour le réseau triangulaire figure I.9.b, une large bande interdite photonique est observée en polarisation TE, mais le gap obtenu en polarisation TM est réduit. Cela est dû au fait qu'un gap TE est plus facilement accessible dans une structure où la matrice de haut indice est connectée, tandis qu'une structure où le matériau de bas indice est connecté (comme des piliers dans l'air, par exemple) est plus favorable à l'ouverture d'un gap TM.

En ce qui concerne le réseau triangulaire, le chevauchement des deux bandes omnidirectionnelles TE et TM conduit à l'ouverture d'une bande interdite totale [7].

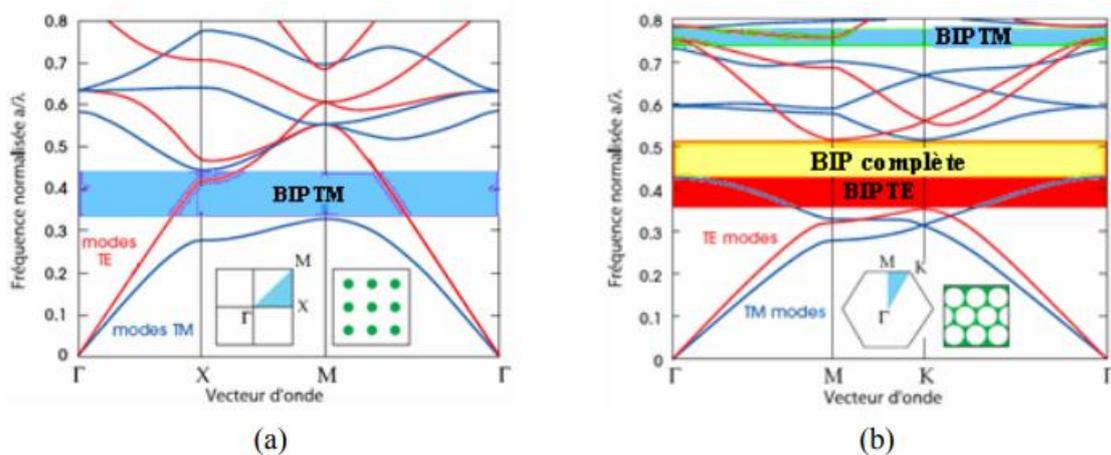


Figure I.9: Diagrammes de bandes de CP2Ds pour les polarisations TE (en rouge) et TM (en bleu) pour (a) réseau carré, (b) réseau triangulaire [7].

I.4.2.5 Carte des bandes interdite :

Les diagrammes de bandes interdites représentent les limites des bandes interdites pour un réseau donné en fonction du facteur de remplissage (f). La figure I.10 présente un exemple de tracé de diagramme de bandes pour des piliers carrés, hexagonaux et circulaires dans un réseau en nid d'abeilles. Un diagramme de bandes interdites est une représentation graphique des positions des bandes interdites photoniques d'un cristal lorsque l'un ou plusieurs de ses paramètres sont modifiés. Les zones rouges et bleues indiquent respectivement la bande

interdite TE (transverse électrique) et la bande interdite TM (transverse magnétique). En même temps, les zones vertes représentent la bande interdite absolue où les bandes interdites TE et TM se chevauchent.

Comme on peut l'observer, les trois structures présentes dans un réseau en nid d'abeilles ont une bande interdite absolue, et les intervalles entre les bandes diminuent en fréquence à mesure que le facteur de remplissage augmente [8].

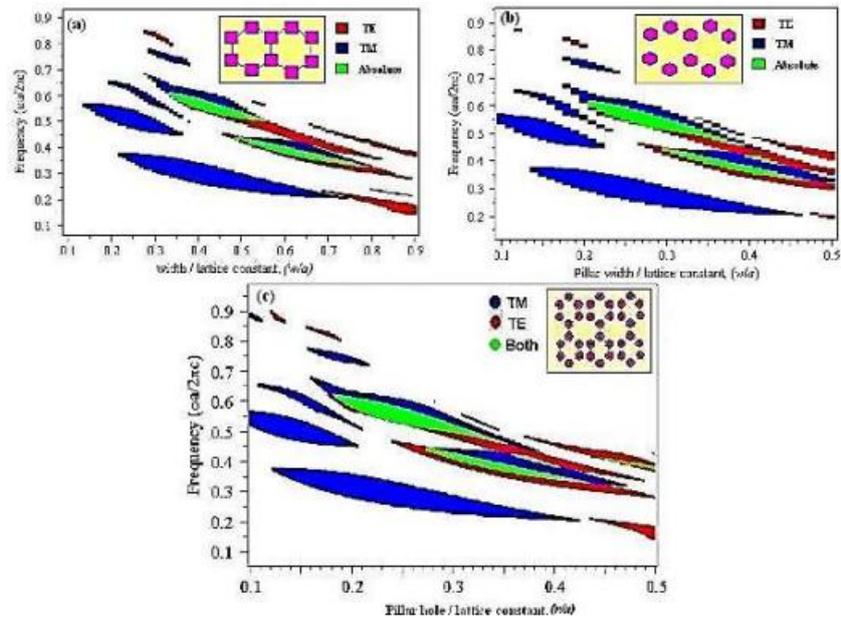


Figure I.10: Carte de bande pour (a) les piliers carrés, (b) les piliers hexagonaux et (c) les piliers circulaires en nid d'abeille [8].

I.5 Les cristaux photoniques tridimensionnels :

Les seules structures qui permettent d'obtenir une bande d'énergie interdite dans toutes les directions de l'espace sont les cristaux photoniques 3D. Parmi ces structures nous distinguons :

I.5.1 La Yablonovite :

C'est l'un des premiers cristaux photoniques tridimensionnels fabriqués. Elle a été réalisée en 1993 par E. Yablonovitch en perçant des trous selon trois angles azimutaux séparés de 120° , et faisant un angle de 35° par rapport à la normale [4], les trous de ce cristal ont été percés dans un bloc de plexiglas et forment un réseau FCC (faces centered cubic). La Yablonovite est représentée sur la figure I.11.a.

I.5.2 La structure « tas de bois » :

Elle est obtenue en déposant par couches successives des rubans de silicium poly cristallin dans des tranchées de silice [9]. La figure I.11.b représente une structure tas de bois.

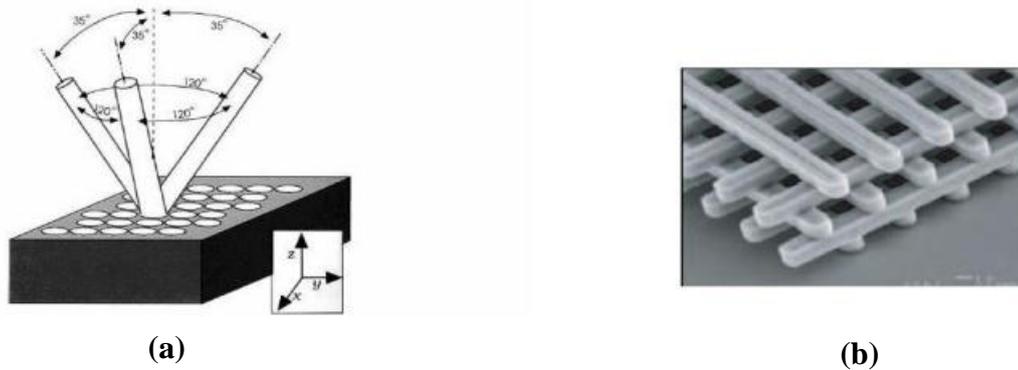


Figure I.11 : Structure tridimensionnelle : (a) La Yablonovite et (b) la structure tas de bois.

I.6 Défauts dans les cristaux photoniques :

Afin de disposer d'une fréquence de propagation permise à l'intérieur de la bande interdite photonique, il est nécessaire d'introduire des défauts dans le cristal photonique. Ces défauts sont obtenus en brisant localement la périodicité du cristal, autrement dit en créant une imperfection dans la structure périodique. On peut distinguer deux types de défauts couramment utilisés dans les cristaux photoniques : les défauts ponctuels et les défauts linéaires.

I.6.1 Les défauts ponctuels :

Les défauts ponctuels sont créés en modifiant les caractéristiques d'une cellule du réseau. Comme il est illustré sur la figure I.12, cela peut se faire de différentes manières, telles que la modification locale de la constante diélectrique ou de la taille d'un motif cristallin (défaut de substitution), ou par déplacement d'un motif existant, ou encore par la suppression d'un seul motif (défaut lacunaire). Dans tous les cas présentés sur cette figure, des cavités optiques sont créées, et leurs modes de résonance se situent à l'intérieur de la bande interdite photonique.

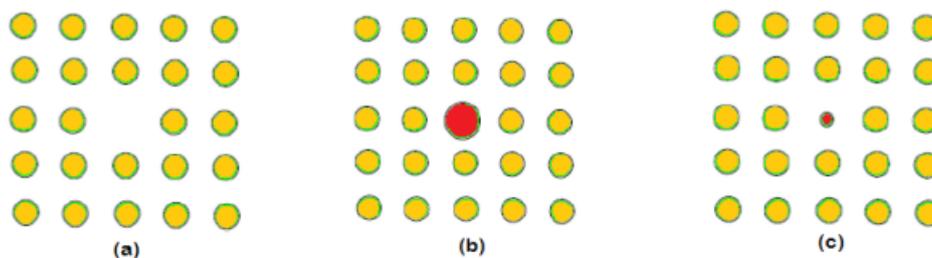


Figure I.12: (a) Défaut lacunaire, (b) et (c) Défauts de substitutions.

I.6.2 Les défauts linéaires :

Les défauts linéaires dans les cristaux photoniques sont créés en introduisant des variations structurales linéaires dans la périodicité du cristal. Cela peut être réalisé en modifiant la position, la taille ou la forme des éléments constitutifs du cristal le long d'une direction spécifique. Par exemple, dans un cristal photonique composé de cylindres diélectriques, les défauts linéaires peuvent être créés en modifiant la position ou la taille des cylindres le long d'une ligne dans la structure, comme le montre la figure I.13. Ces modifications locales de la structure périodique introduisent des variations dans les propriétés optiques du cristal, permettant ainsi le guidage diffractif des ondes optiques le long du défaut linéaire.

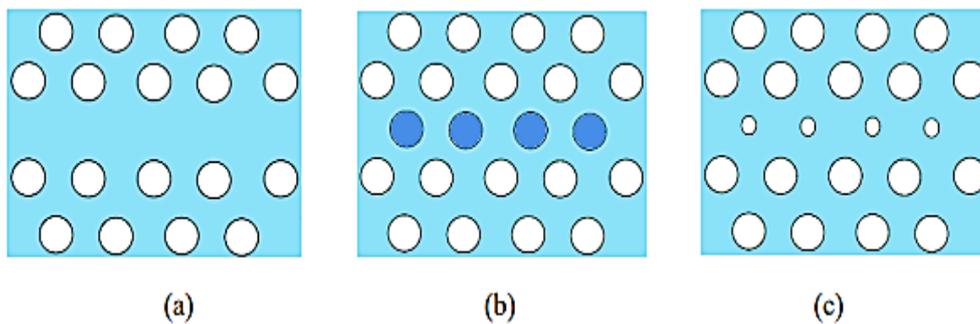


Figure I.13 : les défauts linéaires.

I.7 Applications des cristaux photoniques :

Les cristaux photoniques sont largement utilisés dans les domaines des télécommunications et de l'informatique, en particulier dans le domaine des optiques intégrées. En effet, en utilisant la propagation des photons plutôt que celle des électrons, les cristaux photoniques offrent plusieurs avantages significatifs. Comparés aux systèmes électroniques traditionnels, ils présentent moins de perturbations et d'interférences, ce qui se traduit par une meilleure qualité de signal et une diminution des pertes d'information lors de la transmission.

L'intégration des cristaux photoniques dans des dispositifs optiques permet également une miniaturisation et une densification accrues des composants. Les optiques intégrées basées sur les cristaux photoniques permettent de regrouper plusieurs fonctions optiques dans un seul dispositif compact, offrant ainsi des solutions plus efficaces et économiques pour les applications de télécommunications et d'informatique.

Il existe de nombreux exemples de composants basés sur les cristaux photoniques utilisés dans divers domaines. La figure I.14 illustre quelques exemples.

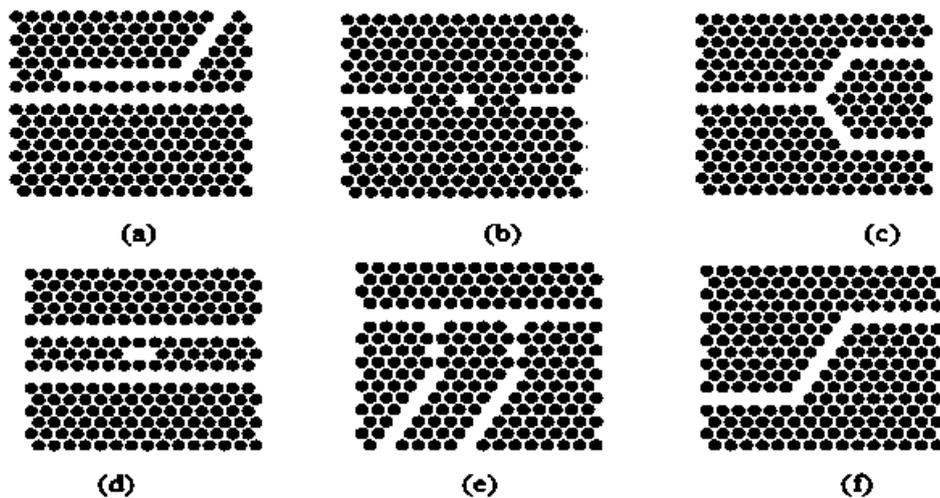


Figure I.14: Dispositifs à base de cristaux photoniques 2D : (a) Coupleur directionnel ; (b) Biocapteur ; (c) Diviseur de puissance ; (d) Filtre ; (e) Démultiplexeur ; (f) Double virage.

Dans la suite de ce paragraphe, nous allons exposer brièvement quelques exemples d'utilisation des cristaux photoniques bidimensionnels.

I.7.1 Les fibres à CPs :

La fibre à trous, également connue sous le nom de fibre à cristal photonique (FCP), a été développée en 1996. Cette fibre se compose d'un cœur en silice pure entouré d'une disposition régulière de canaux d'air de dimensions microscopiques, alignés parallèlement à l'axe de la fibre. Le concept est simple : la bande interdite du cristal photonique confine l'énergie au centre de la fibre, la guidant et l'empêchant de se propager vers la gaine externe. Cette conception de fibre (voir figure I.15) offre des avantages significatifs dans le domaine des télécommunications optiques à haut débit et longue portée. En restant dans le régime de fonctionnement monomode [10], il est possible de choisir librement la dispersion. De plus, cette fibre est capable de guider un mode fondamental sur une large plage spectrale. Ces fibres sont capables de décaler la longueur d'onde d'annulation de la dispersion chromatique jusqu'à $0,85 \mu\text{m}$.

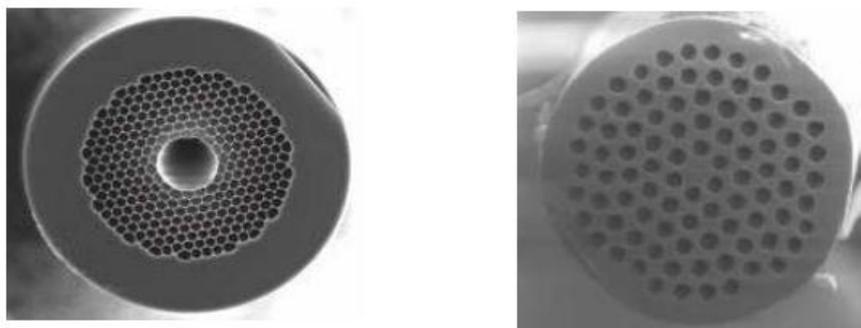


Figure I.15: Exemples d'une fibre optique à cristaux photoniques [10].

I.7.2 Le filtre à CPs:

Le filtrage est une autre application des CPs bidimensionnels dans le domaine des communications optiques. Cette application repose sur l'utilisation de filtres, qui sont des éléments essentiels permettant de sélectionner un canal avec une longueur d'onde spécifique. Pour réaliser ce dispositif, on peut utiliser le couplage entre une cavité et un guide, tel que le filtre Fabry-Pérot. Les longueurs d'ondes guidées sont ainsi divisées en deux parties : la majorité des longueurs d'ondes sont réfléchies à l'extrémité du guide, tandis que quelques-unes sont couplées à la cavité. Ce type de filtre a été réalisé sur SOI par Foresi et al [11].

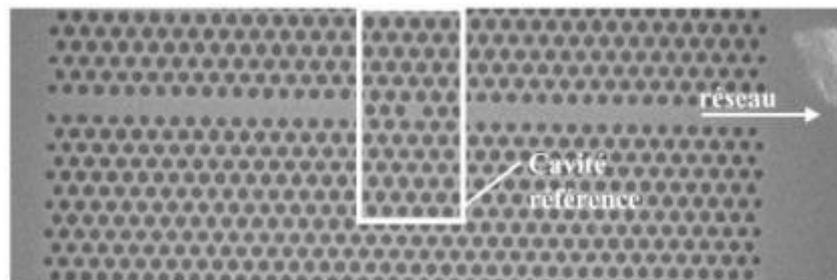


Figure I.16: Image en MEB d'une fonction Fabry-Pérot intégrée à un guide [12].

I.8 Les différents technologies et matériaux utilisés :

De nombreuses structures à bandes interdites unidimensionnelles, bidimensionnelles ont déjà été réalisées sur différents matériaux tels que le silicium.

I.8.1 Le Silicium :

A l'heure actuelle, on ne sait pas quel matériau est le plus adapté aux nanotechnologies pour la réalisation des cristaux photoniques mais parmi les matériaux d'indice de réfraction élevé, le silicium semble être très approprié : en effet, la technologie Si est extrêmement bien contrôlée et compatible avec des applications intégrées CMOS pour l'électronique.

I.8.1.1 Si de type p :

L'utilisation de Si de type p associé à un masque pré-structuré de Si_3N_4 amène à la création d'une nouvelle forme de trous. Une couche de nitrite est déposée sur un substrat de Silicium par PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) standard et structuré par lithographie classique. La gravure des trous est réalisée dans une cellule électrochimique figure I.17.

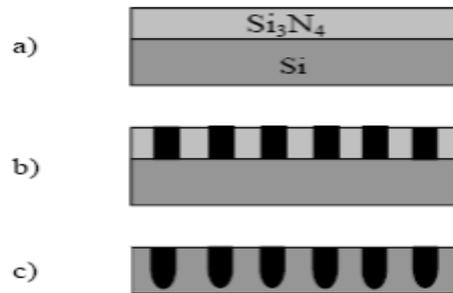


Figure I.17: a) Dépôt de Si₃N₄ par PECVD, b) création du masque par photolithographie, c) gravure des trous dans une cellule électrochimique.

I.8.1.2 Silicium macroporeux :

Les cristaux photoniques sur Si macroporeux sont réalisés par gravure électrochimique d'un substrat gravé à la surface : des réseaux triangulaires ou carrés sont gravés par photolithographie ou lithographie holographique et les trous initiaux sont transférés dans le substrat par traitement KOH chauffé. Les gravures électrochimiques successives dans une solution HF permettent d'obtenir des trous plus profonds (quelques microns) tout en maintenant leur largeur figure I.18 [4].

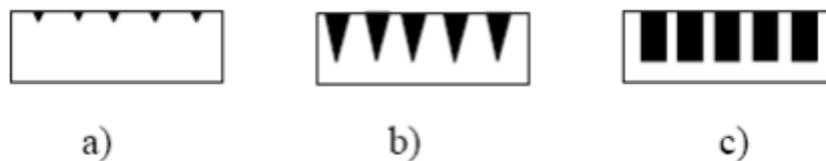


Figure I.18: a) lithographie holographique, b) traitement KOH, c) gravure électrochimique.

I.8.1.3 Si/SiO₂ :

La technique LPCVD [4] (Low Pressure Chemical Vapor Deposition) permet de réaliser des cristaux photoniques unidimensionnels. Cette procédure nécessite trois étapes : - lors de la première étape, du poly-Si est déposé sur un substrat de SiO₂ sous une faible pression de SiH₄. - la couche de poly-Si subit une oxydation humide (H₂, O₂). Ce procédé mène à une croissance de SiO₂. - l'épaisseur de la couche est alors augmentée par un dépôt de SiO₂. Ces trois étapes sont répétées m fois afin de réaliser une structure multicouche (Si/SiO₂) m.

I.9 Techniques de modélisation

Les différentes méthodes utilisées pour décrire la propagation des ondes électromagnétiques dans les cristaux photoniques dérivent des méthodes standards utilisées en électromagnétique ou en physique de l'état solide. Les principales techniques utilisées sont la

décomposition en ondes planes, la méthode des différences finies dans le domaine temporel, les matrices de transfert, et les théories de diffraction par les réseaux....

I.9.1 Décomposition en ondes planes :

La technique de décomposition en ondes planes (plane wave expansion, PWE) [13] s'applique à toutes les structures dont la constante diélectrique est une fonction périodique de l'espace. Le théorème de Bloch permet de décomposer le champ magnétique sur une base d'ondes planes et de transformer la résolution des équations de Maxwell en un problème classique de diagonalisation de matrice. La méthode de décomposition en ondes planes est très efficace pour calculer les diagrammes de bandes de cristaux photoniques parfaitement périodiques. Elle peut être adaptée pour étudier certaines structures non périodiques comme les guides d'onde ou les cavités grâce à la technique des supercellules [14]. Mais quand la structure étudiée ne présente pas de véritable périodicité (variation du facteur de remplissage par exemple), le théorème de Bloch n'est plus valable et impose de recourir à la méthode des différences finies dans le domaine temporel.

I.9.2 Différences finies dans le domaine temporel :

Depuis le premier algorithme proposé par Yee en 1966 [15], la méthode des différences finies dans le domaine temporel (finite difference time domain, FDTD) a été très utilisée en électromagnétisme. Sa versatilité permet de simuler la plupart des systèmes. Cette technique de calcul par éléments finis décompose l'espace-temps selon une grille de cellules élémentaires. Les équations de Maxwell sont remplacées par un système d'équations qui relie le champ électromagnétique de chaque cellule aux champs des cellules voisines. Ces équations sont résolues en fonction des conditions initiales et des conditions aux limites. La méthode FDTD permet de résoudre les équations de Maxwell avec une précision arbitraire en augmentant la densité de la grille de cellules élémentaires. Cette méthode permet de calculer les diagrammes de bande mais est surtout utilisée pour simuler la propagation de la lumière dans les structures à base de cristaux photoniques en calculant l'évolution temporelle du champ électromagnétique. Le comportement spectral d'une structure est déduit de cette évolution temporelle par transformation de Fourier.

I.10 Conclusion :

Dans ce premier chapitre, nous avons abordé les notions fondamentales des cristaux photoniques. Nous avons également présenté les caractéristiques des cristaux photoniques unidimensionnels (1D), bidimensionnels (2D) et tridimensionnels (3D). De plus, nous avons

exploré les principes liés aux défauts présents dans les cristaux photoniques bidimensionnels (CPs-2D). Enfin, nous avons conclu ce chapitre en exposant quelques techniques de modélisation des cristaux photoniques, notamment la méthode des ondes planes (PWE) et la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD).

Chapitre II. : Démultiplexeurs à base de cristaux photoniques

II. Introduction :

Les cristaux photoniques ont récemment suscité un intérêt croissant en tant qu'options prometteuses pour la réalisation de dispositifs tout optiques. Ils permettent actuellement la réalisation de divers composants tels que des diviseurs de puissance, des guides d'onde, des filtres, des démultiplexeurs, etc. L'utilisation de ces structures offre une voie vers une miniaturisation des composants d'optique intégrée, ainsi qu'une amélioration de leurs performances.

II.1 Définition d'un démultiplexeur :

Un démultiplexeur est un dispositif optique qui permet de séparer un signal optique composé de plusieurs longueurs d'onde en plusieurs signaux distincts, chacun portant une longueur d'onde spécifique. En d'autres termes, il permet de diviser une source lumineuse en plusieurs canaux optiques. Les démultiplexeurs sont couramment utilisés dans les réseaux de télécommunication pour séparer les signaux optiques multiplexés en longueurs d'onde différentes afin de les acheminer vers leur destination respective [16].

Supposons que nous ayons un signal optique contenant des longueurs d'onde $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_i$. Il est envisageable de le diviser en une série de signaux de sortie "n" (avec $n = 1, 2, \dots, i$) de manière à ce que la sortie "n" permette d'extraire la longueur d'onde λ_n . Un exemple de démultiplexeur à 4 canaux illustrant ce principe est représenté dans la figure II.1.



Figure II.1 : Schéma du principe de fonctionnement d'un démultiplexeur.

On mesure la performance d'un démultiplexeur en quantifiant sa diaphonie (aussi appelée Crosstalk ou CT). La diaphonie se réfère à l'interférence entre les différents canaux optiques dans le processus de démultiplexage. Un bon démultiplexeur à cristaux photoniques doit être capable de séparer efficacement les canaux optiques sans générer de diaphonie excessive, afin de préserver la qualité des signaux et d'assurer des performances optimales dans les systèmes de communication optique multiplexés.

La diaphonie correspond au rapport entre la puissance de sortie souhaitée à une longueur d'onde spécifique et la puissance à un port non désiré [17].

Elle est donnée par :

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

Cette définition implique que plus la diaphonie est faible, meilleure est la performance du démultiplexeur. En d'autres termes, une puissance de sortie élevée à une longueur d'onde donnée par rapport à la puissance non désirée indique une meilleure capacité de séparation des signaux, ce qui correspond à une performance accrue.

II.2 Démultiplexeurs à base de Cristaux photoniques :

Afin de créer des dispositifs optiques ultra-compacts, il est essentiel d'utiliser des structures capables de guider les ondes lumineuses dans des espaces restreints. Les cristaux photoniques (CPs) sont des structures très prometteuses pour la conception de tels dispositifs optiques, tels que des démultiplexeurs, car ils possèdent une bande interdite photonique (BIP). Cette capacité est due à leur structure en cristal qui leur permet de guider les ondes lumineuses à l'intérieur de la BIP [18,19].

Les démultiplexeurs traditionnels sont généralement réalisés à partir de filtres sélectifs en longueur d'onde, de réseaux de diffraction ou encore de coupleurs guide à guide. Toutefois, ces dispositifs ont une taille relativement importante, de l'ordre de plusieurs millimètres ou centimètres. Pour pallier ce problème, notre approche consiste à remplacer ces composants par des dispositifs à cristaux photoniques, qui permettent de réduire considérablement leur taille. En effet, les cristaux photoniques offrent une capacité de confinement et de contrôle de la lumière à une échelle sub-micronique, ce qui les rend particulièrement adaptés pour la conception de démultiplexeurs optiques ultra-compacts [20].

Les démultiplexeurs optiques étant devenus des composants clés pour les systèmes de communication optique, de nombreux travaux récents se sont concentrés sur la conception de démultiplexeurs à base de cristaux photoniques (CPs). Parmi les mécanismes les plus utilisés pour la conception de tels démultiplexeurs, on peut citer : les guides d'ondes à cristaux photoniques [21], les cavités à cristaux photoniques [22] et les résonateurs en anneaux à cristaux photoniques (PCRRs) [23].

II.3 Démultiplexeurs à base de cavités à CPs :

En utilisant des cavités résonnantes à cristaux photoniques comme base, il est possible de créer une grande variété de dispositifs optiques sur une seule structure. Ces dispositifs sont essentiels pour les systèmes de communication optique et présentent plusieurs avantages tels que la compacité, des performances améliorées et une réduction des pertes [24].

Il est possible de créer une cavité dans un cristal photonique en modifiant les paramètres d'un ou plusieurs motifs. Cela peut être accompli en changeant le rayon des motifs, en les déplaçant de leurs positions d'origine ou en remplissant complètement les motifs. Les cavités sont généralement classées en deux types : H_n et L_n . La cavité de type H_n est hexagonale et est conçue en omettant "n" motifs sur chaque côté. La cavité de type L_n , quant à elle, est linéique et réalisée par la suppression de "n" motifs dans la direction horizontale comme la figure II.2 nous le montre.

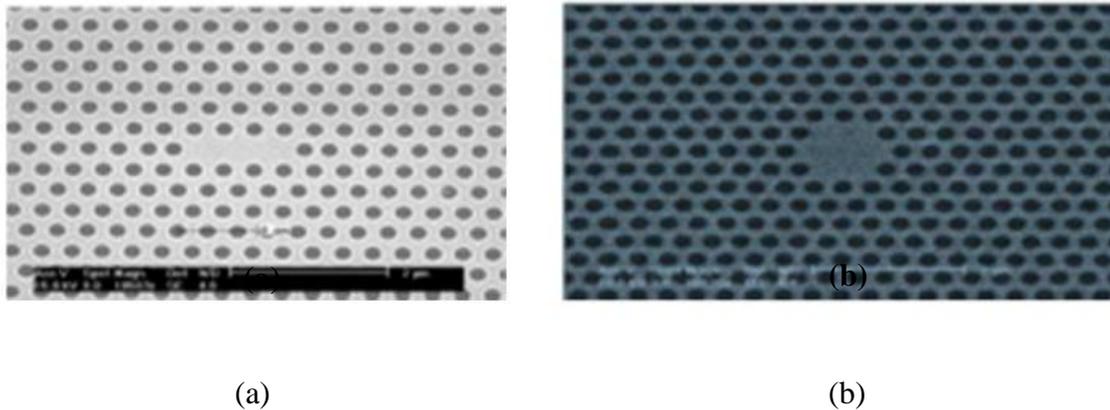


Figure II.2 : Types de cavités : (a) une cavité L_3 et (b) une cavité H_2 .

Plusieurs configurations de démultiplexeurs basées sur les cavités H_n et L_n ont été proposées dans la littérature. Dans une étude de la référence [8], les auteurs ont présenté une nouvelle structure de démultiplexeur huit canaux basée sur des cavités linéiques créées en diminuant le rayon de trois motifs. La variation des rayons de ces motifs permet de sélectionner les longueurs d'onde de sortie pour chaque canal. Les résultats de simulation ont montré des efficacités de transmission allant de 94% à 99%. La figure II.3 illustre la structure proposée et la figure II.4 présente les résultats de simulation obtenus.

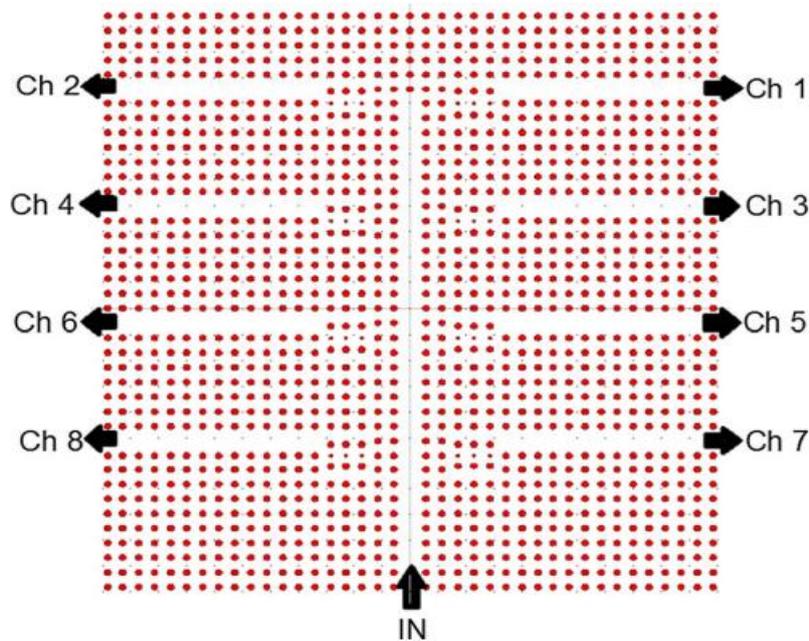


Figure II.3 : Structure schématique du démultiplexeur proposé par la référence [23].

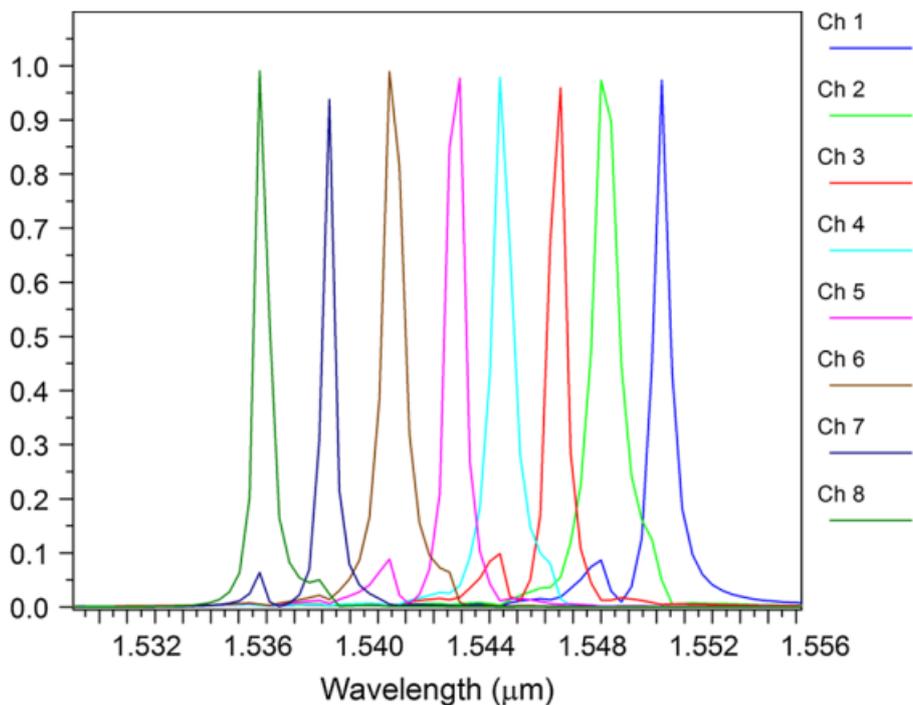
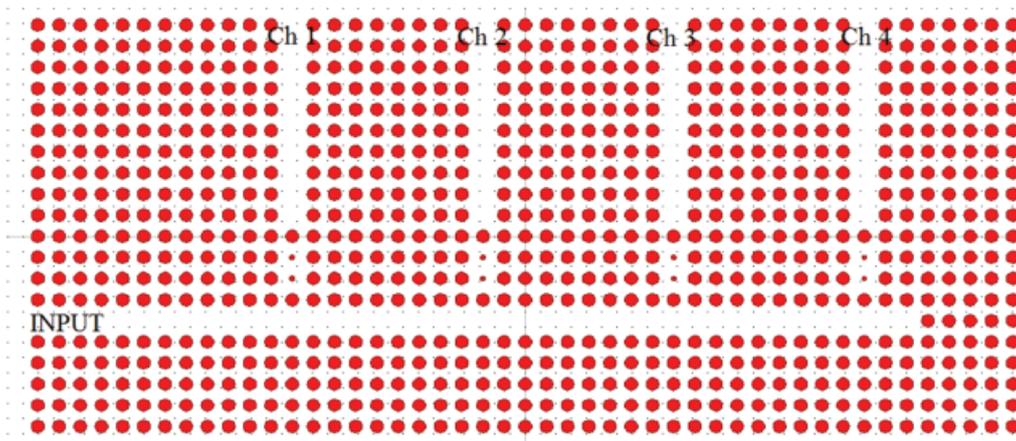


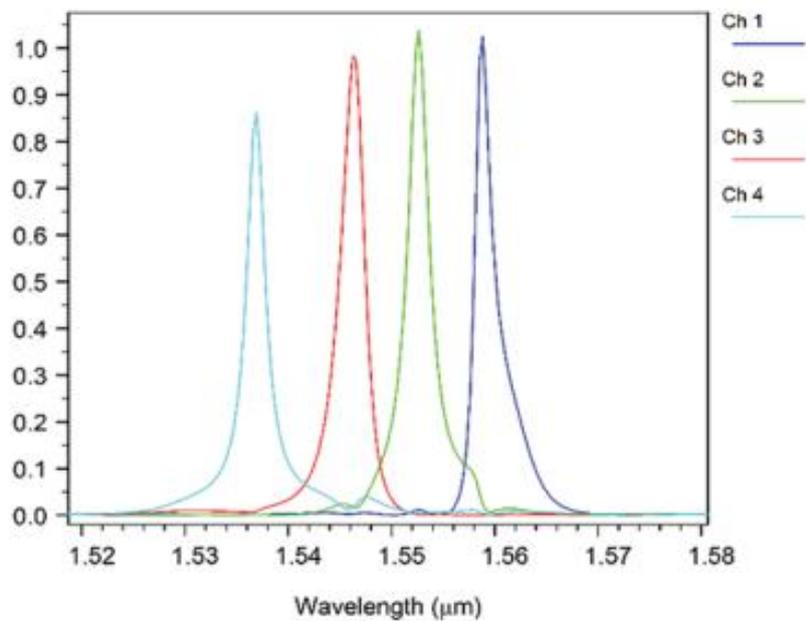
Figure II.4 : Spectre de transmission pour la structure proposée [8].

Dans la référence [25], l'auteur a proposé un démultiplexeur à quatre canaux basés sur des cavités résonantes. La structure de ce démultiplexeur est présentée sur la figure II.5, elle comprend un guide d'onde d'entrée et quatre cavités résonantes. Chaque cavité est constituée par la réduction du rayon de deux motifs. La sélection des longueurs d'onde de sortie est réalisée en modifiant les rayons des défauts à dimensions réduites. En ajustant ces rayons, il devient possible de choisir spécifiquement les longueurs d'onde souhaitées pour chaque canal de sortie.

Cette approche offre une méthode efficace pour contrôler et personnaliser la sélection des longueurs d'onde dans le système. Les résultats de simulation ont montré que ce démultiplexeur est efficace pour séparer les quatre longueurs d'onde $\lambda_1=1.537 \mu\text{m}$, $\lambda_2=1.546 \mu\text{m}$, $\lambda_3=1.553 \mu\text{m}$ et $\lambda_4=1.560 \mu\text{m}$, avec des efficacités de transmission supérieures à 85 % et des niveaux de diaphonie compris entre -18 dB et -3 dB.



(a)



(b)

Figure II.5 : (a) Schéma du démultiplexeur proposé par, (b) Réponse en transmission [25].

I.4 Démultiplexeur à base de résonateurs en anneaux à cristaux photoniques :

Plusieurs types de démultiplexeurs basés sur des résonateurs en anneaux à cristaux photoniques (Photonic crystal ring resonators, PCRRs) sont décrits dans la littérature. Le principe commun à ces structures est l'extraction d'une longueur d'onde spécifique d'un train d'ondes circulant dans un guide d'onde, suivi de son transfert vers un autre guide via un résonateur en anneau à cristal photonique.

Les résonateurs en anneau à cristaux photoniques (PCRRs) sont des dispositifs optiques qui utilisent les propriétés de réfraction des cristaux photoniques pour confiner et guider la lumière. Les PCRRs offrent ainsi une approche prometteuse pour manipuler et contrôler les propriétés de la lumière, ouvrant ainsi de nombreuses possibilités d'applications dans les domaines de filtrage et de démultiplexage [25].

Les résonateurs en anneau à cristaux photoniques se distinguent des résonateurs en anneaux classiques, qui confinent la lumière par réflexion totale interne. Les résonateurs en anneau à cristaux photoniques offrent une grande sélectivité spectrale et sont capables de répondre aux exigences micrométriques actuelles, car ils confinent la lumière grâce à la bande interdite photonique. La figure II.6 présente plusieurs exemples de résonateurs en anneau à cristaux photoniques, tels qu'un anneau quasi-carré dans un réseau carré, un anneau hexagonal dans un réseau triangulaire, et un anneau circulaire dans un quasi-cristal photonique.

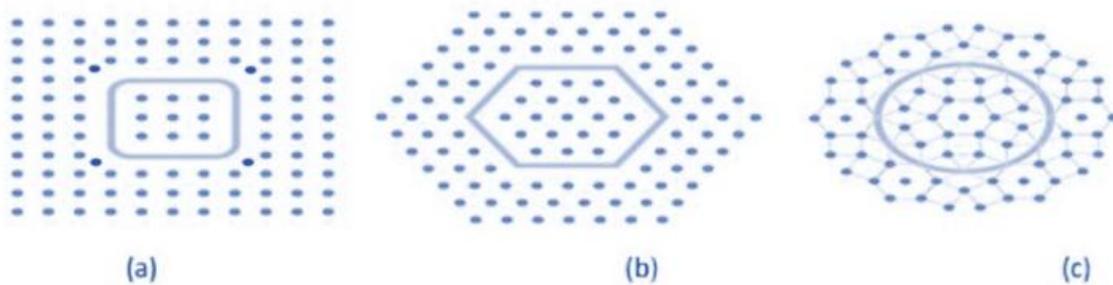


Figure II.6 : Résonateurs en anneaux à cristaux photoniques : (a) un anneau quasi-carré dans un réseau carré, (b) un anneau hexagonal dans un réseau triangulaire, (c) un anneau circulaire dans un quasi-cristal photonique [26].

Les avantages des PCRRs sont leur haut facteur de qualité (Q), leur petite taille, leur large plage de fréquences d'opération, leur flexibilité de conception et leur compatibilité avec les technologies de fabrication de semi-conducteurs. Ces caractéristiques font des PCRRs des dispositifs optiques intéressants pour de nombreuses applications [25].

II.5 Caractéristiques des résonateurs en anneaux :

Dans cette partie, nous allons définir deux caractéristiques importantes des résonateurs : le facteur de qualité (Q) et la finesse (F).

II.5.1 Facteur de qualité :

Le confinement temporel de l'énergie dans un résonateur peut être mesuré à l'aide du facteur de qualité (Q). Ce dernier est en corrélation directe avec la durée de vie des photons dans le résonateur et peut être déterminé mathématiquement en fonction de cette durée de vie (τ) [27].

$$Q = \omega_r \tau$$

Avec ω_r : la pulsation.

Le facteur de qualité peut également être quantifié en termes spectraux en calculant le rapport entre la longueur d'onde centrale de résonance (λ_r) et la largeur à mi-hauteur de cette résonance ($\Delta\lambda$, FWHM). Cette formulation du facteur de qualité en longueurs d'onde est possible grâce à la forme lorentzienne de la résonance, comme illustré sur la figure (II.7). La formule mathématique de cette expression est la suivante [27] :

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

Le facteur de qualité est inversement proportionnel au FWHM (full width at half maximum), ce qui implique qu'une résonance étroite dans le domaine fréquentiel correspond à un résonateur à faibles pertes.

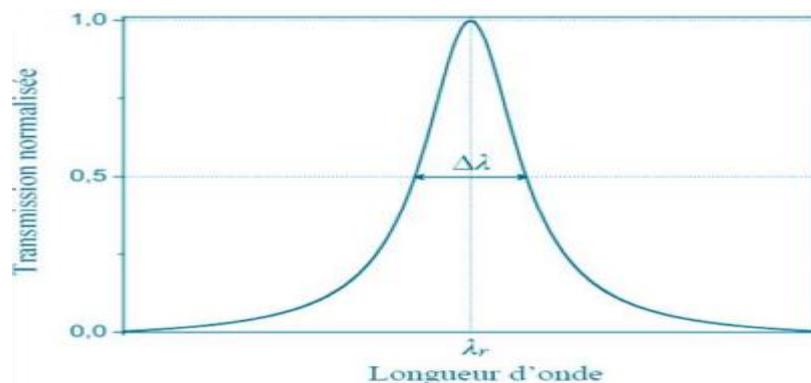


Figure II.7 : Réponse spectrale d'un résonateur en anneau.

II.5.2 Finesse :

La finesse d'un résonateur est exprimée en tant que quotient de l'intervalle spectral libre (ISL) et de la largeur à mi-hauteur ($\Delta\omega$) d'une résonance [28] :

$$F = \frac{ISL}{\Delta\omega}$$

Plus les pics sont étroits, plus la finesse du résonateur est grande. Les résonateurs ayant une finesse élevée sont très utiles pour des applications telles que le filtrage, le démultiplexage et la détection. Par conséquent, ils sont considérés comme des choix privilégiés pour ces applications.

II.6 Couplage des résonateurs avec les guides d'onde :

L'un des défis majeurs dans l'utilisation des résonateurs en anneaux est le couplage avec des guides d'ondes. Les guides d'ondes sont essentiels pour permettre l'entrée et la sortie du signal vers le résonateur. Lorsqu'une lumière d'une longueur d'onde appropriée est injectée à l'entrée d'un guide d'onde, couplé latéralement à un ou plusieurs PCRRs, elle est transmise au résonateur par couplage évanescent. Grâce aux multiples rotations effectuées et aux phénomènes d'interférences constructives, l'intensité de la lumière augmente pour des longueurs d'onde spécifiques, ce qui provoque la résonance. À la résonance, une intensité très élevée est présente dans l'anneau, mais elle est évanescente et décroît exponentiellement hors de l'anneau [29]. Comme seules quelques longueurs d'onde résonnent à l'intérieur de l'anneau, la structure fonctionne comme un filtre sélectif en longueur d'onde, comme la montre la figure II.8. Cela montre l'importance du couplage des résonateurs en anneaux avec des guides d'ondes pour leur utilisation efficace dans diverses applications optiques.

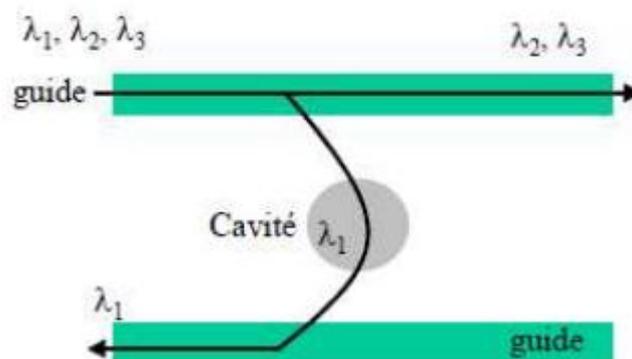


Figure II.8 : les tiges et la zone de couplage des résonateurs avec les guides d'onde.

II.7 Quelques exemples de configurations de démultiplexeurs basés sur les PCRRs :

II.7.1 Démultiplexeur huit canaux à base de résonateurs en anneaux :

En 2017, Farhad Mehdizadeh et ses collaborateurs [30] ont conçu une nouvelle configuration d'un démultiplexeur optique. Le démultiplexeur proposé est représenté sur la figure II.9. Il se compose de trois parties principales : un guide d'onde d'entrée, huit guides d'onde de sortie et huit anneaux résonants. Pour créer le guide d'onde d'entrée, ils ont retiré 65 tiges diélectriques dans la direction Γ -M, puis ils ont créé huit guides d'onde en forme de 'L' pour les sorties. Ils ont placé un résonateur en anneau entre le guide d'onde d'entrée et chaque guide d'onde de sortie. Afin de séparer les différents canaux avec des longueurs d'onde spécifiques, ils ont varié les rayons des tiges internes des huit résonateurs. Le spectre de sortie du démultiplexeur a été obtenu et présenté dans la figure II.10. Ce démultiplexeur comporte 8 canaux avec des longueurs d'onde centrales égales à 1548,8 nm, 1545,3 nm, 1542,8 nm, 1540,2 nm, 1538 nm, 1535,4 nm, 1533,3 nm et 1531,2 nm. Pour cette structure, l'efficacité de transmission minimale et maximale est d'environ 79 % et 100 % respectivement.

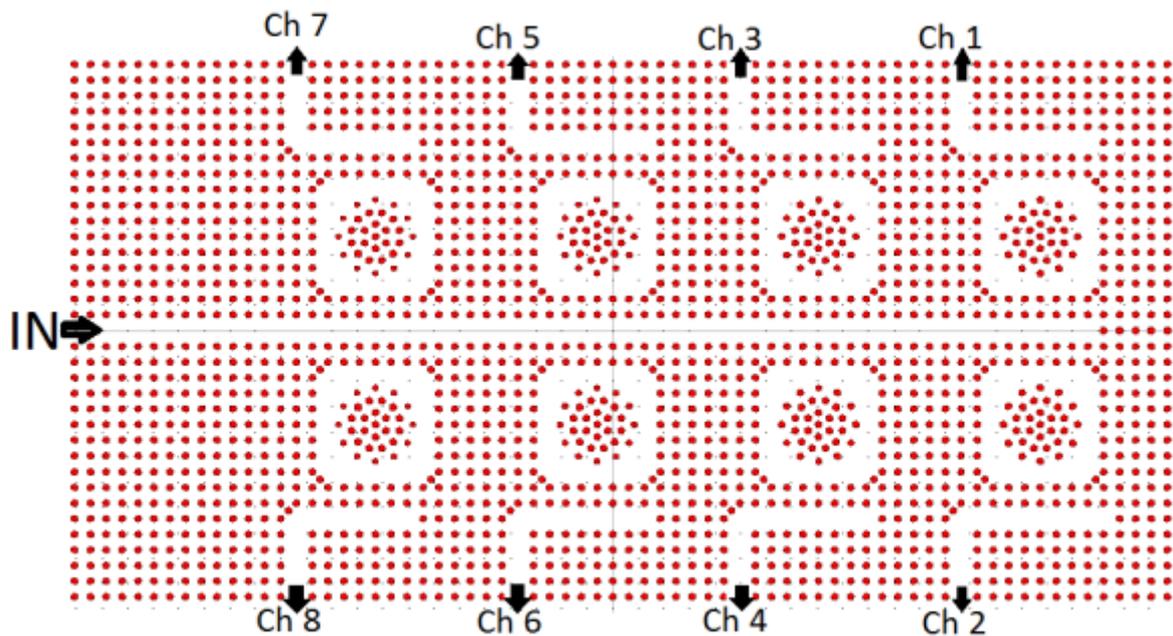


Figure II.9 : Structure schématique du démultiplexeur proposé par [30].

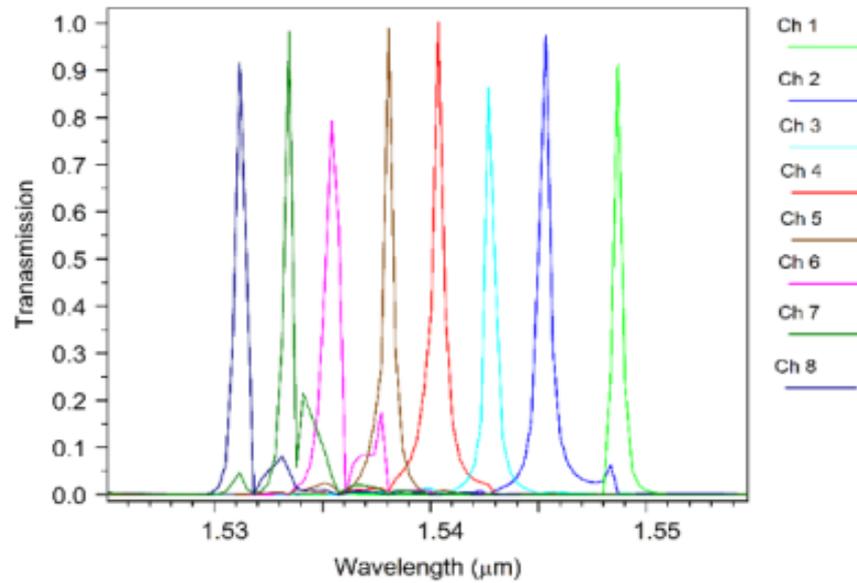


Figure II.10 : Le spectre de transmission du démultiplexeur proposé [30].

II.7.2 Démultiplexeur optique 4 canaux basé sur un résonateur en anneau de cristal photonique utilisant une branche Y modifiée :

En 2018, Vahid Fallahi et ses collaborateurs [31] ont conçu un démultiplexeur optique à quatre canaux, comme illustré dans la Figure II.11. Ce démultiplexeur est composé d'une matrice de tiges diélectriques de dimensions 45 x 55 (avec 45 tiges dans la direction 'x' et 55 tiges dans la direction 'z'). Ils ont utilisé quatre résonateurs en anneau de forme hexagonale avec des tiges internes de rayons respectifs de 178 nm, 179.5 nm, 181 nm et 182.5 nm. La structure proposée permet de séparer les longueurs d'onde de 1581.5 nm, 1584.75 nm, 1587.25 nm et 1589.5 nm avec des taux de transmission de 100%, 92%, 96%, 94%, respectivement (voir la Figure II.12).

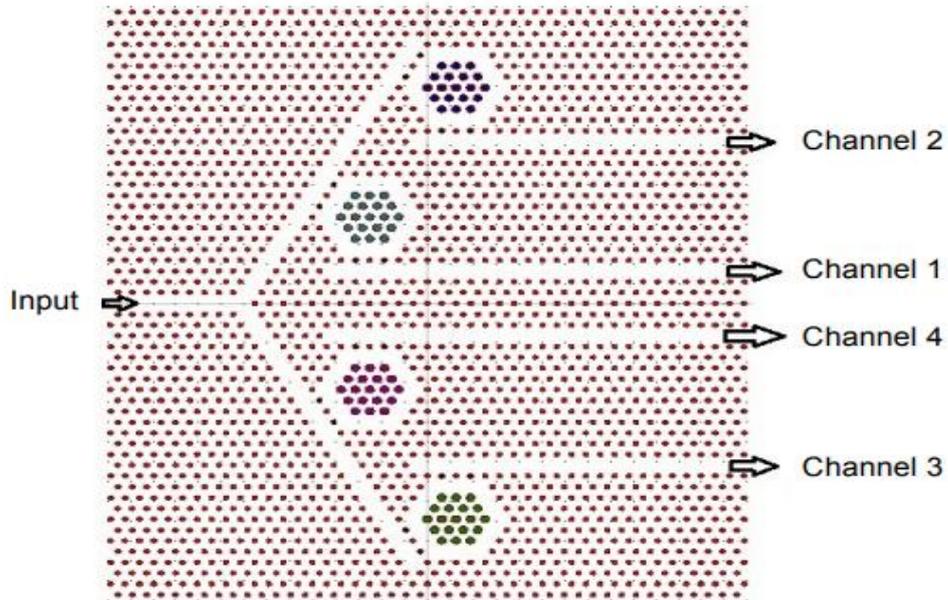


Figure II.11 : Structure schématique du démultiplexeur présenté par [31].

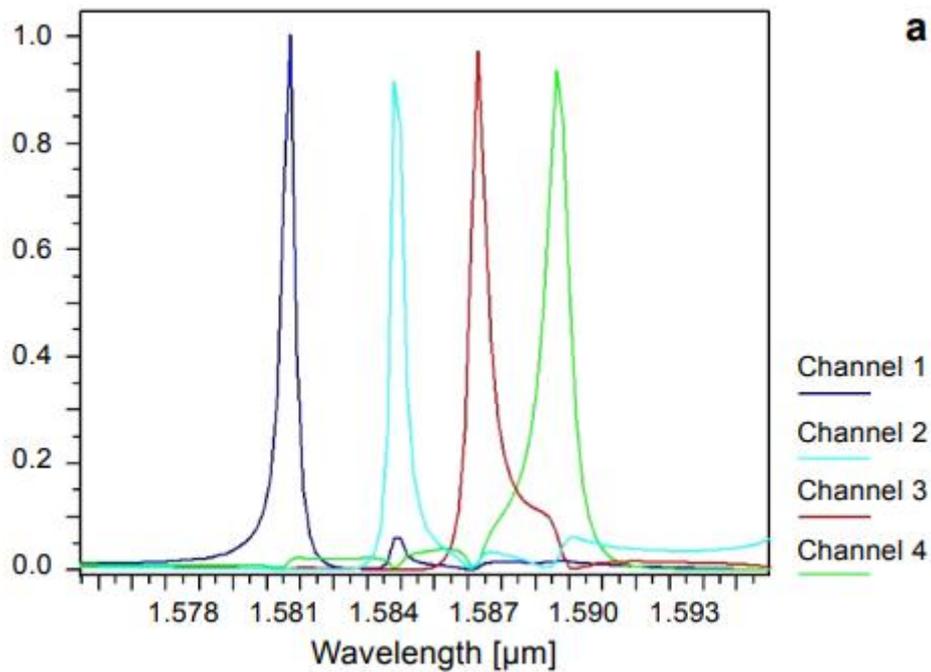


Figure II.12 : Spectre de la transmission de ce démultiplexeur [31].

II.8 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons exploré l'une des nombreuses applications potentielles des cristaux photoniques : la fonction de démultiplexage en longueurs d'onde. Nous avons commencé par définir les démultiplexeurs et présenté les caractéristiques des résonateurs en anneau, notamment le facteur de qualité et la finesse. Ensuite, nous avons examiné différentes

configurations de résonateurs à cristaux photoniques, en mettant particulièrement l'accent sur les résonateurs en anneaux à cristaux photoniques.

Chapitre III. : Résultats et interprétations

III.1 Introduction :

La modélisation des propriétés électromagnétiques des cristaux photoniques est généralement une entreprise complexe qui nécessite un investissement important en programmation et en analyse numérique. Cela demande des compétences et du temps considérables. Par conséquent, il est crucial de développer des méthodes de modélisation optique précises et rapides pour étudier ces structures. De plus, plusieurs simulateurs ont été développés pour faciliter cette tâche. Parmi eux, le simulateur Fullwave qui sera largement utilisé dans les simulations réalisées dans ce travail.

Dans ce chapitre, nous allons réaliser différentes topologies de démultiplexeurs à cristaux photoniques. Dans un premier temps on va étudier deux structures de filtre différente, ensuite grâce à cette étude, nous allons réaliser différentes topologies de démultiplexeurs quatre canaux, basée sur des résonateurs en anneaux à cristaux photoniques.

III.2 Présentation de l'outil de simulation :

Le Rsoft CAD est un programme de base de RSoft photonique, utilisé pour concevoir, optimiser et simuler des dispositifs et structures optiques à l'échelle nanométrique. Il soutient la conception, la planification et la simulation de réseaux de télécommunication optiques complets. Il fait partie d'une famille de produits qui permettent aux ingénieurs de concevoir et d'optimiser des composants et systèmes optiques dans des domaines tels que les réseaux de fibres optiques, la lithographie à semi-conducteurs, les puces optiques en silicium et les LED.

Le logiciel offre plusieurs modules intégrés spécialisés tels que BeamPROP, FullWAVE, BandSOLVE, GratingMOD et Diffract MOD, qui permettent la modélisation et la simulation précise des propriétés optiques des dispositifs et structures. En résumé, le Rsoft CAD est un outil essentiel de RSoft photonique, offrant aux ingénieurs des fonctionnalités variées pour des simulations complètes dans le domaine de la photonique. La fenêtre principale du programme RSoftCAD est montré sur la figure III.1.

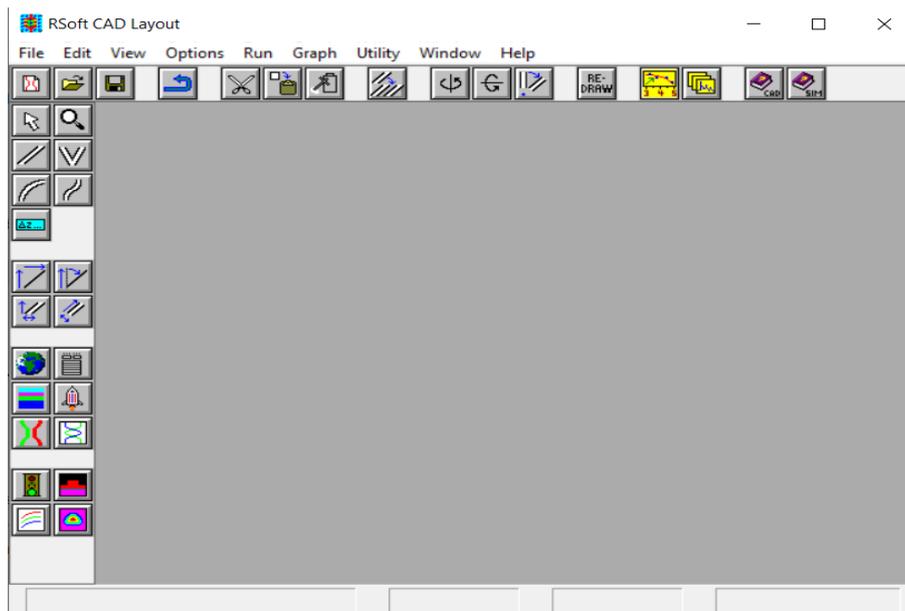


Figure III.1 : Fenêtre principale du programme RSoftCAD.

III.3 Le simulateur « FullWAVE » :

FullWAVE est un moteur de simulation de Rsoft photonique. Il permet d'étudier la propagation de la lumière dans les cristaux photoniques. Utilisant la méthode des différences finies dans le domaine temporel, il résout les équations de Maxwell. Cette approche visuelle permet d'observer la propagation des ondes électromagnétiques dans les structures périodiques comme les cristaux photoniques. Elle fournit simultanément les réponses en champs TE et TM, ainsi que des cartographies détaillées du champ électromagnétique, la figure III.2 ci-dessous nous illustre la Fenêtre principale de FullWAVE.

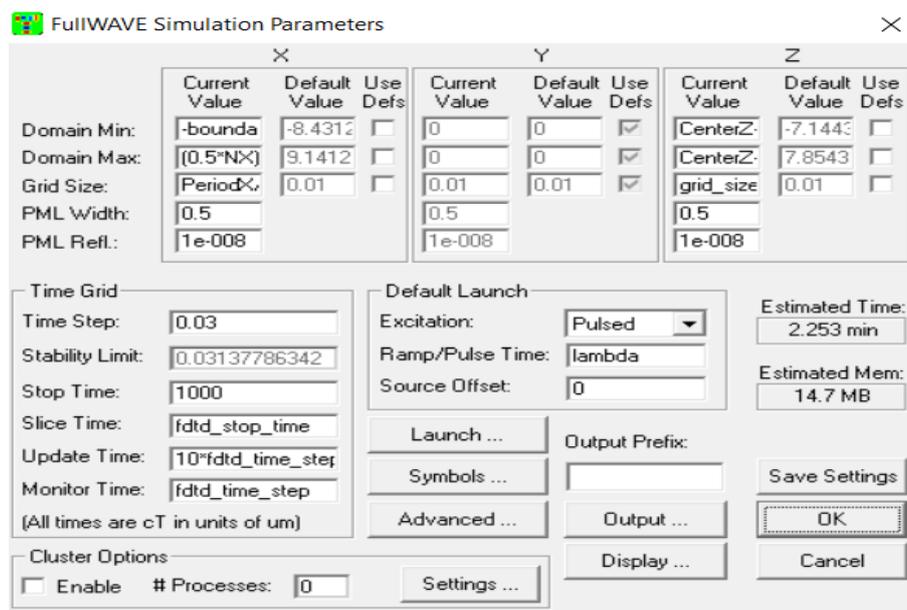


Figure III.2 : Fenêtre principale de FullWAVE.

III.4 Simulateur BandSOLVE :

BandSolve est un moteur de simulation spécialisé dans la génération et l'analyse de structures à bandes interdites photoniques. Il utilise la méthode des ondes planes optimisée pour les structures périodiques idéales, permettant ainsi de produire des diagrammes de dispersion. La figure III.3 ci-dessous présente l'interface principale de BandSolve.

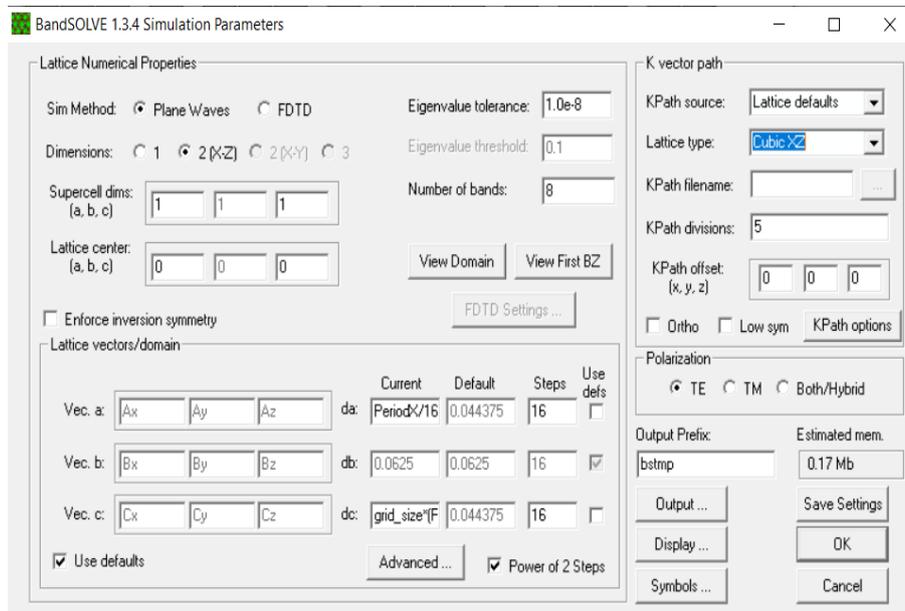


Figure III.3 : Fenêtre principale de BandSOLVE.

III.5 Structure d'étude :

La structure proposée est constituée d'un cristal photonique bidimensionnel. Ce cristal est formé de piliers ayant un indice de réfraction de $n=3.48$, et ils sont immergés dans de l'air avec un indice de réfraction de $n_{\text{air}}=1$. Les piliers ont une forme circulaire et sont répartis selon un réseau carré avec une période $a=0.71 \mu\text{m}$ ('a' étant la distance entre le centre de deux motifs adjacents). Le rayon des piliers est de $r=0.071 \mu\text{m}$. Dans les directions X et Z, il y a respectivement 22 et 22 piliers. La structure schématique de notre cristal est représentée sur la figure III.4.

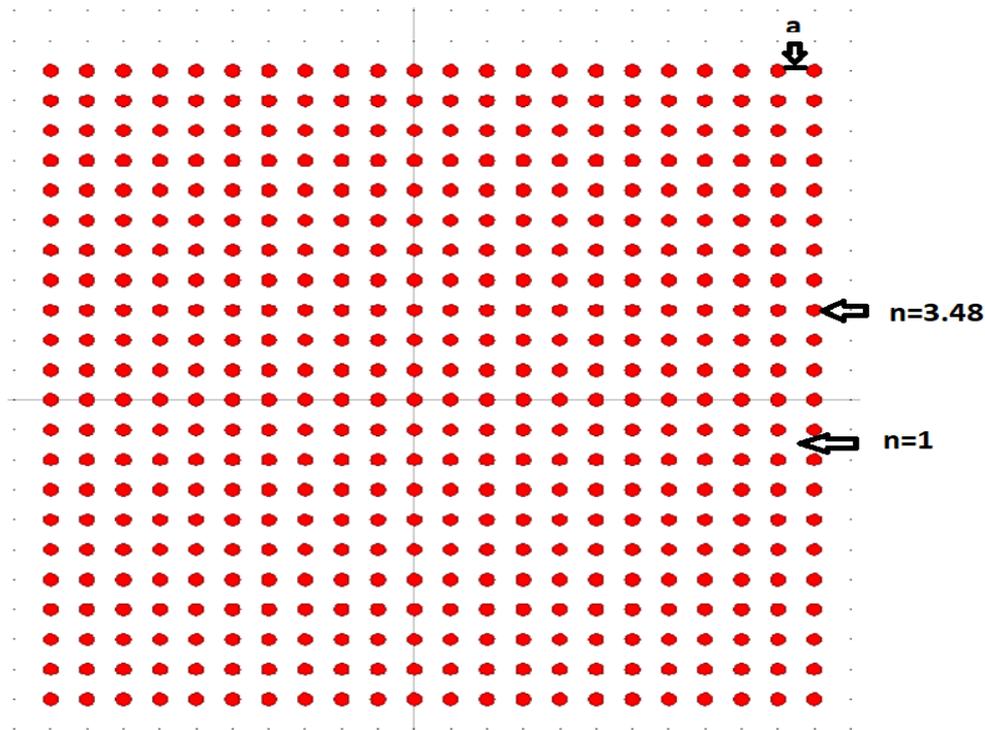


Figure III.4 : Structure sans défauts.

Le diagramme de dispersion du cristal photonique sans défaut est obtenu en utilisant le simulateur BandSolve, qui repose sur la méthode des ondes planes. Ce calcul permet de déterminer les bandes interdites photoniques (BIPs) présentes dans le cristal étudié. D'après la figure III.5, nous pouvons observer que la structure présente deux bandes interdites photoniques pour les polarisations TE et TM. Le gap photonique le plus large est observé pour la polarisation TM, et il se situe dans la plage de $0.418 < a/\lambda < 0.495$, correspondant aux longueurs d'onde $1.434 \mu\text{m} < \lambda < 1.698 \mu\text{m}$.

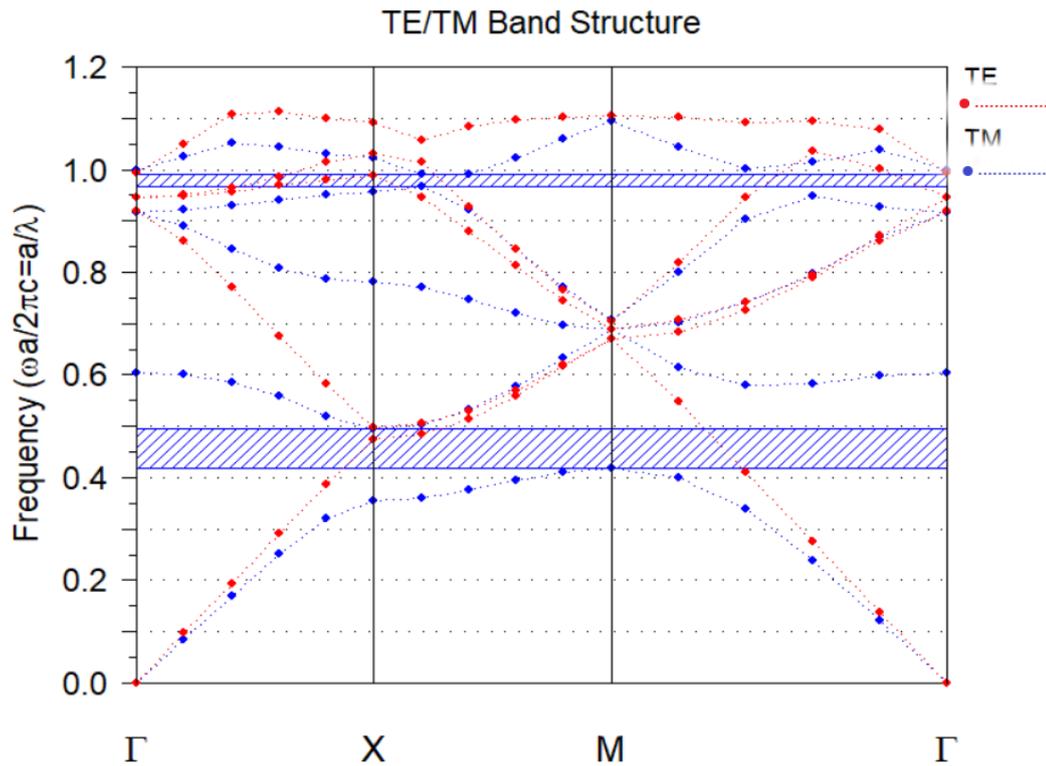
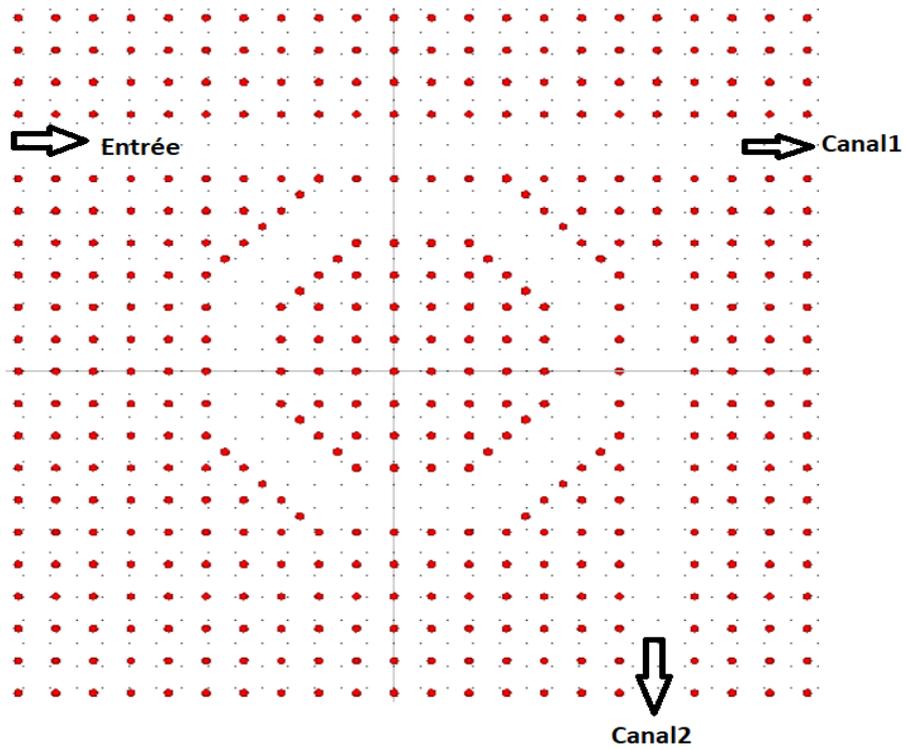


Figure III.5 : Diagramme de bandes de la structure d'étude.

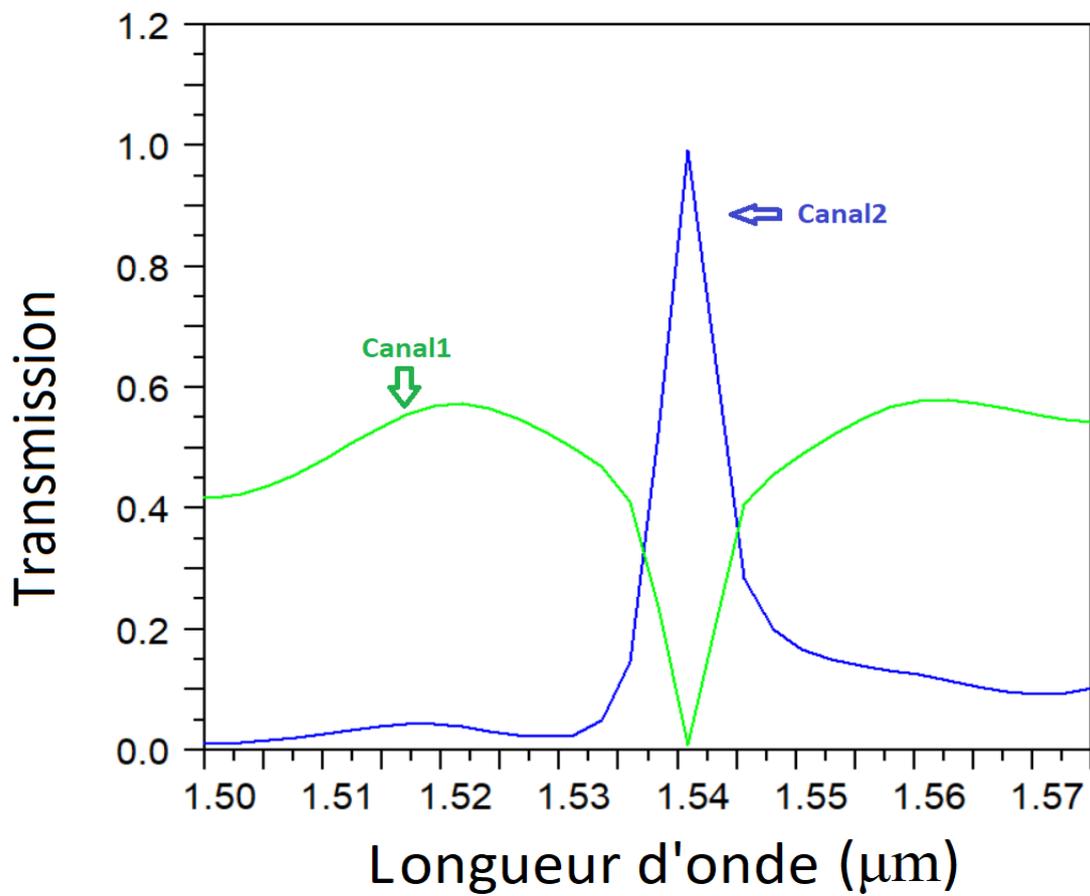
III.6 Filtre à base de résonateur en anneaux à cristaux photoniques :

III.6.1 Première topologie :

La structure du premier filtre proposé est schématisée sur la figure III.6.a. Elle se compose de deux guides d'ondes, un guide d'entrée et un guide de sortie, entre lesquels est placé un résonateur en anneau de forme octogonale. Le guide d'onde d'entrée est créé en supprimant une ligne entière de motifs dans la direction horizontale, tandis que le guide de sortie est conçu en omettant quelques tiges du cristal dans la direction verticale. Les tiges localisées à l'intérieur du résonateur en anneau sont appelées tiges intérieures, et leur rayon est de $R = 0,077 \mu\text{m}$. Les tiges de couplage sont quant à elles situées entre le résonateur en anneau et les guides d'ondes. Afin d'améliorer les caractéristiques de notre filtre, nous avons augmenté le rayon de quatre tiges, appelées tiges de dispersion, situées dans les quatre coins des deux zones de couplage.



(a)



(b)

Figure III.6 : (a) Structure schématique du filtre, (b) Spectre de transmission du filtre proposé.

Pour obtenir les caractéristiques de ce filtre, nous avons utilisé le logiciel Fullwave de Rsoft, qui se base sur la méthode des différences finies temporelles (FDTD). Le résultat obtenu est représenté sur la figure III.6.b. Sur cette figure, nous pouvons observer un pic résonant à la longueur d'onde $\lambda=1.5409 \mu\text{m}$. Ce pic présente un taux de transmission de 98,8% et un facteur de qualité de $Q=256.81$. Dans ce cas, on note une nette amélioration par rapport au cas du filtre sans la modification du rayon des tiges de dispersion, où ces valeurs étaient de 90.7% et 145.13, respectivement.

Afin de démontrer la performance du filtre, nous avons simulé la distribution du champ à la longueur d'onde $\lambda=1.5409 \mu\text{m}$. Le résultat est illustré dans la figure III.7. Comme on peut le remarquer, grâce au couplage entre le guide d'onde et le résonateur en anneau à la longueur d'onde de résonance, le signal est entièrement extrait du guide d'onde d'entrée et transféré ensuite vers le guide d'onde de sortie à travers le résonateur.

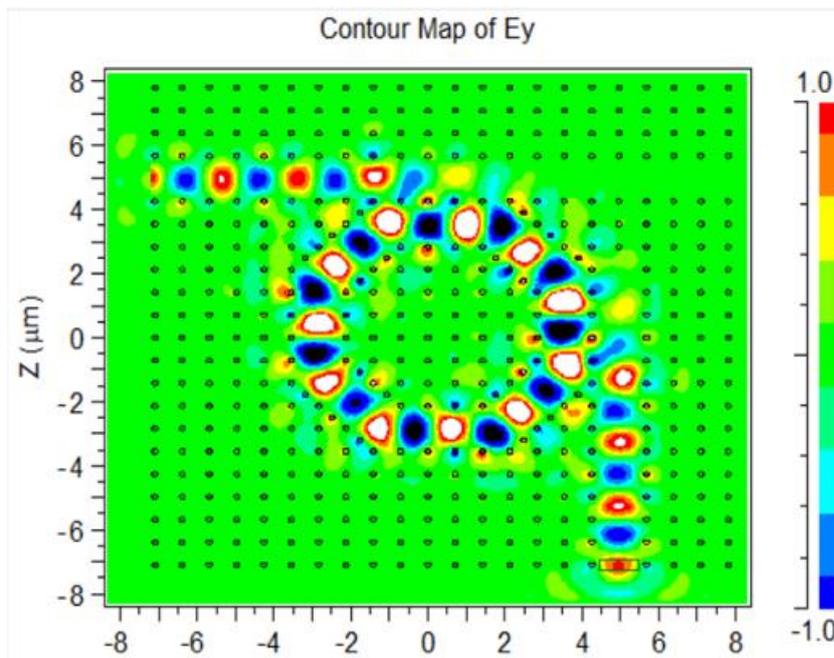


Figure III.7 : Représentation de la distribution du champ électrique dans le filtre pour $\lambda=1.5409\mu\text{m}$.

III.6.1.1 Etude de l'effet du rayon sur la longueur d'onde de sortie du filtre :

Compte tenu de notre objectif de concevoir un démultiplexeur en longueurs d'onde, en utilisant le filtre proposé comme composant de base du démultiplexeur, il est recommandé que le filtre soit accordable. Plusieurs études ont été menées dans le but de contrôler la longueur d'onde de fonctionnement dans différentes conceptions de filtres à cristaux photoniques. En général, il est possible de modifier l'indice de réfraction de toute la structure, et celui des tiges intérieures, ainsi que le rayon des tiges intérieures et de toute la structure. En agissant sur l'un de ces paramètres, il devient envisageable de contrôler la longueur d'onde de sortie du filtre.

Dans notre cas, nous nous sommes intéressés à l'influence de la modification du rayon des tiges intérieures sur la longueur d'onde de fonctionnement du filtre. Les résultats obtenus sont reportés sur le tableau III-1.

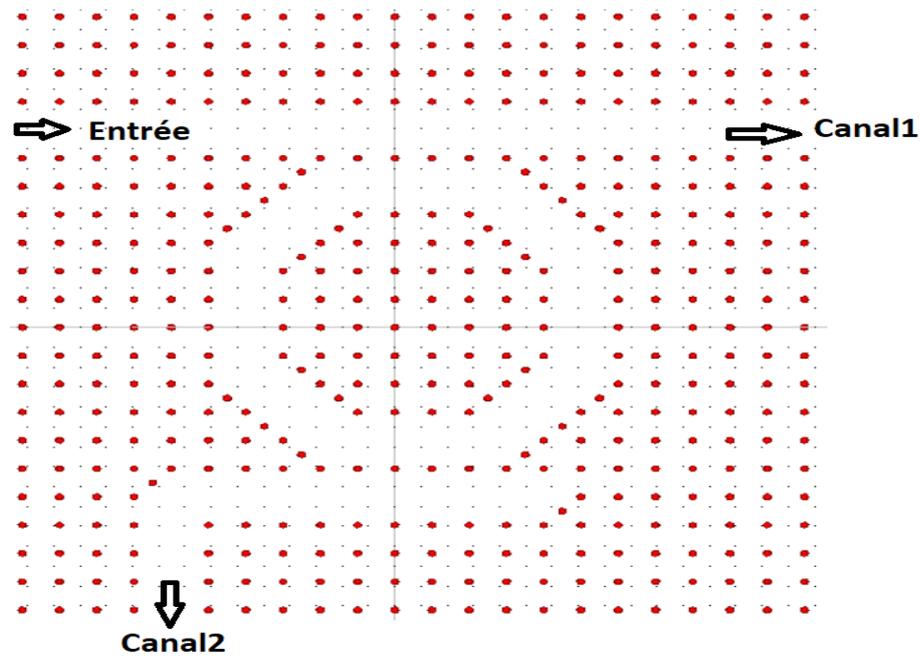
Rayon des tiges intérieures (μm)	0.071	0.077	0.092	0.107	0.122
Longueur d'onde de sortie (μm)	1.5336	1.5409	1.5537	1.5605	1.5740

Tableau III-1 : Influence du rayon 'R' sur la longueur d'onde de sortie du filtre

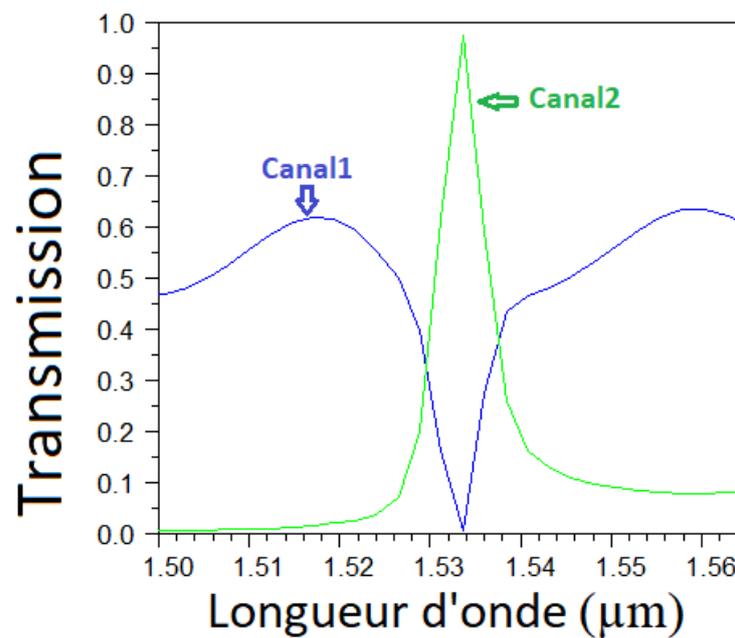
En examinant le tableau précédent, on peut constater qu'en augmentant le rayon des tiges intérieures, la valeur de la longueur d'onde de sortie se décale vers des valeurs plus élevées. Ces résultats soulignent la possibilité de concevoir un filtre accordable.

III.6.2 Deuxième topologie :

La figure III.8.a montre la structure schématique du deuxième filtre proposé. Cette structure est constituée d'un résonateur en anneau à cristal photonique de forme octogonale positionné entre deux guides d'onde parallèle [32]. Le guide d'entrée est créé par la suppression d'une rangée de piliers complète dans la direction horizontale, alors que le guide de sortie est formé par l'omission de quelques motifs dans la même direction. Le résonateur et les guides sont séparés par une seule rangée de motifs. Afin d'éviter les pertes de propagation dans le guide de sortie, nous introduisons deux tiges additionnelles dans ce dernier. Ces tiges additionnelles ont exactement les mêmes rayons et les mêmes indices de réfraction que toutes les autres tiges dans la structure photonique.



(a)



(b)

Figure III.8 : (a) structure schématique du filtre. (b) spectre de transmission.

Les caractéristiques de transmission du filtre ont été simulées avec le logiciel Fullwave basé sur la méthode des différences finie. La figure III.8.b illustre le spectre de transmission du filtre. Sur cette figure, nous remarquons la présence d'un pic résonant à la longueur d'onde

$\lambda = 1.5336 \mu\text{m}$. Ce pic présente un taux de transmission de 97.38 % et un facteur de qualité de $Q=479.25$.

Nous avons effectué une simulation de la distribution du champ à la longueur d'onde $\lambda = 1.5336 \mu\text{m}$. Les résultats sont illustrés dans la figure III.9. Comme on peut le voir, en raison du couplage entre le guide d'onde et le résonateur en anneau à la longueur d'onde de résonance, le signal est entièrement extrait du guide d'onde d'entrée et transmis au guide d'onde de sortie à travers le résonateur.

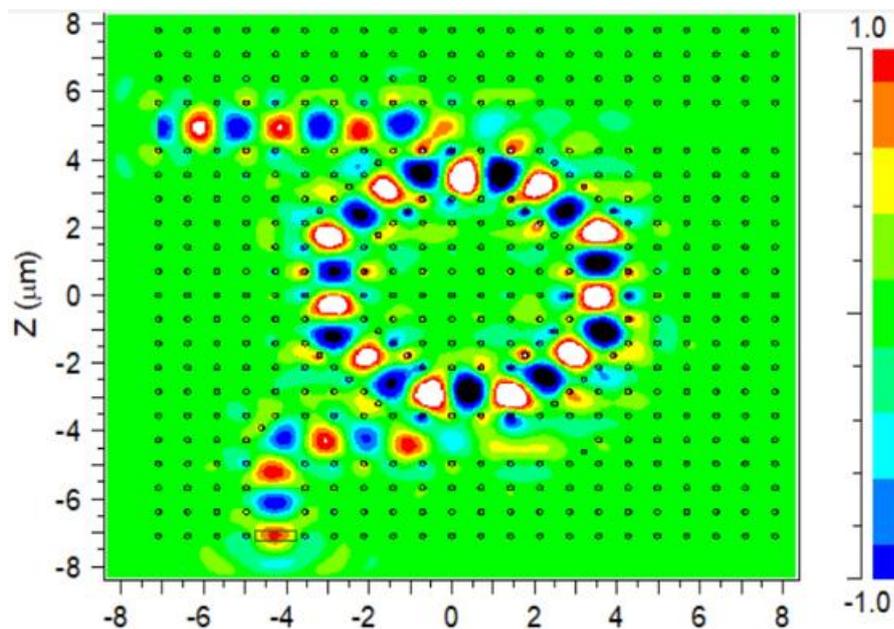


Figure III.9 : Représentation de la distribution du champ électrique dans le filtre pour $\lambda=1.5336\mu\text{m}$.

III.6.2.1 Etude de l'effet du rayon sur la longueur d'onde de sortie du filtre :

Afin de démontrer la possibilité de modifier la longueur d'onde de fonctionnement du filtre d'une manière contrôlée, nous examinerons dans cette partie l'impact de la modification du rayon des tiges intérieures sur la longueur d'onde de fonctionnement du filtre. Les résultats obtenus sont présentés sur le tableau III-2.

Rayon des tiges intérieures (μm)	0.065	0.071	0.077	0.083
Longueur d'onde de sortie (μm)	1.5409	1.5536	1.5605	1.5740

Tableau III-2 : influence du rayon 'R' sur la longueur d'onde de sortie du filtre

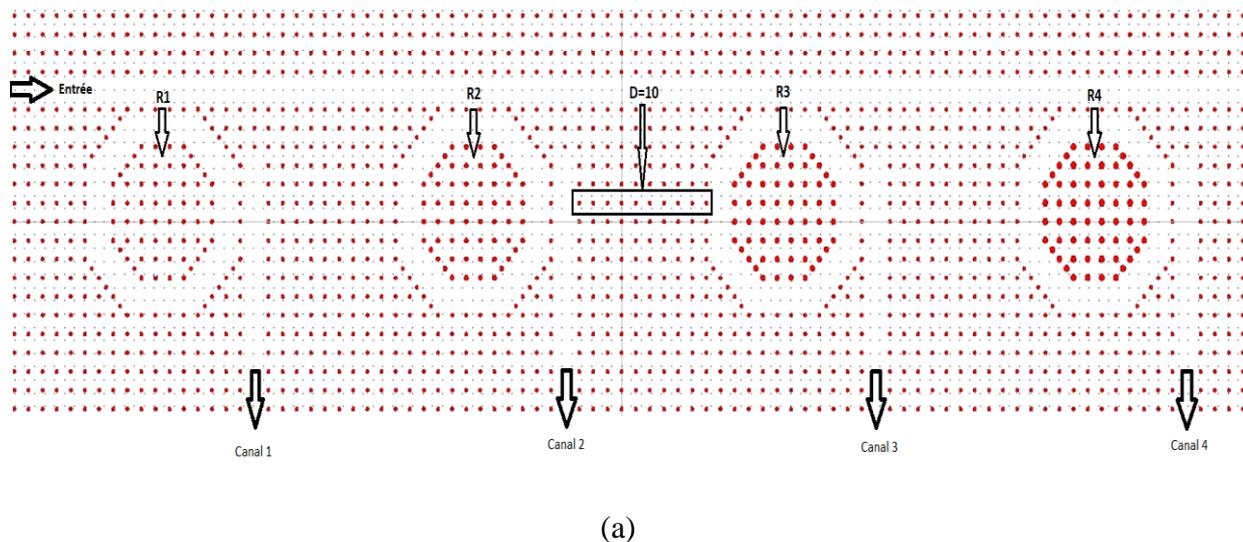
En analysant le tableau précédent, il est clair que l'augmentation du rayon des tiges intérieures entraîne un décalage de la valeur de la longueur d'onde de sortie vers des valeurs plus élevées. Ces résultats mettent en évidence la faisabilité de concevoir un filtre accordable.

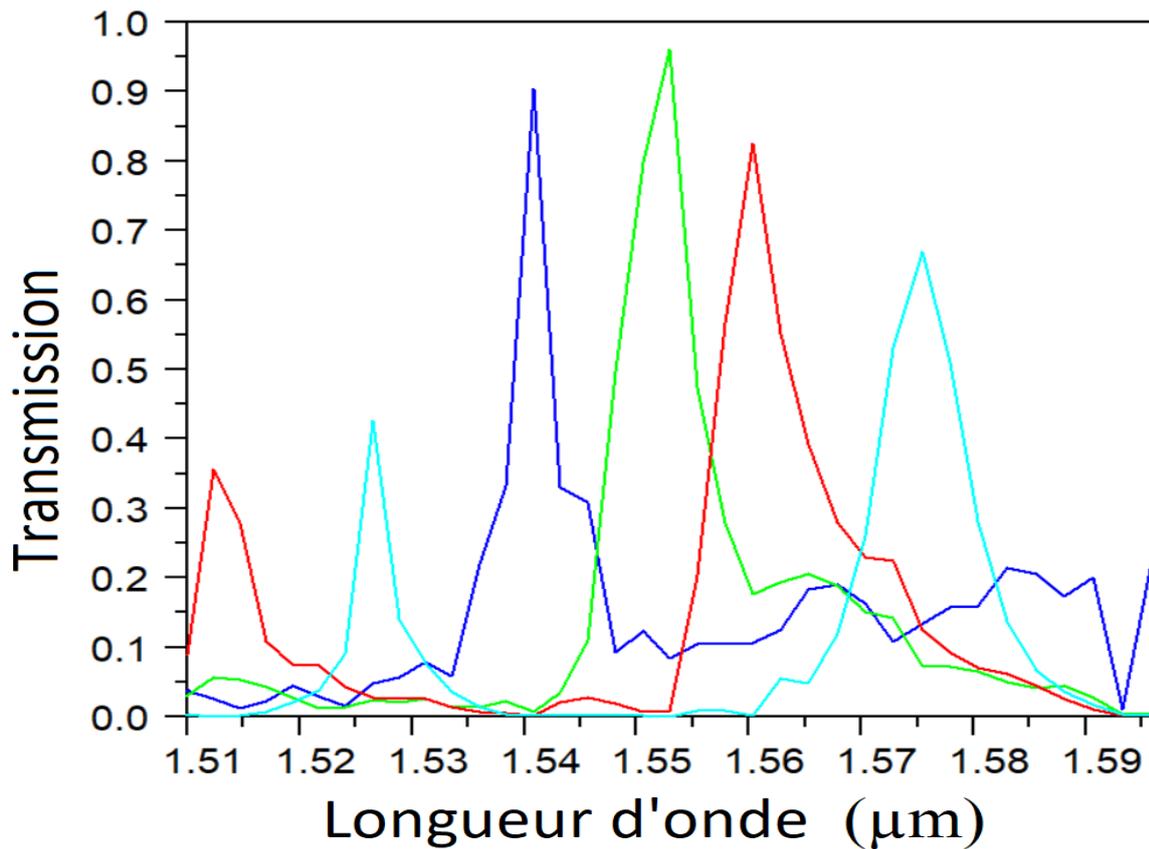
III.7 Démultiplexeur à base de résonateurs en anneaux à cristaux photoniques :

En se basant sur les résultats obtenus précédemment, nous proposons la conception et l'étude de différentes topologies de démultiplexeurs à base de résonateurs en anneaux à cristaux photoniques bidimensionnels.

III.7.1 Première topologie :

La structure initiale du démultiplexeur que nous présentons est illustrée sur la figure III.10.a. Ce démultiplexeur est conçu pour séparer quatre longueurs d'onde distinctes. Il comprend un guide d'onde d'entrée et quatre canaux de sortie, avec quatre résonateurs en anneaux de forme octogonale positionnés entre eux. La sélection de la longueur d'onde de sortie pour chaque canal est réalisée en ajustant le rayon des tiges intérieures de chaque résonateur. Afin d'accomplir cela, nous avons pris en considération les rayons suivants : $R_1=0.077\mu\text{m}$, $R_2=0.092\mu\text{m}$, $R_3=0.107\mu\text{m}$, $R_4=0.122\mu\text{m}$ pour les canaux 1, 2, 3, 4, respectivement. Initialement, la distance entre chaque résonateur est fixée à dix colonnes de tiges ($D=10$).





(b)

Figure III.10 : (a) Représentation schématique du démultiplexeur, et (b) spectre de transmission pour $D=10$.

Après avoir effectué la simulation de cette structure à l'aide du logiciel Fullwave, les résultats obtenus ont été présentés dans la figure (III.9). Selon cette figure III.10.b, nous avons observé la présence de quatre pics résonants situés aux longueurs d'onde $\lambda_1=1.5409 \mu\text{m}$, $\lambda_2=1.5536 \mu\text{m}$, $\lambda_3=1.5605 \mu\text{m}$, $\lambda_4=1.5740 \mu\text{m}$, correspondant respectivement aux sorties des canaux 1, 2, 3 et 4. Ces pics se caractérisent par les taux de transmission suivants : $T_1=91.62 \%$, $T_2=97.24 \%$, $T_3=83.55 \%$, $T_4=68.05 \%$.

Les spécifications des quatre longueurs d'onde sont indiquées dans le tableau III-3 :

Canal	$\lambda(\mu\text{m})$	Transmission (%)	Facteur de qualité (Q)	Diaphonie (dB)
1	1.5409	91.62	430.02	-19.07
2	1.5536	97.24	232.48	-8.49
3	1.5605	83.55	175.90	-4.63
4	1.5740	68.05	201.12	-2.44

Tableau III-3 : Caractéristiques du démultiplexeur pour $D=10$.

Selon les résultats présentés dans le tableau ci-dessus, on observe que le niveau de diaphonie entre les canaux de la structure se situe entre -19.07 dB et -2.44 dB. Ce résultat est insatisfaisant car on constate la présence du signal d'un canal spécifique dans les autres canaux.

Dans le but d'améliorer les taux de transmission du démultiplexeur et de réduire au maximum le Crosstalk, nous nous sommes concentrés sur l'optimisation de la distance entre les différents canaux du démultiplexeur. Pour atteindre cet objectif, nous avons ajusté la distance entre les différents résonateurs. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau III-4, en prenant en compte trois distances différentes : D=10, D=11 et D=12.

Distance	D=10		D=11		D=12	
	T (%)	CT (dB)	T (%)	CT (dB)	T (%)	CT (dB)
Canal 1	91.62	-19.07	99.97	-27.80	99.97	-32.44
Canal 2	97.24	-8.49	85.06	-9.21	94.96	-9.67
Canal 3	83.55	-4.63	76.11	-5.00	73.87	-6.68
Canal 4	68.05	-2.44	65.50	-5.98	59.94	-3.07

Tableau III-4 : Caractéristiques du démultiplexeur proposé pour différentes valeurs de 'D'.

Après l'optimisation de la distance entre les canaux du démultiplexeur, on remarque une diaphonie très faible pour D=11 et D=12 que pour D=10, ce qui réduit au maximum le Crosstalk et améliore le taux de transmission.

La figure III.11 illustre la répartition du champ dans le démultiplexeur pour les longueurs d'onde à la sortie des canaux 1, 2, 3 et 4. Les longueurs d'onde $\lambda_1=1.5409 \mu\text{m}$, $\lambda_2=1.5536 \mu\text{m}$, $\lambda_3=1.5605 \mu\text{m}$ et $\lambda_4=1.5740 \mu\text{m}$ pour d=12 sont clairement identifiées sur la figure. On peut observer que ces longueurs d'onde sont extraites du guide d'onde d'entrée et transférées aux guides d'onde de sortie grâce aux quatre PCRRs.

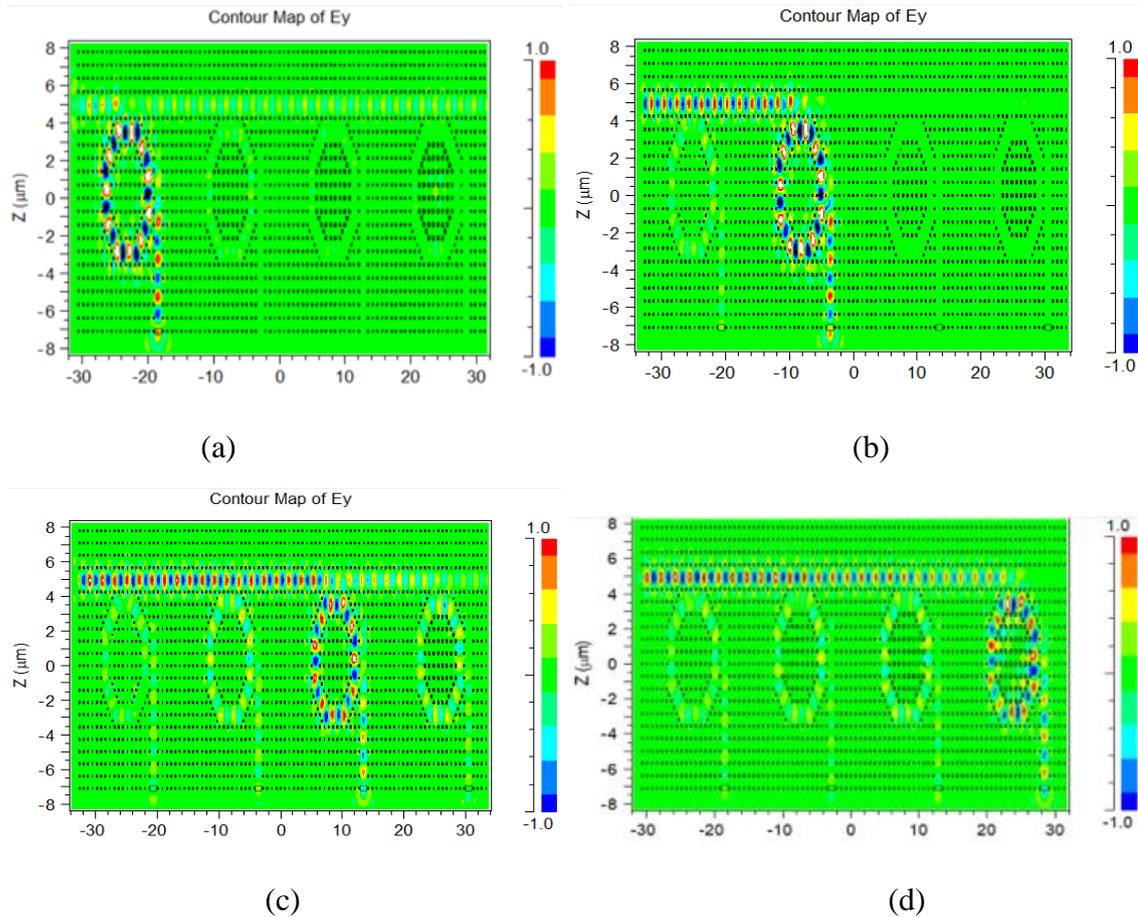
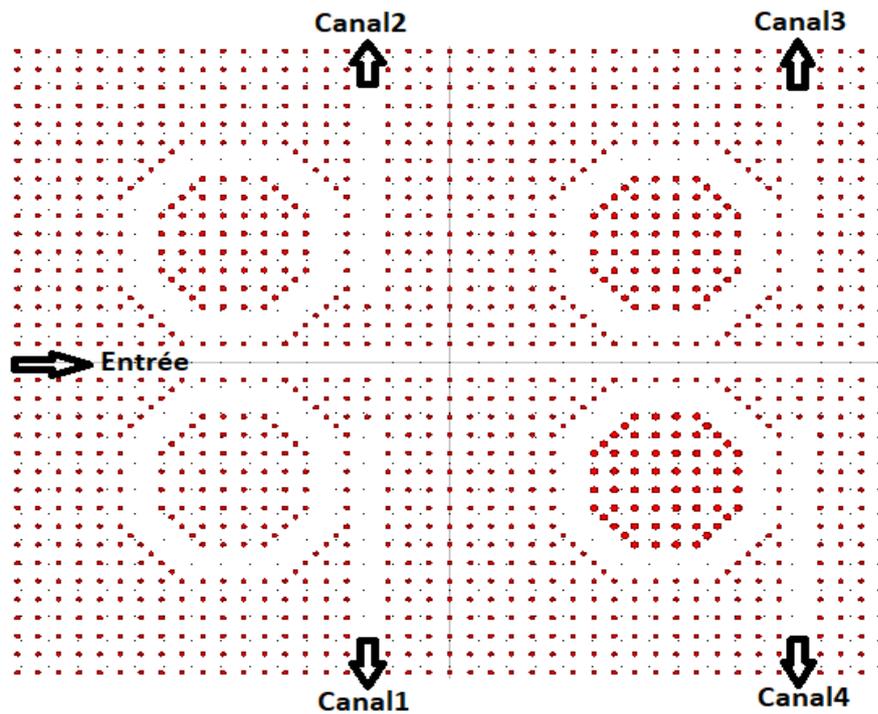


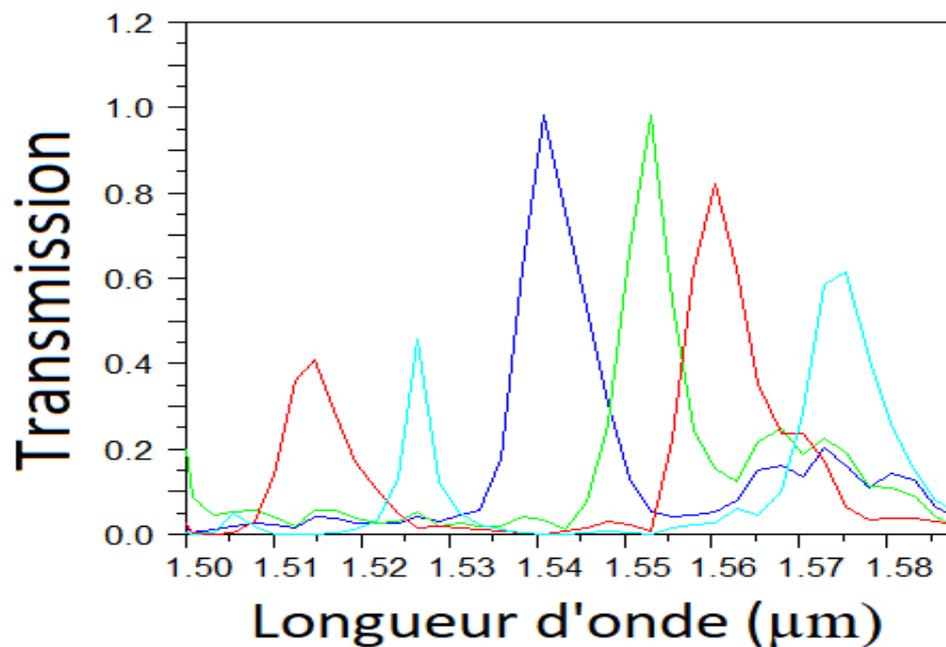
Figure III.11 : Représentation de la distribution du champ électrique dans le démultiplexeur aux longueurs d'onde : (a) $\lambda_1=1.5409 \mu\text{m}$, (b) $\lambda_2=1.5536 \mu\text{m}$, (c) $\lambda_3=1.5605 \mu\text{m}$, (d) $\lambda_4=1.5740 \mu\text{m}$.

III.7.2 Deuxième topologie :

En considérant les mêmes paramètres structuraux du démultiplexeur précédent, nous proposons de concevoir un nouveau démultiplexeur 4 canaux en utilisant le premier filtre comme élément de base de notre démultiplexeur. La structure de ce dernier est schématisée sur la figure III.12.a. Cette structure comprend un guide d'onde d'entrée situé au milieu du démultiplexeur avec deux résonateurs en anneaux de forme octogonale positionnés de chaque côté du guide d'entrée. La sélection de la longueur d'onde de sortie pour chaque canal est réalisée en modifiant le rayon des tiges intérieures de chaque résonateur. Pour cela, nous avons pris en considération les rayons suivants : $R_1=0.077\mu\text{m}$, $R_2=0.092\mu\text{m}$, $R_3=0.107\mu\text{m}$, $R_4=0.122\mu\text{m}$ pour les canaux 1, 2, 3, 4 respectivement. Initialement, la distance entre chaque résonateur est fixée à dix colonnes de tiges ($D=9$).



(a)



(b)

Figure III.12 : (a) Représentation schématique du démultiplexeur, (b) spectre de transmission pour $D=9$.

La simulation de cette structure est effectuée à l'aide du logiciel Fullwave et les résultats obtenus sont présentés sur la figure III.12.b. Selon cette figure, nous avons observé la présence de quatre pics résonants situés aux longueurs d'onde $\lambda_1= 1.5409 \mu\text{m}$, $\lambda_2=1.5536 \mu\text{m}$, $\lambda_3=1.5605$

μm , $\lambda_4=1.5740 \mu\text{m}$, correspondant respectivement aux sorties des canaux 1, 2, 3 et 4. Ces pics se caractérisent par les taux de transmission suivants : $T_1=99.42 \%$, $T_2=99.29 \%$, $T_3=92.99 \%$ $T_4=62.30 \%$.

Les spécifications des quatre longueurs d’onde sont indiquées dans le tableau III-5 :

Canal	λ (μm)	Transmission (%)	Facteur de qualité (Q)	Diaphonie (dB)
1	1.5409	99.42	193.44	-15.51
2	1.5536	99.29	320.74	-11.69
3	1.5605	92.99	160.87	-5.70
4	1.5740	62.30	189.63	-2.80

Tableau III-5 : Caractéristiques du démultiplexeur pour D=9.

Selon les données présentées dans le tableau, on observe que le niveau de diaphonie entre les canaux de la structure se situe entre -15.51 dB et -2.80 dB. Ce résultat peut être amélioré en ajustant la distance entre chaque deux canaux.

Afin d'améliorer les caractéristiques de notre démultiplexeur, nous avons ajusté la distance entre les résonateurs, en prenant en considération trois distances différentes : D=8, D=9 et D=10. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau III-6.

Distance	D=8		D=9		D=10	
	T (%)	CT (dB)	T (%)	CT (dB)	T (%)	CT (dB)
Canal 1	99.97	-15.58	99.42	-14.51	99.97	-23.03
Canal 2	93.23	-11.37	99.29	-11.69	99.97	-17.07
Canal 3	80.88	-4.51	92.99	-4.70	75.98	-6.87
Canal 4	66.92	-2.53	62.30	-2.30	72.22	-2.97

Tableau III-6 : Caractéristiques du démultiplexeur proposé pour différentes valeurs de ‘D’.

Lorsque la distance entre les canaux du démultiplexeur est optimisée, une amélioration significative de la diaphonie est observée pour les valeurs D=8 et D=10 par rapport à D=9, ce qui permet de réduire au maximum les interférences entre les canaux (Crosstalk).

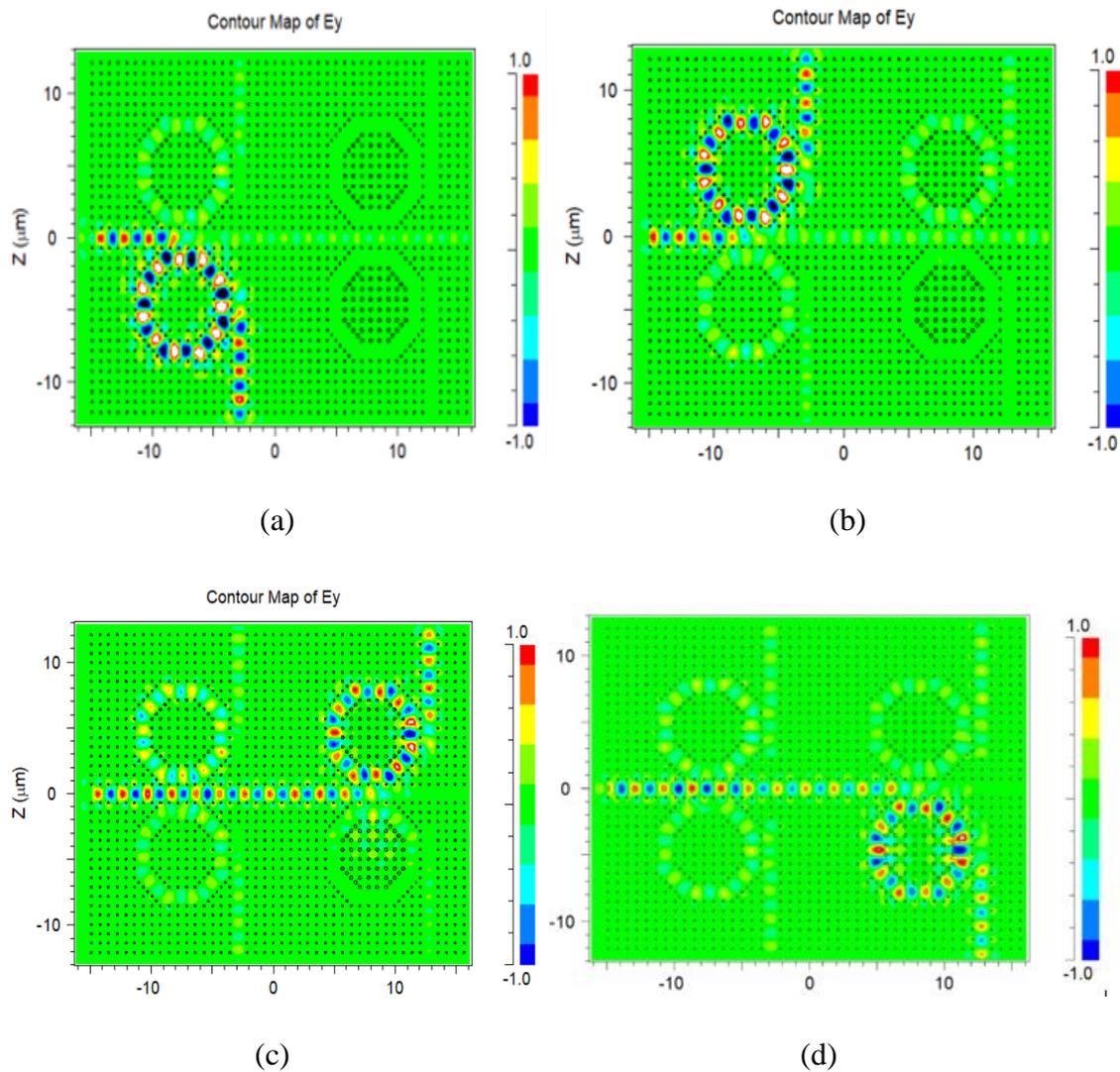
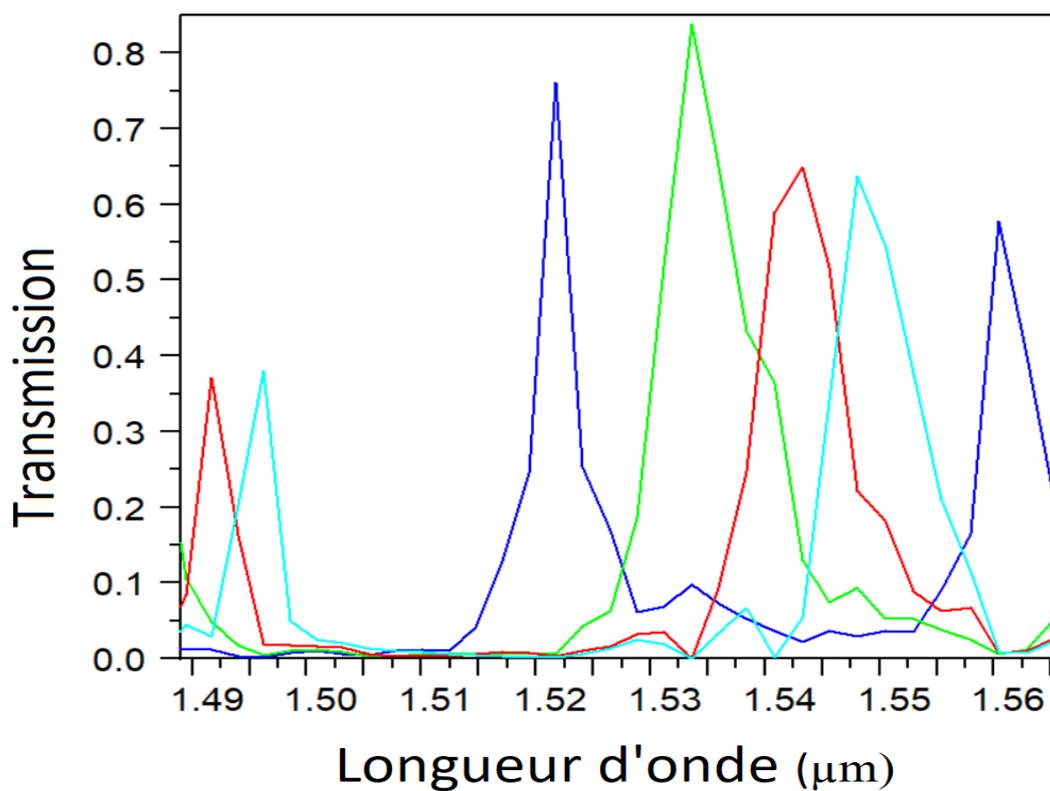
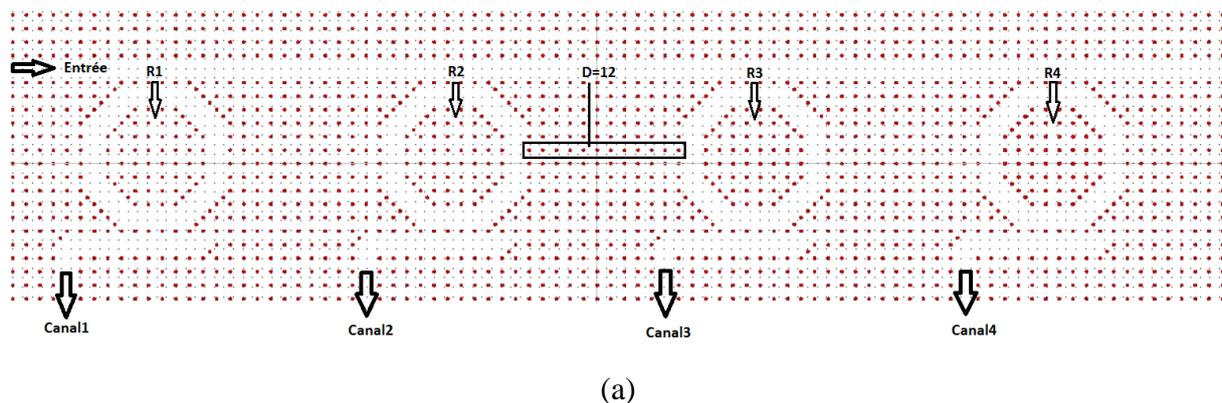


Figure III.13 : Représentation de la distribution du champ électrique dans le démultiplexeur aux longueurs d'onde : (a) $\lambda_1=1.5409 \mu\text{m}$, (b) $\lambda_2=1.5536 \mu\text{m}$, (c) $\lambda_3=1.5605 \mu\text{m}$, (d) $\lambda_4=1.5740 \mu\text{m}$.

La figure III.13 représente la distribution du champ électromagnétique à l'intérieur du démultiplexeur pour $d=10$, mettant en évidence les longueurs d'onde correspondantes aux canaux 1, 2, 3 et 4. Il est clairement observé sur cette figure que les longueurs d'onde $\lambda_1=1.5409 \mu\text{m}$, $\lambda_2=1.5536 \mu\text{m}$, $\lambda_3=1.5605 \mu\text{m}$, $\lambda_4=1.5740 \mu\text{m}$. Sont extraites du guide d'onde d'entrée et transférées aux guides d'onde de sortie à travers les quatre résonateurs réseaux de résonance à permittivité contrôlée (PCRRs).

III.7.3 Troisième topologie :

La figure III.14.a présente la structure du démultiplexeur proposé. Elle est basée sur la structure du deuxième filtre étudié précédemment. Ce démultiplexeur est conçu pour séparer quatre longueurs d'onde. La sélection de la longueur d'onde de sortie pour chaque canal est réalisée en ajustant le rayon des tiges intérieures de chaque résonateur. Pour cela, nous avons considéré les rayons suivants : $R_1=0.065\mu\text{m}$, $R_2=0.071\mu\text{m}$, $R_3=0.077\mu\text{m}$, $R_4=0.083\mu\text{m}$ pour les canaux 1, 2, 3, 4, respectivement. Initialement, la distance entre chaque résonateur est choisie égale à douze colonnes de tiges ($D=12$).



(b)

Figure III.14 : (a) Représentation schématique du démultiplexeur, (b) spectre de transmission pour $D=12$.

Les résultats de simulation obtenus sont présentés sur la figure III.14.b. D'après cette figure, on constate la présence de quatre pics résonants aux longueurs d'onde $\lambda_1=1.5220 \mu\text{m}$, $\lambda_2=1.5336 \mu\text{m}$, $\lambda_3=1.5433 \mu\text{m}$, $\lambda_4=1.5481 \mu\text{m}$, correspondant respectivement aux sorties des canaux 1, 2, 3 et 4. Ces pics se caractérisent par les taux de transmission suivants : $T_1=78.13\%$, $T_2=87.23\%$, $T_3=66.62\%$, $T_4=66.48\%$.

Les spécifications des quatre longueurs d'onde sont indiquées dans le tableau III-7 :

Canal	$\lambda(\mu\text{m})$	Transmission (%)	Facteur de qualité (Q)	Diaphonie (dB)
1	1.5220	78.13	544.82	-18.90
2	1.5336	87.23	194.12	-9.33
3	1.5433	66.62	199.85	-3.07
4	1.5481	66.48	215.01	-3.01

Tableau III-7 : Caractéristiques du démultiplexeur pour D=12.

D'après les résultats présentés dans le tableau, on observe que le niveau de diaphonie entre les canaux de la structure se situe entre -18.90 et -3.01 dB. Selon les résultats obtenus, les caractéristiques du démultiplexeur doivent être améliorées. Pour atteindre cet objectif, nous avons modifié la distance entre les résonateurs. Les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau III-8, en considérant trois distances différentes : D=10, D=11 et D=12.

Distance	D=10		D=11		D=12	
	T (%)	CT (dB)	T (%)	CT (dB)	T (%)	CT (dB)
Canal 1	62.66	-15.75	74.48	-20.54	78.13	-18.90
Canal 2	93.46	-12.96	88.82	-13.96	87.23	-9.33
Canal 3	82.08	-4.96	71.31	-4.70	66.62	-3.07
Canal 4	47.47	-1.35	50.85	-2.01	66.48	-3.01

Tableau III-8 : Caractéristiques du démultiplexeur proposé pour différentes valeurs de 'D'.

Lorsque la distance entre les canaux du démultiplexeur est optimisée, une diminution significative de la diaphonie est observée pour la valeur D=11 par rapport à D=12 et D=10, ce qui permet de réduire au maximum les interférences entre les canaux (Crosstalk).

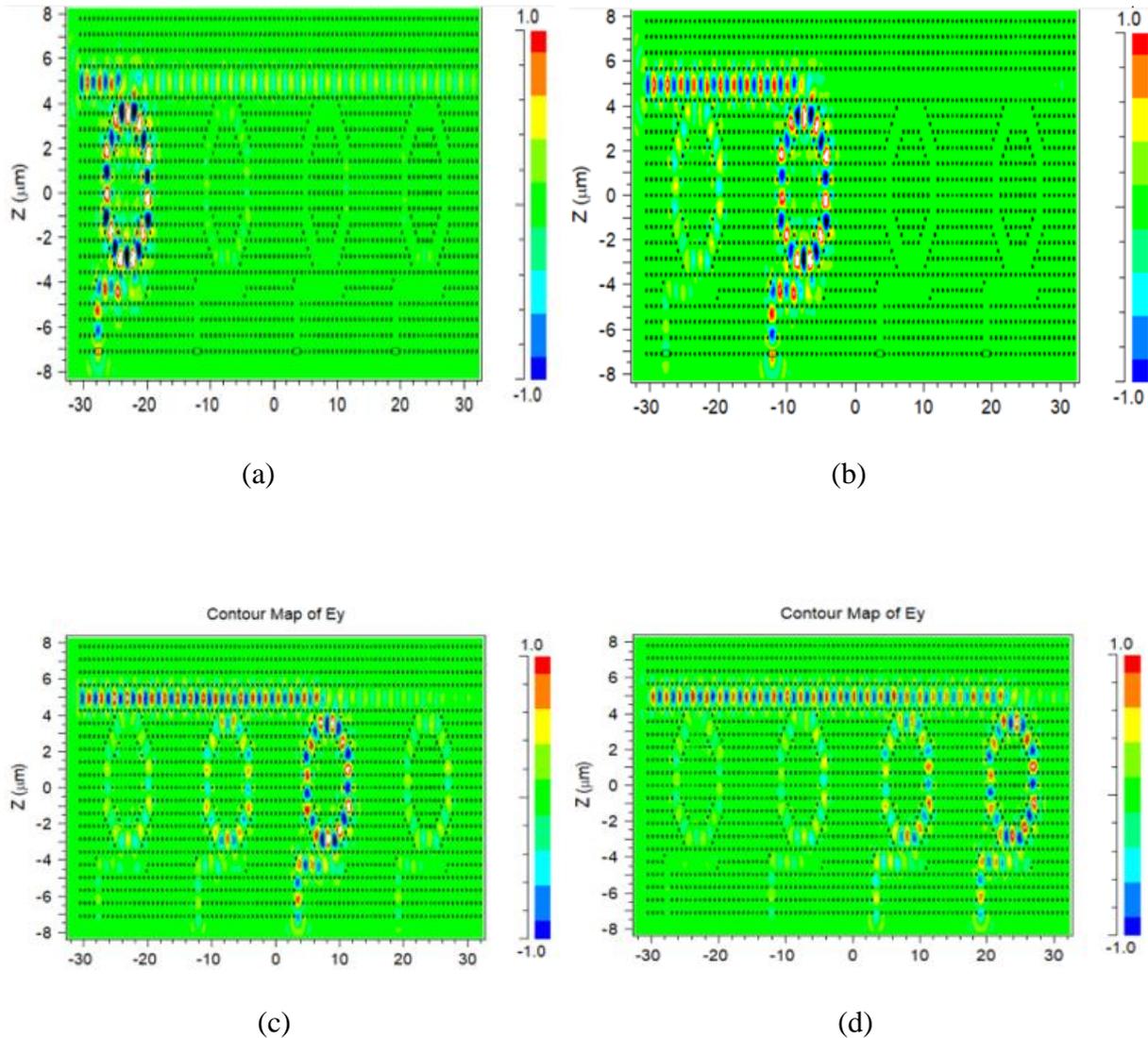


Figure III.15 : Représentation de la distribution du champ électrique dans le démultiplexeur aux longueurs d'onde : (a) $\lambda_1 = 1.5220 \mu\text{m}$, (b) $\lambda_2 = 1.5336 \mu\text{m}$, (c) $\lambda_3 = 1.5433 \mu\text{m}$, (d) $\lambda_4 = 1.5481 \mu\text{m}$.

La figure III.15 représente la répartition du champ dans le démultiplexeur. Selon cette figure, il est clair que notre démultiplexeur est capable de séparer les quatre longueurs $\lambda_1 = 1.5220 \mu\text{m}$, $\lambda_2 = 1.5336 \mu\text{m}$, $\lambda_3 = 1.5433 \mu\text{m}$ et $\lambda_4 = 1.5481 \mu\text{m}$. Elles sont extraites du guide d'onde d'entrée et transférées aux guides d'onde de sortie par l'intermédiaire des quatre résonateurs.

III.7.4 Quatrième topologie :

En se basant sur les paramètres du démultiplexeur précédent, nous proposons la conception d'une nouvelle structure d'un démultiplexeur quatre canaux, comme la montre la figure III.16.a. La sélection de la longueur d'onde de sortie pour chaque canal est réalisée en ajustant le rayon des tiges intérieures de chaque résonateur. Pour cela, nous avons pris en compte les rayons suivants $R_1 = 0.065 \mu\text{m}$, $R_2 = 0.071 \mu\text{m}$, $R_3 = 0.077 \mu\text{m}$, $R_4 = 0.083 \mu\text{m}$ pour les

canaux 1, 2, 3, 4 respectivement. Initialement, la distance entre chaque résonateur est fixée à dix colonnes de tiges ($D=11$).

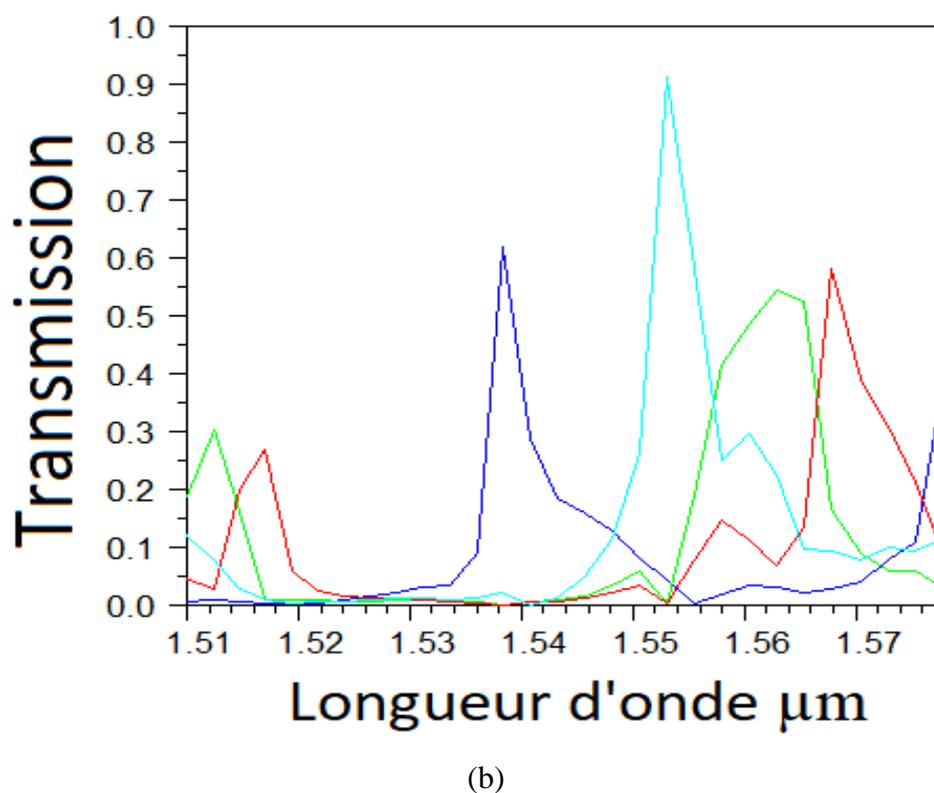
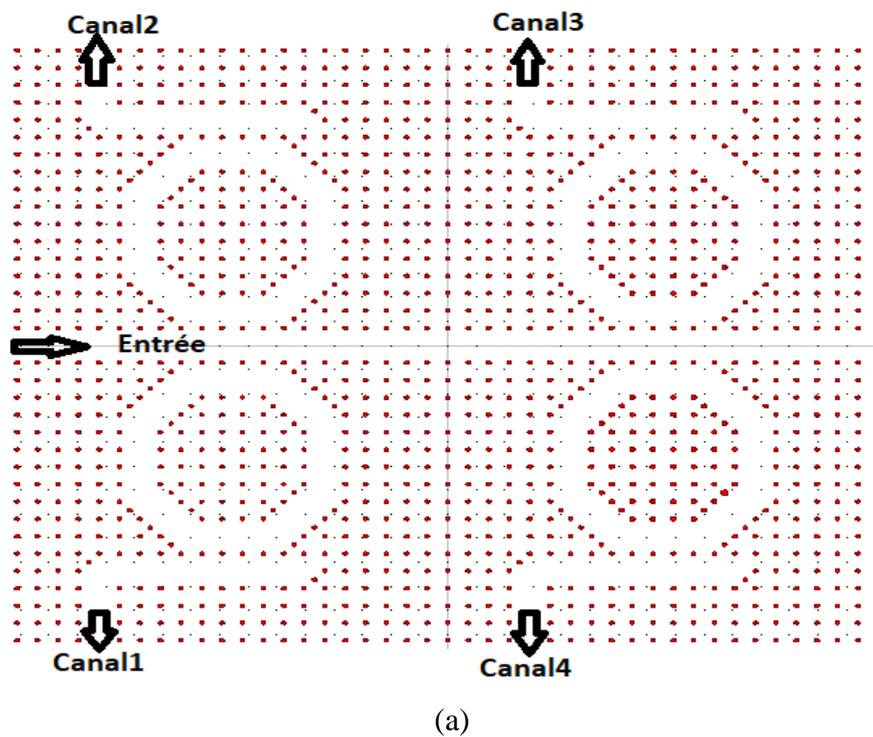


Figure III.16 : (a) Représentation schématique du démultiplexeur, et (b) spectre de transmission pour $D=11$.

Après avoir simulé cette structure, les résultats obtenus et qui sont présentés sur la figure III.16.b, révèlent la présence de quatre pics résonants aux longueurs d'onde $\lambda_1=1.5220 \mu\text{m}$, $\lambda_2=1.5536 \mu\text{m}$, $\lambda_3=1.5433 \mu\text{m}$, $\lambda_4=1.5481 \mu\text{m}$, qui correspondent respectivement aux sorties des canaux 1, 2, 3 et 4. Ces pics se caractérisent par les taux de transmission suivants : $T_1=63.68\%$, $T_2=93.68\%$, $T_3=55.19\%$ et $T_4=59.67\%$.

Les spécifications des quatre longueurs d'onde sont indiquées dans le tableau III-9 :

Canal	$\lambda(\mu\text{m})$	Transmission (%)	Facteur de qualité (Q)	Diaphonie (dB)
1	1.5220	63.68	461.18	-14.93
2	1.5336	93.68	235.93	-13.41
3	1.5433	55.19	181.6	-2.40
4	1.5481	59.67	266.91	-3.11

Tableau III-9 : Caractéristiques du démultiplexeur pour $D=11$.

Les données du tableau montrent que le niveau de diaphonie entre les canaux de la structure varie entre -14.93 dB et -3.11 dB. Cependant, ces résultats ne sont pas satisfaisants et ne répondent pas à nos attentes.

Afin d'améliorer les performances de notre dispositif, nous nous sommes intéressés à l'optimisation de la distance entre les canaux. Pour cela, nous avons procédé à l'ajustement de la distance entre les résonateurs en prenant en considération trois distances $D=9$, $D=10$ et $D=11$. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau III-10.

Distance	D=9		D=10		D=11	
	T (%)	CT (dB)	T (%)	CT (dB)	T (%)	CT (dB)
Canal 1	57.54	-26.59	69.36	-26.79	63.68	-14.93
Canal 2	79.44	-12.52	94.03	-16.41	93.68	-13.41
Canal 3	59.47	-4.87	63.78	-11.92	55.19	-2.40
Canal 4	62.42	-3.83	58.87	-11.05	59.67	-3.11

Tableau III-10 : Caractéristiques du démultiplexeur proposé pour différentes valeurs de 'D'.

Après avoir réduit la distance de $D=11$ à $D=10$ et $D=9$ entre les canaux du démultiplexeur, on constate une diaphonie bien faible ce qui diminue le Crosstalk et améliore la performance de notre dispositif.

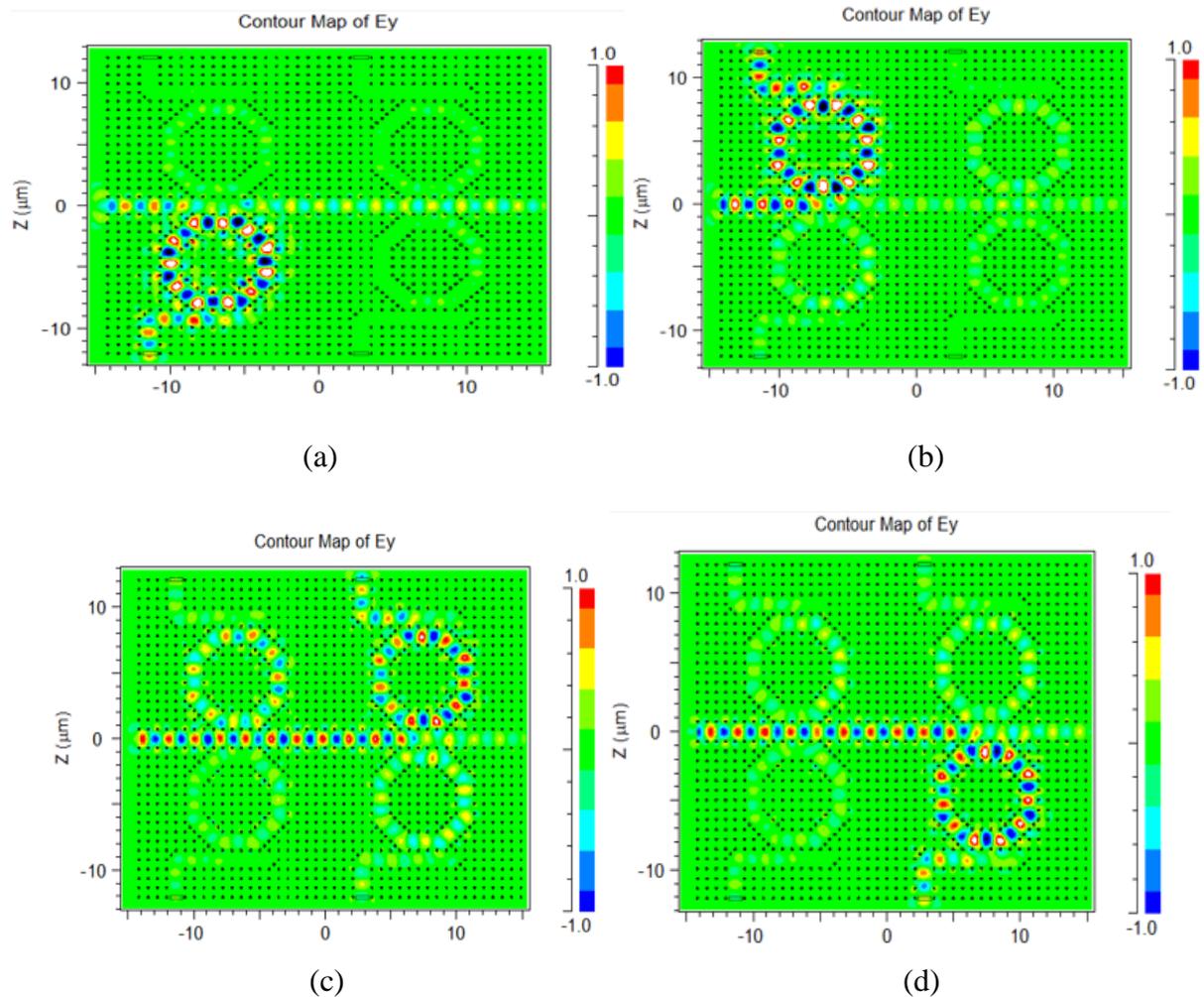


Figure III.17 : Représentation de la distribution du champ électrique dans le démultiplexeur aux longueurs d'onde (a) $R_1=0.065\mu\text{m}$, (b) $R_2=0.071\mu\text{m}$, (c) $R_3=0.077\mu\text{m}$, (d) $R_4=0.083\mu\text{m}$.

La figure III.17 représente la distribution du champ électromagnétique à l'intérieur du démultiplexeur, mettant en évidence les longueurs d'onde correspondantes aux canaux 1, 2, 3 et 4. Il est clair sur cette figure que les longueurs d'onde $\lambda_1=1.5220\mu\text{m}$, $\lambda_2=1.5536\mu\text{m}$, $\lambda_3=1.5433\mu\text{m}$, $\lambda_4=1.5481\mu\text{m}$ sont extraites du guide d'entrée et transférées aux guides d'onde de sortie à travers les quatre résonateurs.

III.8 Récapitulation :

D'après notre étude, on constate les avantages suivants :

- Une optimisation dans la miniaturisation du dispositif.
- Possibilité de démultiplexer 4 longueurs d'ondes simultanément.
- Simplicité de la topologie de la structure (utilisation des défauts linéaires et ponctuels).
- Un espacement entre canaux acceptable avec un rendement de transmission amélioré.

III.9 Conclusion :

Au cours de ce chapitre, nous avons développé différentes configurations de démultiplexeurs à base de cristaux photoniques bidimensionnels. Les dispositifs sont composés de quatre résonateurs en anneaux à cristaux photoniques de forme octogonale. La différence entre les conceptions proposées réside dans la disposition des résonateurs et au types des guides d'onde de sortie. Dans le but d'améliorer les performances de ces démultiplexeurs et de démontrer leur efficacité, nous avons optimisé l'espacement entre les différents canaux. Les résultats obtenus confirment la performance de nos dispositifs.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Notre travail met en évidence les avantages de l'utilisation des cristaux photoniques (CPs) pour le démultiplexage en longueurs d'onde. Les CPs sont des matériaux caractérisés par une variation périodique de l'indice de réfraction. Cette caractéristique permet à ces matériaux de contrôler la propagation de la lumière, créant ainsi des zones d'interdiction de propagation pour certaines longueurs d'ondes à l'intérieur du cristal photonique. Ces zones sont appelées bandes interdites photoniques. Les cristaux photoniques sont largement utilisés dans plusieurs applications comme le guidage, le filtrage, le démultiplexage et la détection.

Dans le cadre de cette étude, nous nous sommes concentrés sur l'analyse des composants optiques utilisant des cristaux photoniques bidimensionnels (CP-2D). Nous avons particulièrement focalisé notre attention sur la conception des démultiplexeurs qui jouent un rôle essentiel dans les circuits photoniques intégrés (photonic integrated circuits, PICs) et les systèmes de télécommunications optiques à multiplexage en longueur d'onde (Wavelength Division Multiplexing, WDM).

Dans un premier temps, nous avons entrepris une étude approfondie des principes fondamentaux des cristaux photoniques, offrant ainsi un aperçu général sur les différents types de ces cristaux et de leurs propriétés électromagnétiques. Nous avons également abordé les différentes méthodes numériques utilisées dans la modélisation des cristaux photoniques, en mettant en avant l'ingénierie des cristaux.

Par la suite, nous avons détaillé le concept des démultiplexeurs en utilisant les cristaux photoniques, en mettant en évidence leurs caractéristiques distinctives. Nous avons également présenté des exemples d'applications qui illustrent les différentes configurations de démultiplexeurs à cristaux photoniques basés sur les résonateurs en anneaux à cristaux photoniques (PCRRs). Les illustrations fournies ont mis en évidence l'efficacité et la polyvalence de ces dispositifs dans des contextes pratiques spécifiques, confirmant ainsi leur pertinence et leur utilité dans des applications concrètes.

Dans la dernière partie de cette étude, nous avons développé différentes configurations de démultiplexeurs à quatre canaux en utilisant la méthode des différences finies dans le domaine temporel bidimensionnel (FDTD-2D). Ces démultiplexeurs sont basés sur le couplage entre des guides d'onde et des résonateurs en anneaux à cristaux photoniques de forme octogonale. 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.

Références bibliographie

Références bibliographie :

- [1] H. Alipour-Banaei, A. Rostami, et al. <<Wavelength division demultiplexer for optical communication applications based on photonic crystals >>, PNRL, Université de Tabriz, Iran, 2011.
- [2] E. Yablonovitch, T.J. Gmitter, and K.M. Leung. <<Physical Review Letters 67(17), 2295–2298 >>,1991.
- [3] R. Coccioli, M. Boroditsky, K.W. KIM, Y. Rahmat-Samii, E. Yablonovitch, <<Smallest possible electromagnetic mode volume in a dielectric cavity>>IEE Proceedings optoelectronics, vol. 145, n° 6, 1998.
- [4] H. Abri Badaoui, << Étude et conception des micros composants à base des cristaux photoniques bidimensionnels >>, Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, 2012.
- [5] Sandrine MASSY, <<Contribution à la réalisation de fonctions optiques à base de cristaux photoniques sur LiNbO3>>, Thèse de doctorat N° 4, Université de Limoges, 2004.
- [6] A. Kahlouche, <<Étude des potentialités de couches minces sol-gel dopées par des nanoparticules magnétiques pour la conception des cristaux magnéto-photoniques >>, Thèse de doctorat, Université de M'sila, 2014.
- [7] R. BENDJELLOUL, <<Étude de couplage dans les guides d'onde à cristaux photoniques>>, Thèse Doctorat, Université Mentouri – Constantine,2009.
- [8] F. MEHDIZADEH, M. SOROOSH, <<A new proposal for eight-channel optical demultiplexer based on photonic crystal resonant cavities>>, Springer Science+Business Media New York, DOI 10.1007/s11107 015 0531 1, 2015.
- [9] Robert Michaël Farha, << Étude d'une structure à cristal photonique « LOM » gravée dans un guide Ti: linbo3 dopé erbium pour l'émission de la lumière à 1,55µm >>, thèse doctorat, Université Pierre et Marie Curie ,2010.
- [10] S. BOUAMAMI, << Etude des propriétés de dispersion dans les cristaux photoniques bidimensionnel : Application a l'étude de différents types de démultiplexeurs en longueurs d'onde (WDM)>>, thèse doctorat, université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbes,2015.
- [11] X. Wang, Z. Xu, N. Lu, J. Zhu, and G. Jin, <<Ultrapact refractive index sensor based on microcavity in the sandwiched photonic crystal waveguide structure>> Optics Communications, vol. 281, no. 6, pp. 1725–1731, Mar. 2008.

- [12] J. S. Foresi, <<Optical confinement and light guiding in high dielectric contrast materials systems>> PhD Thésis, Massachusetts Institute of Technology, 1997.
- [13] Olivier, S., Benisty, H., Rattier, sbMuc., hW, Ce.i, Qiu, M., Karlsson, A., Smith, C. J. M., Houdre, R., Oesterle, <<U. Resonant and nonresonant transmission through waveguide bends in a planar photonic crystal>>. Applied physics letters, vol 79, n° 16, p 2514-2516, 2001.
- [14] Smith, C. J. M., De la rue, R. M., Rattier, M., Olivier, S., Benisty, H., Weisbuch, C., Krauss, T. F., Houdré, R., Oesterle, << U. Coupled guide and cavity in a two-dimensional photonic crystal>>. Applied Physics letters, vol 78, n° 11, p 1487-1489, 2001.
- [15] E. YABLONOVITCH, <<Photonic band-gap crystals>>, J. Phys. Condens. Matter, vol.5, pp.2443- 2460, 1993.
- [16] F. LALLAM<< conception des nouvelles topologies des démultiplexeurs sélectifs à plusieurs canaux en longueurs d'ondes à base de cristaux photoniques bidimensionnels cps2d >>thèse de doctorat, université abou bakr belkaïd– tlemcen –,2019.
- [17] S. RAWAL, R.K. SINHA, <<Design, analysis and optimization of silicon-on-insulator photonic crystal dual band wavelength demultiplexer>>, Optics Communications, vol. 282, pp. 3889-3894, 2009.
- [18] S. GHEZALI, F. TAYEBOUN, K. A. MERADI, <<Nine Channels Wavelength Division Demultiplexer Based upon Two-Dimensional Photonic Crystal>>, Progress in Electromagnetics Research M, Vol. 69, 107–114, 2018.
- [19] Wu, Z., K. XIE, and H. YANG, <<Band gap properties of two-dimensional photonic crystals with rhombic lattice>>, Optik, Vol. 123, 534–536, 2012.
- [20] D. NEEL, <<Étude en champ proche optique de guides à cristaux photoniques sur SOI>>, Thèse de doctorat, L'institut national des sciences appliquées de Lyon France, 2006.
- [21] A.E. AKOSMAN, M. MUTLU, H. KURT, E. OZBAY, <<Dual-frequency division demultiplexer based on cascaded photonic crystal waveguides>>, Phys. B Condens. Matter. 407 4043–4047.2012.02.024, 2012.
- [22] A. ROSTAMI, H.A. BANAEI, F. NAZARI, A. BAHRAMI, <<An ultra compact photonic crystal wavelength division demultiplexer using resonance cavities in a modified Y-branch structure>>, Opt. - Int. J. Light Electron Opt. 122 1481–1485.2010.05.036, 2011.

- [23] H. ALIPOUR-BANAEI, F. MEHDIZADEH, S. SERAJMOHAMMADI, <<A novel 4-channel demultiplexer based on photonic crystal ring resonators>>, Opt. - Int. J. Light Electron Opt. 124 .5964–5967. 2013.04.117. 2013.
- [24] Y. AKAHANE, T. ASANO, B. S. SONG, ET S. NODA, <<High-Q photonic nanocavity in a two- dimensional photonic crystal>>, Nature, vol.425, N°6961, p.944–947, 2003.
- [25] H. ABSALAN, <<A Four-Channel Optical Demultiplexer Using Photonic Crystal-Based Resonant Cavities>>, J. Opt. Commun, 39(4): 369–373 2018.
- [26] Z. QIANG, W. ZHOU, R.A. SOREF. <<Optical add-drop filters based on photonic crystal ring resonators>>, Optics Express, vol. 15, pp. 1823–1831, 2007.
- [27] A .BENMERKHI , <<optimisation du confinement de la lumière dans des cavités a cristaux photoniques >>,Thèse Doctorat, Université Mentouri – Constantine,2012.
- [28] L.GHISA. << Couplage de micro résonateurs. Applications aux fonctions optiques de traitement du signal >>. Physique [physics], These Doctorat Université Rennes 1, 2008.
- [29] Y.F. XIAO, B. MIN, X. JIANG, C.H. DONG, L. YANG, <<Coupling whispering-gallerymode micro cavities with modal coupling mechanism>>, IEEE Journal of Quantum Electronics, vol. 44, pp. 1065–1070, 2008.
- [30] F. MEHDIZADEH, M. SOROOSH, H. ALIPOUR-BANAEI, <<An optical demultiplexer based on photonic crystal ring resonators>>, optik, International Journal for Light and Electron Optics, 2016.
- [31] MAHMOUD YUCEF MAHMOUD, B. GHAOUTI, F. METEHRI, <<channel drop filter using photonic crystal ring resonators for CWDM>> optik, volume 125, page 4718-4721,2014.
- [32] Tavousi A, <<Wavelength-division demultiplexer based on hetero-structure octagonal shape photonic crystal ring resonators>>, Optik, Volume 179, Pages 1169-1179, 2019.

Résumé

Les cristaux photoniques se réfèrent à des nano-structures diélectriques caractérisées par une modulation périodique de leur indice de réfraction à l'échelle de la longueur d'onde. Cette propriété leur confère la capacité de bloquer la propagation de la lumière dans des plages spécifiques appelées bandes interdites photoniques. L'introduction de défauts au sein de ces structures offre aux cristaux photoniques un avantage significatif en termes de confinement et de guidage de la lumière. Le travail présenté dans ce manuscrit vise initialement à concevoir différentes configurations optimisées de démultiplexeurs à cristaux photoniques, capables de séparer quatre longueurs d'onde différentes. Une étude approfondie a été réalisée afin d'examiner en détail les paramètres influençant le fonctionnement de ces composants. Pour cela, des simulations, En utilisant la méthode 2D-FDTD, ont été menées pour évaluer les différentes combinaisons de ces paramètres et déterminer celles qui offrent les meilleurs résultats en termes de transmission et de diaphonie.

Mots clés : Cristaux photoniques, bande interdite, résonateur en anneau, démultiplexeur, diaphonie.

Abstract

Photonic crystals refer to dielectric nanostructures characterized by a periodic modulation of their refractive index at the scale of the wavelength. This property confers upon them the ability to block the propagation of light in specific ranges known as photonic bandgaps. Introducing defects within these structures provides significant advantages to photonic crystals in terms of light confinement and guiding. The work presented in this manuscript initially aims to design different optimized configurations of photonic crystal demultiplexers capable of separating four different wavelengths. An in-depth study was conducted to examine in detail the parameters influencing the operation of these components. To accomplish this, simulations using the 2D-FDTD method were carried out to evaluate various combinations of these parameters and determine those that offer the best results in terms of transmission and crosstalk.

Keywords: Photonic crystals, bandgap, ring resonator, demultiplexer, crosstalk