

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان -

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Télécommunications

Spécialité : Systèmes des Télécommunications

Par :

BENMALEK Nadra Manel

BENLADGHEM Nawal

Sujet

Conception des Démultiplexeurs en Cristaux Photoniques 2D pour les Système DWDM

Soutenu publiquement, le 04/07/2019, devant le jury composé de :

| | | | |
|------------------|---------------------------|---------------|--------------|
| Mme L. BENSEDDIK | Maître assistante (A) | Univ. Tlemcen | Présidente |
| Mme H. BADAOU | Maître de conférences (A) | Univ. Tlemcen | Encadrante |
| Mr M. ABRI | Professeur | Univ. Tlemcen | Co-Encadrant |
| Mme F. LALLAM | Maître de conférences (B) | Univ. Tlemcen | Examinatrice |

Dédicace

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

*À mes très chères parents **Benmalek mohamed** et **Khelalfa linda** qui sont toujours sacrifiés pour me voir réussir, que dieu leur procure bonne santé et longue vie et garde dans son vaste paradis*

*A mon frère **Amine** et ma petite sœur **warda** et à toute la famille*

*Je tiens à remercier le cher **Korso feciane omar***

*A mes amis **bendaoud mouhamed**, **Azzouz warda** , **belharane badrou**.*

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce Projet soit possible, je vous dis merci.

Nadra

Dédicace

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

*À mes très chères parents **Benladghem Boudjemaa Benladghem Halima** qui sont toujours sacrifiés pour me voir réussir, que dieu leur procure bonne santé et longue vie et garde dans son vaste paradis ;*

*A mes sœurs **Souad** et **Hanane** et a toute la famille*

*A mes amies **Djaawani Amel, Benyekhlef Meriem, Bouhafis Hakoum, Rahmi Bachir et Bendaoud Mouhammed.***

Nawel

REMERCIEMENTS

Nous remercions ALLAH le tout puissant qui nous a donné durant toutes ces années, la santé, le courage et la foi en nous même pour pouvoir avancer et mener nos études à leurs termes.

La réalisation d'un projet et ce qu'elle nécessite de connaissances théoriques et de savoir-faire pratique, est une opportunité intéressante pour apprendre à gérer un travail du début jusqu'à la fin .L'organisation s'avère un élément déterminant pour la bonne conduite du projet et pour les réalisations des différentes phases qui le constituent. Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à nos encadreurs :Madame ABRI Née BADAoui Hadjira Maitre de conférence classe A à l'université Abou-Bekr Belkaid et Monsieur ABRI Mehadji professeur à l'université Abou-Bekr Belkaid qui n'ont pas épargné le moindre effort dans l'encadrement de ce projet qu'ils trouvent ici l'expression de nos sincères remerciements d'avoir guidé et suivi toute la période de notre travail. Nous sommes très honorés par l'intérêt porté à ce travail par le président et les membres du jury qui ont accepté de l'évaluer.

En premier lieu, nous remercierons Mme BENSEDDIK Leila maître assistance (A) à l'université Abou-Bekr Belkaid d'avoir accepté de présider ce jury. Aussi, nous présentons notamment notre profonde gratitude à Mme LALLAM Farah maître de conférences classe B d'université Abou-Bekr Belkai d'avoir examiné ce modeste travail. Pour la même occasion, nous adressons nos remerciements à tous nos enseignants pour leurs efforts épargnés qui ont guidé nos pas et enrichi nos travaux tout le long de nos études universitaires. Nous adressons, enfin, nos sincères remerciements à toute personne qui a contribué de près ou de loin à la réalisation de notre projet.

Résumé :

Les cristaux photoniques sont des nanostructures périodiques de matériaux qui ont les mêmes effets de la propagation des photons que ceux des électrons pour les cristaux usuels: certaines longueurs d'onde peuvent se propager tandis que d'autres non. Les matériaux à bande interdite photonique (BIP) ou cristaux photoniques sont des structures périodiques capables de contrôler la propagation des ondes électromagnétiques. Il en existe 3 formes qui sont caractérisées par le nombre de directions de la périodicité de l'indice optique (1D, 2D, 3D).

Dans ce travail, nous avons abordé des nouvelles topologies de démultiplexeur en longueur d'onde à base de cristaux photoniques bidimensionnels dans le but de séparer les longueurs d'onde très utilisées dans les systèmes de transmission optique. Les performances du démultiplexeurs conçus en terme de transmission seront effectuées et analysées avec le logiciel COMSOL.

Mots clés : Cristaux photoniques, bande interdite photonique (BIP), $W_1^k A$, $W_3^k A$, guide d'onde, filtre en anneau, démultiplexeur, logiciel COMSOL.

Abstract :

Photonic crystals are periodic nanostructures of materials that have the same effects on photon propagation as conventional crystals have on electron propagation: some wavelengths can propagate while others cannot. Photonic band gap (PBG) materials or photonic crystals are structures that modify the propagation of electromagnetic waves. There are 3 forms that are characterized by the number of directions of the periodicity of the optical index (1D, 2D, 3D).

In this work, we have addressed new wavelength demultiplexer topologies based on two-dimensional photonic crystals in order to separate the wavelengths widely used in optical transmission systems. The performance of the demultiplexer designed in terms of transmission will be carried out and analysed using the COMSOL software.

Key words: Photonic crystals, photonic band gap, $W_1^k A$, $W_3^k A$, waveguide, filter in rig, demultiplexer, periodicity, COMSOL software.

ملخص:

البلورات الضوئية هي هياكل دورية للمواد التي تحتوي على نفس التأثيرات لانتشار الفوتونات التي تحدثها البلورات المعتادة فيما يخص الالكترونيات: بعض الاطوال الموجية يمكن ان تنتشر بينما البعض الاخر لا ينتشر. المواد ذات فجوة الحزمة الضوئية (BIPs) او البلورات الضوئية هي هياكل تعديل انتشار الموجات الكهرومغناطيسية . هناك 3 اشكال تتميز بعدد اتجاهات الفهرس البصري , (D1, D2, D3) . في هذا العمل ناقشنا طوبولوجيا مزبل تعدد الارسال الجديدة في الطول الموجي على اساس بلورات فوتونية ثنائية الابعاد لغرض انفصال الاطوال الموجية المستخدمة على نطاق واسع في انظمة النقل البصري و العرض ضمن DEMUX المصممة من حيث الانتقال سيتم تنفيذها و تحليلها مع البرنامج COMSOL.

الكلمات المفتاحية : البلورات الضوئية، فجوة النطاق (BIPs) ، مزبل تعدد الارسال , $W_1^K A$, $W_3^K A$ ، البرنامج COMSOL ، دليل موجي، مرشح.

Table des matières

| | |
|-----------------------------|------|
| Remerciements | i |
| Résumé | ii |
| Abstract | iii |
| Résumé en arabe | iv |
| Table des matières | v |
| Sigles et Abréviations..... | viii |
| Liste des figures..... | x |
| Liste des tableaux | xiv |
| Introduction Générale..... | 1 |

Chapitre I : Définition et concepts sur les cristaux photoniques

| | |
|--|----|
| I.1. Généralités sur les cristaux photoniques..... | 4 |
| I. 2. Cristaux photonique naturels..... | 5 |
| I. 2.1. Les papillons..... | 5 |
| I. 2. 2. Les oiseaux..... | 6 |
| I.2.3.Opale..... | 6 |
| I.3. Cristaux photoniques Artificiels..... | 7 |
| I. 3.1. Différents types de Cristaux photoniques..... | 7 |
| I. 3.1.1 Cristaux photoniques unidimensionnels (miroirs de Bragg)..... | 7 |
| I. 3.1. 2. Cristal photonique bidimensionnels..... | 8 |
| I. 3.1. 3. Cristal photonique tridimensionnels..... | 10 |
| I.4. Caractéristiques géométriques et physiques d'un cristal photonique..... | 11 |
| I.4.1. Le contraste d'indice Δ_n | 11 |

| | |
|---|----|
| I.4.2. Les périodes..... | 12 |
| I.4.3. Le facteur de remplissage f..... | 12 |
| I.5. Réseau direct, réseau réciproque et zone de Brillouin..... | 13 |
| I.5.1. Réseau direct..... | 13 |
| I. 5.2. Réseau réciproque..... | 13 |
| I. 5. 2.1. Zone de Brillouin..... | 13 |
| I.6. La méthode des ondes planes..... | 15 |
| I. 6. 1. Equations de Maxwell dans les cristaux photoniques 2D..... | 15 |
| I. 6.1.1. Equations de Maxwell dans l'espace réel..... | 16 |
| I.7.Définition du gap..... | 16 |
| I. 7. 1. Diagramme de bande..... | 17 |
| I. 7. 2. Paramètre d'influence sur la bande interdite..... | 17 |
| I.8. Les défauts..... | 18 |
| I.8.1. Défauts ponctuels « cavités »..... | 19 |
| I.8.2.Défauts étendus..... | 20 |
| I.9.Applications des cristaux photoniques..... | 21 |
| I.9.1.Les guides d'ondes rectilignes..... | 21 |
| I.9.1.1. Guide $W_1^K A$ en structure triangulaire..... | 21 |
| I.9.2 Filter add / drop..... | 23 |
| I.9.3. DEMUX-coupler..... | 23 |
| I.9.4. Fibres optiques..... | 25 |
| I.9.5. Le diviseur a cristaux photoniques..... | 26 |
| I.9.5.1. Définition..... | 26 |
| I.9.5.2 Travaux réalisées sur les diviseurs à base de cristaux photoniques..... | 27 |
| I.10.Conclusion..... | 28 |

Chapitre II : Démultiplexage en cristaux photoniques

| | |
|---|----|
| II.1. Introduction | 31 |
| II.2 Etude de cavités à Cristaux Photoniques 2D | 31 |
| II.2.1 Etude de la cavité S1 pour un défaut de substitution..... | 31 |
| II.2.1.1 Variation du rayon de la maille centrale (r) | 33 |
| II.3 Etudes des guides à cristaux photoniques..... | 35 |
| II.3.1 Conception d'un guide d'onde de type virage à 60° | 36 |
| II.4. Application des multiplexeurs en cristaux photoniques | 37 |
| II.4.1. Etude d'un démultiplexeur..... | 38 |
| II.5.conclusion | 42 |

Chapitre III : Présentation des résultats de simulation

| | |
|---|----|
| III.1. Introduction | 45 |
| III.1.2. Définition de logiciel COMSOL | 45 |
| III.1.3. Présentation des résultats de simulation | 46 |
| III.3.1. Les guides ondes | 46 |
| III.3.1.1. Cristal photonique 2D sans défaut..... | 47 |
| III.3.1.2. Cristal photonique 2D avec défaut..... | 50 |
| III.3.2. Filtre en anneau | 50 |
| III.3.3. Les démultiplexeurs en longueur d'onde..... | 57 |
| III.3.3.1 Un démultiplexeur à deux anneaux base des cristaux photoniques 2D | 57 |
| III.3.3.1 Un démultiplexeur à quatre anneaux base des cristaux photoniques 2D | 64 |
| III.4. Conclusion..... | 67 |
| Conclusion général..... | 68 |

Sigles et Abréviations :

WDM: Wavelength Division Multiplexing.

BIP: Bande Interdite Photonique.

CP: Cristal photonique.

n : l'indice de réfraction.

L : l'épaisseur d'un matériel.

\vec{H} : Le champ magnétique.

\vec{E} : Le champ électrique.

TM : Transverse magnétique.

TE : Transverse électrique.

1D : structure à une dimension.

2D : structure à deux dimension.

3D : structure à trois dimensions.

CFC : face cubique centrée.

ϵ : Permittivité.

a_1 : l'épaisseur de la couche qui constitue le miroir de Bragg.

a : la distance entre le centres des trous.

v_i : Volume occupé par le matériau de permittivité.

v_c : Volume de la cellule.

σ_{ik} : Symbole de Kronecker.

H_1 : La cavité hexagonale.

$w_1^k A$: Guide d'onde mono rangée.

$w_3^k A$: Guide d'onde à trois rangée

f : facteur de remplissage.

r : rayon.

d : le diamètre.

K : le rayon normalisé (r/a).

λ : longueur d'onde.

s₁ : La cavité de résonance.

α : angle.

Q : facteur de qualité.

Liste des Figures

Chapitre I

| | |
|---|----|
| Figure I.1. (a) Aile de papillon, (b) Coupe d'une aile de papillon observée au MEB..... | 6 |
| Figure I.2. Agrandissement d'une plume de paon montrant la structure des barbules..... | 6 |
| Figure I.3. (a) Bracelet monté d'une opale naturelle quasi-périodiques bille de silice (b) Image au microscope électronique d'une opale naturelle. | 7 |
| Figure I.4. Des cristaux photoniques : (1D) unidimensionnel, (2D)bidimensionnel, (3D) tridimensionnel | 7 |
| Figure I.5. (a) Structure AlGaAs-air- de 11 périodes fabriquées au LPN vue au ME.(b)Schématisation de la structure unidimensionnelle..... | 8 |
| Figure I.6. (a) structure déconnectée, (b) structure connectée..... | 9 |
| Figure I.7. Décomposition du champ électromagnétique suivant ses deux polarisations TE et TM..... | 9 |
| Figure I.8. La première structure BIP 3D: la Yablonovite..... | 10 |
| Figure I.9. Exemples des structures artificiels 3D : Structure cubique(1), tas de bois(2), structure spirale(3), diamant(4)..... | 11 |
| Figure I.10 Les périodes d'un cristal photonique unidimensionnel..... | 12 |
| Figure I.11 Exemple de réseaux bidimensionnel : (a) carré ;(b)triangulaire ;(c)graphite ;La direction est infinie..... | 13 |
| Figure I.12 Construction de la première zone de Brillouin définie dans le réseau réciproque..... | 14 |
| Figure I.13 Réseaux directs et réciproques avec sa zone de Brillouin..... | 15 |
| Figure I.14 (a)retrait d'un pilier, (b) modifiant de rayon d'un pilier..... | 19 |
| Figure I.15 Exemple de cavité H1 (H car la cavité est hexagonale, et 1 parce qu'il a un seul trou manquant)..... | 20 |
| Figure I.16 spectre de transmission d'un cristal hexagonal de tiges diélectriques avec ou sans défaut lacunaire..... | 20 |
| Figure I.17 Exemple de guide W1 à cristal photonique triangulaire de trous d'air sur un Substrat de silicium sur isolant..... | 21 |
| Figure I.18 Structure triangulaire d'un guide mono rangée $W_1^K A$ | 22 |
| Figure I.19 La réponse spectrale en transmission et réflexion..... | 22 |
| Figure I.20 Représentation d'un filtre add / drop..... | 23 |

| | |
|---|----|
| Figure I.21 Principe de démultiplexeur spectrographe | 24 |
| Figure I.22 illustration de l'utilisation de la mini-stopband..... | 25 |
| Figure I.23 Fibre optique classique..... | 25 |
| Figure I.24 Exemple de section transverse de fibre creuse air-silice. Les trous d'air sont représentés en noir, la silice est en gris..... | 26 |
| Figure I.25 structure d'un diviseur : (a) 1x2 avec une jonction Y, (b) 1x4 avec une jonction Y, (c) 1x2 avec une jonction T, (d) 1x3 avec une jonction T..... | 27 |
| Figure I.26 résultats de simulation : (a) diviseur en Y (1x2), (b) diviseur en Y (1x4), (c) diviseur en T (1x2), (d) diviseur en T..... | 28 |

Chapitre II

| | |
|--|----|
| Figure II.1. Structure de cavité S1 | 32 |
| Figure II.2. Variation de la longueur d'onde de résonance et facteur de qualité en fonction de la variation du rayon de la tige centrale | 34 |
| Figure II.3. Spectre de transmission des Canaux en fonction de la variation du rayon de la tige centrale | 35 |
| Figure II.4. Un guide d'onde W1 | 36 |
| Figure II.5. Structure d'un guide virage réalisé dans un cristal photonique bidimensionnel triangulaire de trous d'air | 37 |
| Figure II.6. Spectre de transmission normalisé du Guide virage à 60°..... | 37 |
| Figure II.7. Structure d'un démultiplexeur a deux canaux pour un défaut substitutionnel de $\lambda_1=1.5097$ et $\lambda_3 =1.5163$ | 38 |
| Figure II.8. Structure d'un démultiplexeur à quatre canal pour un défaut substitutionnel pour $\lambda_1=1.5097 \mu\text{m}$, $\lambda_3=1.516 \mu\text{m}$, $\lambda_5=1.5232 \mu\text{m}$ et $\lambda_7 =1.5304 \mu\text{m}$ | 39 |
| Figure II.9. Structure d'un démultiplexeur à huit canaux pour un défaut substitutionnel pour : $\lambda_1 =1.5097 \mu\text{m}$, $\lambda_2 =1.5124 \mu\text{m}$, $\lambda_3 =1.5163 \mu\text{m}$, $\lambda_4 =1.5193 \mu\text{m}$, $\lambda_5 =1.5232 \mu\text{m}$, $\lambda_6 =1.5267 \mu\text{m}$, $\lambda_7= 1.5304 \mu\text{m}$ et $\lambda_8=1.5338 \mu\text{m}$ | 40 |
| Figure II.10. La propagation de la lumière dans un démultiplexeur à deux canaux pour : $\lambda_1=1.5097$ et $\lambda_3 =1.5163$ | 40 |

| | |
|---|----|
| Figure II.11. La propagation de la lumière dans un démultiplexeur à quatre canaux pour : $\lambda_1 = 1.5097$, $\lambda_3 = 1.5163$, $\lambda_5 = 1.5232$, $\lambda_7 = 1.5304$ | 41 |
| Figure II.12. : La propagation de la lumière dans un démultiplexeur à huit canaux pour : $\lambda_1 = 1.5097$, $\lambda_2 = 1.5124$, $\lambda_3 = 1.5163$, $\lambda_4 = 1.5193$, $\lambda_5 = 1.5232$, $\lambda_6 = 1.5267$, $\lambda_7 = 1.5304$ et $\lambda_8 = 1.5338$ | 42 |

Chapitre III

| | |
|---|----|
| Figure III.1. Présentation du software COMSOL Version 5.4a utilisé pour la simulation..... | 46 |
| Figure III.2. Représentation schématique d'un CP-2D déconnecté sans défaut à motif carré . | 47 |
| Figure III.3. Réponse spectrale de transmission dans d'un CP-2D déconnecté sans défaut à motif carré..... | 48 |
| Figure III.4. Illustration de la propagation du champ électrique E_z dans un cristal photonique 2D carré sans défaut | 48 |
| Figure II.5. Représentation schématique d'un CP-2D déconnecté sans défaut à motif triangulaire ($a=0.6$, $k=0.2$)..... | 49 |
| Figure III.6. Réponse spectrale de transmission d'un CP-2D déconnecté sans défaut structure à motif triangulaire | 49 |
| Figure III.7. Répartition de champ électrique E_z dans un CP-2D sans défaut à motif triangulaire..... | 50 |
| Figure III.8. Réponse spectrale en terme de transmission d'un guide d'onde à base d'un CP-2D déconnecté | 51 |
| Figure III.9. Répartition de champ électrique d'un guide d'onde mono rangée carré à base d'un CP-2D déconnecté à maille carré | 51 |
| Figure III.10. Répartition de champ électrique E_z d'un guide d'onde à base d'un CP-2D déconnecté à maille carrée à $1.31\mu\text{m}$ | 52 |

| | |
|---|----|
| Figure III.11. Répartition de champ électrique Ez d'un guide d'onde mono rangée à base d'un CP-2D déconnecté à maille carrée à 1.55µm | 53 |
| Figure III.12. : Représentation schématique d'un guide d'onde W_3^kA à base d'un CP-2D déconnecté à maille triangulaire | 53 |
| Figure III.13. Réponse spectrale en terme de transmission un guide à base d'un CP-2D déconnecte à maille triangulaire..... | 54 |
| Figure III.14. Répartition de champ électrique d'un guide d'onde W_3^kA à base d'un CP-2D déconnecté à maille triangulaire..... | 55 |
| Figure III.15. : Représentation schématique d'un filtre en anneau à motif carré (a=0.48µm ,k=0.19) | 55 |
| Figure III.16. Spectre de transmission du filtre en anneau proposé | 56 |
| Figure III.17. Répartition de champ électrique Ez du filtre en anneau excité en mode TE..... | 56 |
| Figure III.18. Représentation schématique d'un démultiplexeur proposé..... | 57 |
| Figure III.19. : Spectre de transmission du démultiplexeur proposé..... | 58 |
| FigureIII.20.Répartition de champ électrique Ez d'un démux à deux anneaux hexagonales : (a) $\lambda_1 = 1.45 \mu\text{m}$, (b) $\lambda_2 = 1.50 \mu\text{m}$ | 58 |
| Figure III.21. Structure du ring proposé pour le démultiplexeur à 2 anneaux..... | 59 |
| Figure III.22. Spectre de transmission du filtre en anneau avec $\lambda = 1.55\mu\text{m}$ | 60 |
| Figure III.23. Répartition de champ électrique Ez dans un filtre en anneau proposé..... | 61 |
| Figure III.24. Structure schématique du démultiplexeur à base de CP-2D..... | 61 |
| Figure III.25. Spectre de transmission du démultiplexeur proposé | 62 |
| Figure III.26: Répartition de champ électrique Ez dans un démultiplexeur : (a) $\lambda_1 = 1.545 \mu\text{m}$, (b) $\lambda_2 = 1.55 \mu\text{m}$ | 63 |
| Figure III.27. Structure schématique du démultiplexeur à base de CPS | 64 |
| Figure III.28. Spectre de transmission du démultiplexeur proposé : | 65 |
| Figure III.29. Représentation de la répartition du champ électrique dans le démultiplexeur à la longueur d'onde $\lambda = 1.45 \mu\text{m}$ | 67 |

Liste des Tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau II.1.de Variation de la longueur d'onde de résonance et le facteur de qualité en fonction du rayon r de la tige centrale. | 31 |
|--|----|

Introduction Générale

Ces dernières années, le domaine optique a attiré de nombreux chercheurs en science de la technologie, car la possibilité de contrôler la propagation de la lumière est donc d'offrir la possibilité d'empêcher ou de permettre, dans certaines plages de fréquences et dans une ou plusieurs directions ; et à partir de ce point est apparu une nouvelle génération de matériaux : les cristaux photoniques.

Les cristaux photoniques (CPs) sont des matériaux nanostructures où on a créé une alternance périodique des indices de réfraction. Dans les CPs, on distingue trois types de structuration : unidimensionnels (1D), bidimensionnels (2D) ou tridimensionnels (3D) et la réalisation des réseaux tridimensionnels est plus récente.

Le cristal photonique présente plusieurs phénomènes intéressants dans le domaine de l'optoélectronique. Par exemple, l'émission spontanée peut être contrôlée puisqu'un atome excité dans un cristal photonique ne pourra passer à un état énergétique inférieur si la fréquence du photon émis se trouve dans la bande interdite. Ils sont des structures dont l'indice diélectrique est modulé de façon périodique. Ces matériaux sont apparus relativement récemment dans la littérature scientifique et ils ont ainsi été baptisés par analogie avec les structures électroniques et leur bande électronique interdite. Dans un cristal atomique, l'énergie des électrons ne peut pas prendre des valeurs comprises dans la bande interdite électronique (ou gap). Dans un cristal photonique, ce sont les photons dont l'énergie (ou de manière équivalente la fréquence) ne peut être dans la bande interdite photonique [1].

L'objet de ce travail est de proposer des nouvelles structures des DEMUX en cristaux photoniques 2D pour les systèmes DWDM en utilisant le logiciel COMSOL. Le multiplexage en longueur d'onde, souvent appelé WDM (Wavelength Division Multiplexing en anglais) et pour un espacement plus faible (donc plus de longueurs d'onde simultanément en propagation), on parle de Dense WDM (DWDM, plus de 32 longueurs d'onde). Il est ainsi possible de combiner 160 longueurs d'onde optiques et plus.

Ce mémoire se compose par quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous allons définir les concepts de base sur les cristaux photoniques. Puis, nous allons énumérer les types de cristaux photoniques artificiels qui ont été inspirés par la nature et les principes de défauts qui existent aux niveaux des CPs-2D. Ces

derniers offrent la possibilité de contrôler la propagation de la lumière en se basant sur la propriété de la bande interdite photonique.

Le deuxième chapitre comporte quelques exemples d'applications des CPs-2D tels que le démultiplexage en longueur d'onde et les guides d'ondes.

Dans le dernier chapitre de ce mémoire, nous allons présenter en premier lieu brièvement notre outil de simulation le logiciel COMSOL, ensuite nous allons exposer les différents résultats de simulation des différentes topologies en cristaux photoniques bidimensionnels à maille élémentaire carrée et triangulaire.

Enfin, nous terminerons notre travail par une conclusion générale et des références bibliographiques.

**Chapitre I : Définition et
concepts sur les cristaux
photoniques**

I. 1. Généralités sur les cristaux photoniques :

Ces dernières années, l'augmentation du volume de données échangées dans les télécommunications a conduit au développement de réseaux de télécommunications à très haut débit, ces réseaux permettent d'acheminer la lumière et l'information sur des longues distances, mais au niveau de la communication inter- et intra- puces ça veut dire au niveau local l'information est transférée via des interconnexions métalliques, pour cette raison la demande augmente constamment d'une plus grande bande passante.

Dans un tel contexte, la solution pourrait résider dans le développement des interconnexions comme alternative aux interconnexions métalliques. Composants optiques doit être capable d'atteindre les mêmes fonctionnalités que les composants électroniques, en étant aussi compacts que possible.

Au milieu des années 1990, les progrès de la nanotechnologie ont permis de développer des matériaux artificiels dont le comportement vis-à-vis des ondes électromagnétiques est assez surprenant et c'est pourquoi on les appelle parfois cristaux photoniques. Depuis lors, ces matériaux ont été d'un grand intérêt pour la communauté scientifique, en particulier dans le domaine de l'optique.

Le concept de "cristaux photoniques" a été proposé pour la première fois en 1987. Le premier cristal photonique a été fabriqué en 1991. Le terme "cristal" se réfère à une substance qui contient des motifs répétitifs sur une base régulière. Cette disposition (alvéoles, couches superposées, etc.) peut être comparée à la structure diamant cristallin.

Les cristaux photoniques sont des structures périodiques de matériaux diélectriques ou métalliques conçues pour modifier la propagation des ondes électromagnétiques de la même manière qu'un potentiel périodique dans un cristal semi-conducteur affecte le déplacement des électrons en créant des bandes d'énergie autorisées et interdites. L'absence de modes préparatifs des ondes électromagnétiques (EM) dans de telles structures, dans une plage de fréquences ou de longueurs d'onde, est alors qualifiée de bande interdite (band gap en anglais) [2].

La forme la plus simple de cristal photonique est une structure périodique à une dimension composée d'un empilement multicouche également appelé "miroir de Bragg". C'est Lord Rayleigh en 1887 qui a le premier montré que l'on pouvait ainsi produire un gap ou bande interdite. Au sein de laquelle toute propagation électromagnétique est impossible, comme les phénomènes d'interférences lumineuses dans les miroirs de Bragg sont tout à fait analogues à la diffraction des rayons X par les plans d'atomes dans un cristal. Ces structures portent le nom du physicien qui expliqua les phénomènes de diffraction cristalline: W. L. Bragg [3].

La possibilité d'étendre les bandes interdites aux structures bidimensionnelles et tridimensionnelles a été initiée par Eli Yablonovitch [4] et Sajeev John [5] en 1987.

Ces structures sont actuellement la source de nombreuses expériences en optique telles que l'inhibition de l'émission spontanée, les miroirs omnidirectionnels à haute réflectivité ainsi que des guides d'ondes à faibles pertes [6].

Les cristaux photoniques permettent déjà le contrôle et la manipulation de la lumière pour les applications télécoms. Les cristaux bidimensionnels ont atteint le niveau de maturité nécessaire au développement d'applications. La fabrication de cristaux photoniques tridimensionnels en est encore au stade de la recherche, alors que les cristaux photoniques 3D existent déjà dans les micro-ondes, ces cristaux photoniques sont parfois appelés matériaux à bandes électromagnétiques interdites. Ils sont souvent fabriqués à l'aide d'un couplage métallique ou métallo-diélectriques périodiques et permettent la fabrication de filtres, antennes et divers composants utilisés dans les télécommunications.

I. 2. Cristaux photonique naturels :

Il existe des structures naturelles qui peuvent avoir les mêmes propriétés que les cristaux photoniques artificiels. En effet, les couleurs vives de certaines espèces sont parfois dues à la présence de structures très complexes, périodiques.

I. 2. 1. Les papillons :

Les papillons sont parmi les insectes les plus colorés que nous offre la nature. Ils sont en fait très largement tributaires de la lumière et ont développé un arsenal impressionnant pour gérer cette interaction avec les ondes électromagnétiques au mieux de leur intérêt. Si on effectue une analyse microscopique des ailes, on trouve que les ailes du papillon *Cyanophrysremus* possèdent une nano-architecture complexe, et les couleurs bleu métallique sur le côté dorsal et verte pois sur le côté ventral sont attribuées à la structure type des cristaux photoniques. Elles sont composées de chitine et d'air.

La figure I.1. apparaît un papillon et la coupe d'une aile, dont un détail apparaît en insert en bas à droite. Sur cette coupe observée au microscope électronique considérée comme une structure qui a un comportement de matériau à bande photonique interdite. C'est à balayage elle qui donne à certains papillons des couleurs iridescentes. En effet ce réseau réfléchit la lumière pour certaines longueurs d'onde dans des directions différentes en fonction de la longueur d'onde.

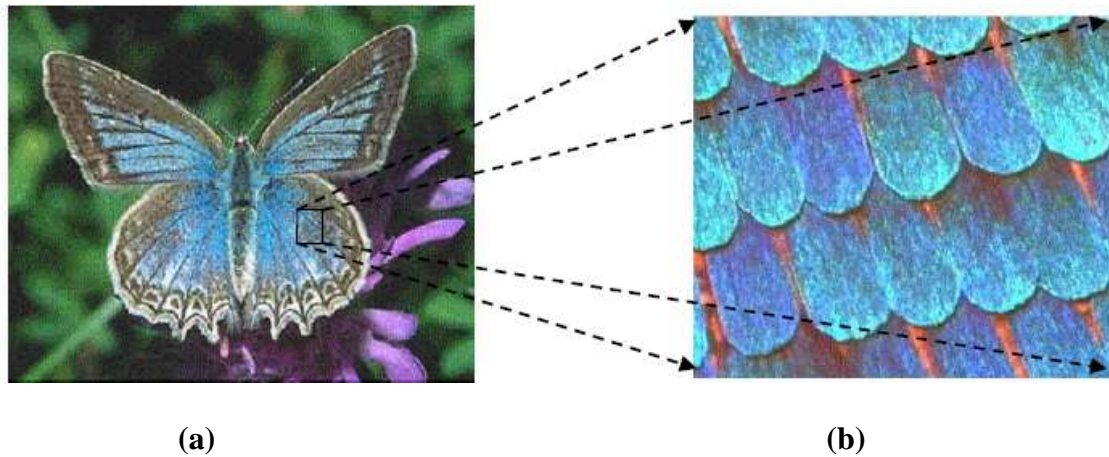


Figure I. 1: (a) Aile de papillon, (b) Coupe d'une aile de papillon observée au MEB [3].

I. 2. 2. Les oiseaux :

L'une des caractéristiques les plus admirables des oiseaux est leur couleur. Ils leur permettent d'affirmer leur identité. Produire une telle couleur, ils utilisent la technologie structurelle des plumes et de leurs pigments dans leurs parties du corps. Les pigments et la structure périodique des plumes contribuent à l'absorption et à la diffraction de la lumière, et la structure périodique des plumes, à l'absorption et à la diffraction de la lumière (figure I. 2).

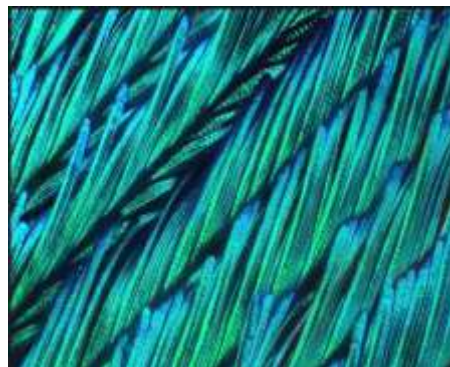


Figure I. 2: Agrandissement d'une plume de paon montrant la structure des barbules.

I. 2. 3. Opale :

Des opales sont obtenues chimiquement par auto-organisation. La première opale a été obtenue par sédimentation de sphères de silice en solution: par sédimentation. Ces sphères s'arrangent selon un réseau cubique à faces centrées (figure I. 3).

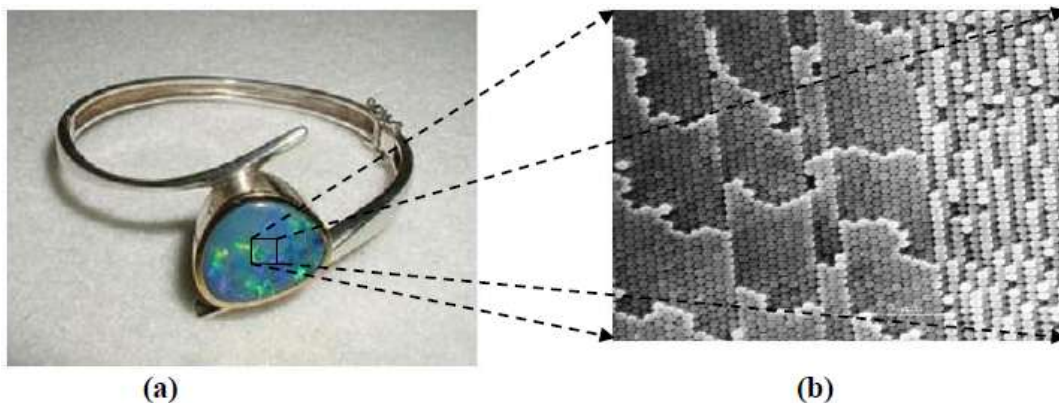


Figure I. 3: (a) Bracelet monté d'une opale naturelle quasi-périodiques bille de silice (b) Image au microscope électronique d'une opale naturelle [3].

I. 3. Cristaux photoniques Artificiels :

Les cristaux photoniques sont des matériaux dont la constante diélectrique est modulée périodiquement. La périodicité peut-être unidimensionnelle (miroir de Bragg), bidimensionnelle ou encore tridimensionnelle (Figure I. 4). Une bande interdite photonique s'ouvre dans l'espace dans une ou plusieurs directions selon le cas.

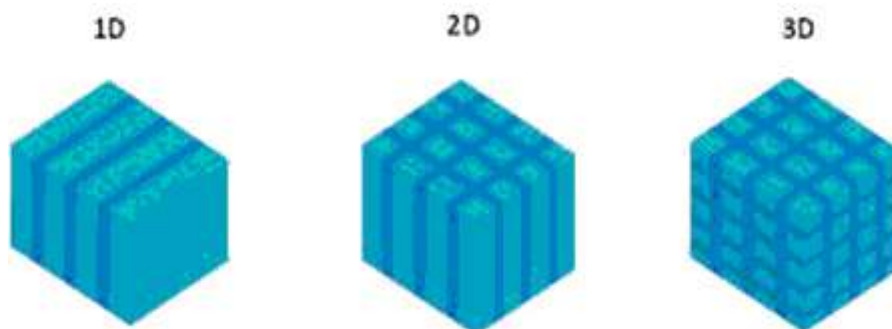


Figure I. 4 : Des cristaux photoniques : (1D) unidimensionnel, (2D) bidimensionnel, (3D) tridimensionnel.

I. 3. 1. Différents types de Cristaux photoniques :

I. 3. 1. 1. Cristaux photoniques unidimensionnels (miroirs de Bragg) :

Un milieu composé de l'alternance périodique dans une seule direction de l'espace (Exemple direction z sur la Figure I. 5) de deux matériaux d'indice optique n_1 et n_2 ($n_1 > n_2$) est un cristal photonique unidimensionnel (1D). Il s'agit en fait d'un empilement de Bragg infini.

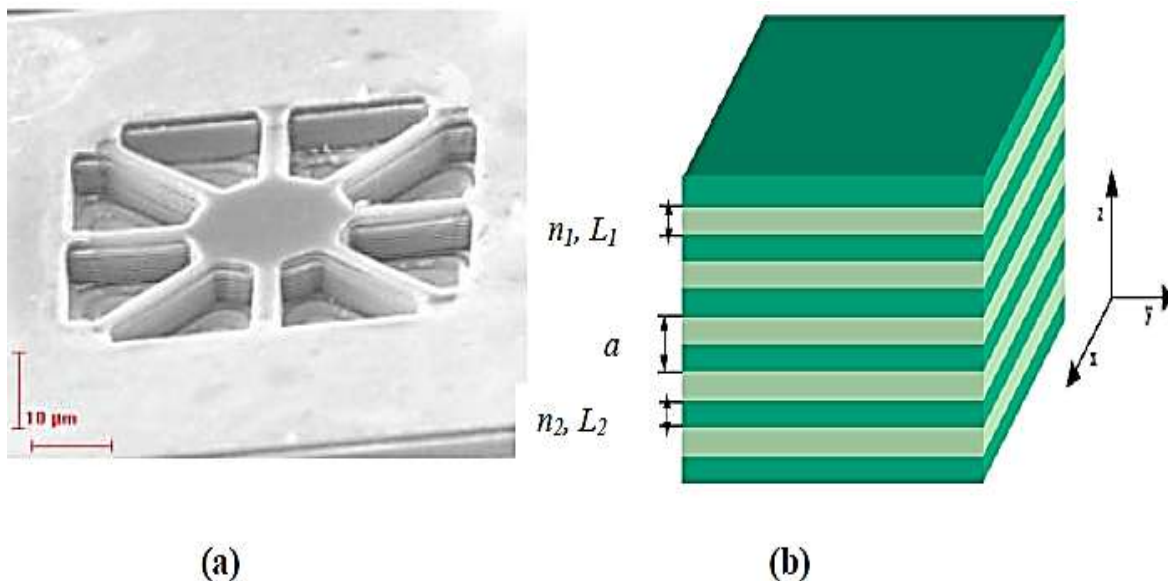


Figure I. 5: (a) Structure AlGaAs-air- de 11 périodes fabriquées au LPN vue au MEB. (b) Schématisation de la structure unidimensionnelle [7].

Le miroir de Bragg est une alternance de couches diélectriques d'indice de réfraction différent utilisé depuis fort longtemps comme miroir optique dans les cavités lasers (VCSEL). C'est ce qui a permis à Eli Yablonovitch de généraliser ce concept de miroir unidimensionnel aux dimensions supérieures.

Les cristaux photoniques à 1D peuvent être utilisés comme filtres. Le miroir de Bragg ne réfléchit que les rayons arrivant dans un certain cône, la bande interdite n'est pas complète; elle n'existe pas quel que soit le vecteur d'onde de l'onde incidente. Afin de créer une bande interdite plus complète, il faut structurer la permittivité du matériau selon plusieurs dimensions de l'espace.

Leurs fabrications peuvent être réalisées par différentes techniques, parmi elles on cite la croissance de couches minces qui se base sur l'épitaxie ou la déposition par phase chimique gazeuse (MOCVD) et la technique de structuration des matériaux massifs comme la lithographie [7].

I. 3. 1. 2. Cristal photonique bidimensionnels:

Ce sont des matériaux avec un constant diélectrique périodique dans deux directions de l'espace. Il existe deux types de structure (structure connectée et structure déconnectée) :

* Structure connectée : un modèle de CP 2D constitué d'un réseau carré de trous d'air cylindriques d'une épaisseur infinie percée dans une matrice diélectrique, dans ce cas les motifs élémentaires sont d'indice n_1 inférieur à l'indice n_2 de la matrice diélectrique.

* Structure déconnectée : constituée d'un réseau périodique de piliers diélectriques dans l'air, dans ce cas les motifs élémentaires sont d'indice n_1 inférieur à l'indice n_2 de la matrice diélectrique.

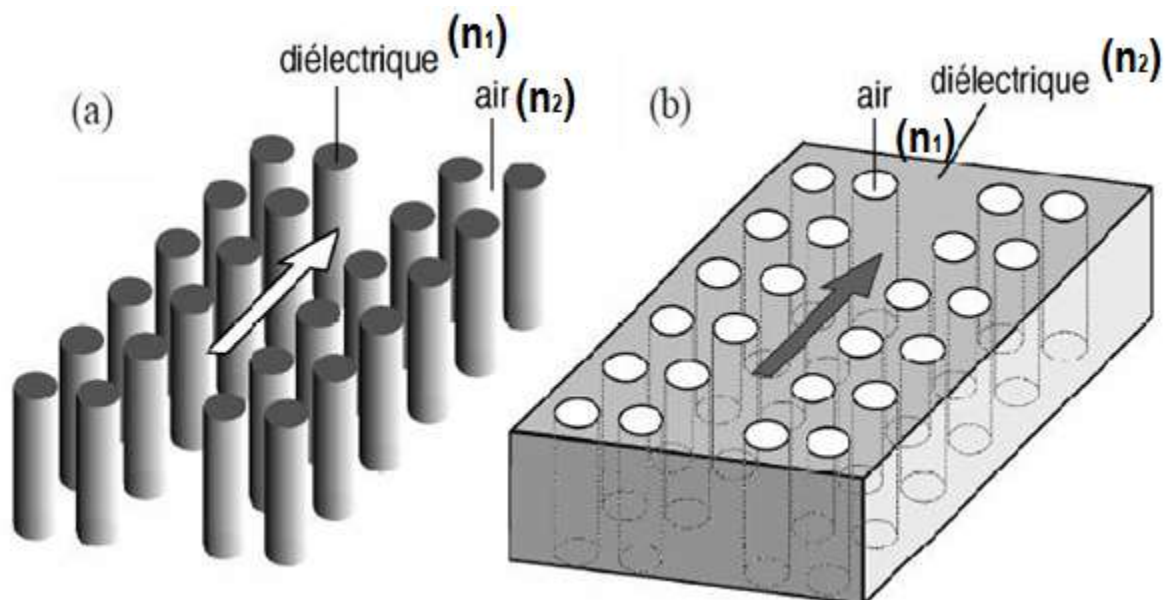


Figure I. 6 : (a) structure déconnectée, (b) structure connectée [8].

Dans le cas des réseaux bidimensionnels, il faut considérer deux directions de propagation au lieu d'une seule pour les unidimensionnels. Il existe deux types de polarisations possibles pour les ondes électromagnétiques. La polarisation Transverse Electric (TE) lorsque le champ magnétique est parallèle à l'axe des trous (des tiges), ou Transverse Magnétique (TM) lorsque le champ électrique est parallèle à l'axe des trous (des tiges) (Figure 1.7). Il existe donc une bande interdite TE et une bande interdite TM. Lorsque les bandes interdites photoniques pour les polarisations TE et TM se recouvrent, on parle alors de bande interdite complète. Un cristal photonique peut également présenter une bande interdite pour l'une des polarisations mais pas pour l'autre [8].

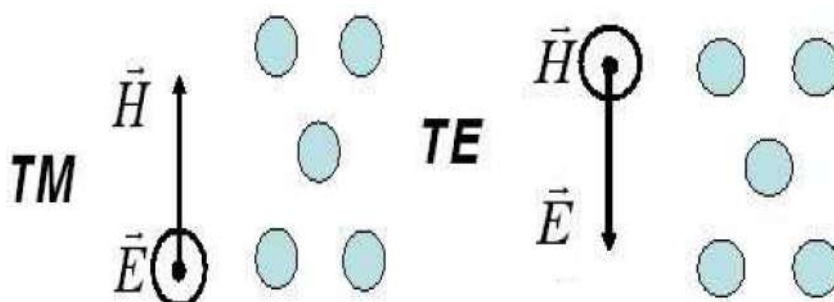


Figure I. 7 : Décomposition du champ électromagnétique suivant ses deux polarisations TE et TM [8].

I. 3. 1. 3. Cristal photonique à tridimensionnels:

Les cristaux photoniques tridimensionnels (CPs-3D) suscitent encore beaucoup d'intérêts. Ce sont des structures tridimensionnelles périodiques suivant les trois directions de l'espace.

Il existe un grand nombre de structures possibles. Le premier cristal photonique tridimensionnel a été fabriqué par S. Y. Lin et al. Il était formé de sphères de silicium arrangées selon une structure diamant. En 1993, E. Yablonovitch fabriquait un cristal photonique 3D en perçant chaque trou dans un bloc de plexiglas selon trois angles azimutaux séparés de 120° (figure I.12). Ce cristal photonique s'appelle d'après son inventeur "Yablonovite", avec ce cristal photonique, le concept de la bande interdite photonique a été démontré expérimentalement pour la première fois. De nombreuses méthodes de fabrication des cristaux photoniques tridimensionnels ont été proposées (figure I.8) [9].

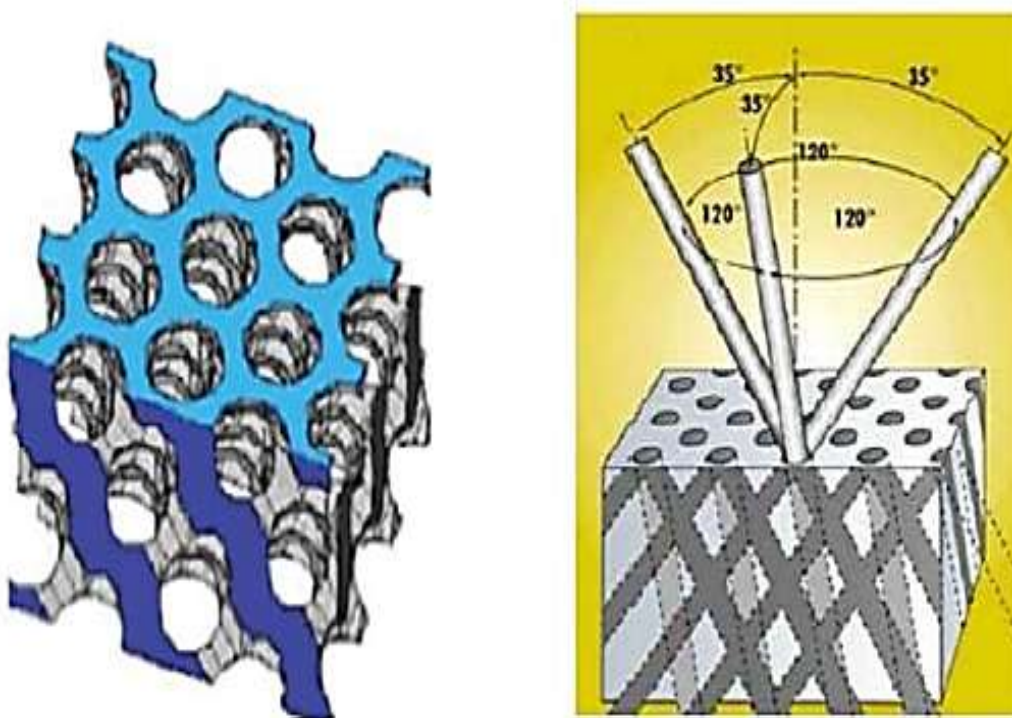


Figure I. 8:La première structure BIP 3D: la Yablonovite [10].

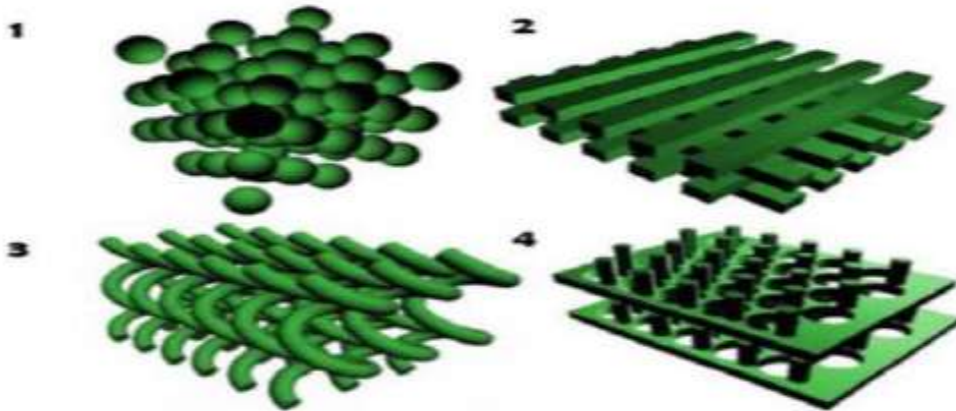


Figure I. 9: Exemples des structures artificielles 3D : Structure cubique(1), tas de bois(2), structure spirale(3), diamant(4) [11].

I. 4. Caractéristiques géométriques et physiques d'un cristal photonique :

Un cristal photonique est caractérisé par les différents matériaux qui le composent, le système cristallin selon lequel ces matériaux sont organisés et les volumes relatifs qu'ils occupent dans la cellule élémentaire du cristal. Les quantités représentatives de ces différentes caractéristiques sont [8] :

I. 4. 1. Le contraste d'indice Δn :

Dans le cas d'un CP-1D, la constante d'indice est définie comme étant le rapport entre les indices des deux matériaux qui peut être comparé à la hauteur de la barrière de potentiel de la physique du solide.

$$\Delta n = \frac{n_1}{n_2} \quad (\text{I. 1})$$

Avec : n_1 : l'indice de réfraction du matériau de haut indice.

n_2 : L'indice de réfraction du matériau de bas indice.

Dans le cas d'un CP-2D, la constante Δn est la soustraction entre les deux matériaux qui les composent :

$$\Delta n = n_2 - n_1 \quad (\text{I. 2})$$

I. 4. 2. Les périodes :

Ces paramètres géométriques, choisis en fonction du domaine de fréquence étudié, influencent les caractéristiques de la bande interdite photonique, pour un cristal photonique unidimensionnel, la période « a » est donnée par :

$$a = (a_1 + a_2) \quad (\text{I. 3})$$

Avec : a_1 : l'épaisseur de la couche de permittivité ε_1 .

a_2 : L'épaisseur de la couche de permittivité ε_2 .

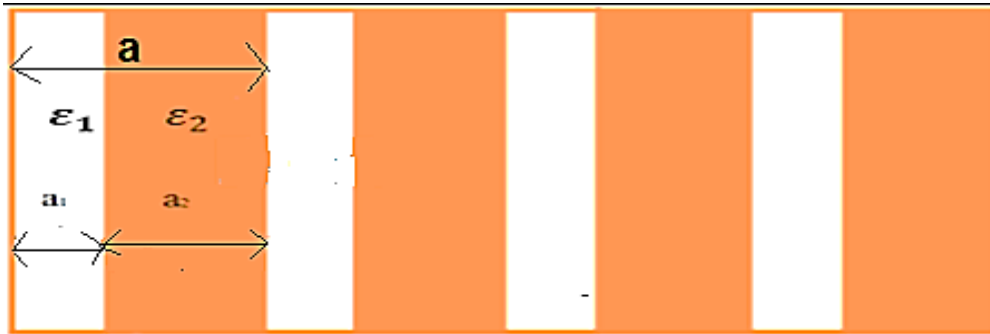


Figure I. 10: Les périodes d'un cristal photonique unidimensionnel.

I. 4. 3. Le facteur de remplissage f :

C'est un rapport entre le volume occupé par ce matériau dans la cellule élémentaire du cristal et le volume de cellule de cette dernière. Elle est donnée par :

$$f = \frac{v_i}{v_c} \quad (\text{I. 4})$$

Avec :

v_i : Volume occupé par le matériau de permittivité ε_i .

v_c : Volume de la cellule.

Le facteur de remplissage f peut être comparé au largeur du potentiel périodique de la physique du solide. S'il est pris pour le matériau de haut indice par exemple, il est défini comme le rapport entre le volume occupé par ce matériau dans la cellule élémentaire du cristal et le volume de cellule de cette dernière. L'influence de ces différents paramètres sur le comportement d'une structure photonique peut être comprise par analogie avec un potentiel périodique induit par l'arrangement des atomes dans un semi-conducteur [11].

I. 5. Réseau direct, réseau réciproque et zone de Brillouin :

I. 5. 1. Réseau direct :

Les cristaux photoniques 2D diffèrent suivant leur type de réseau, défini par un motif, une maille élémentaire et deux vecteurs de base. Les réseaux les plus communément répandus présentent une maille carrée, triangulaire, ou de type graphite. Des représentations de ces réseaux sont données en figure I.11 [12].

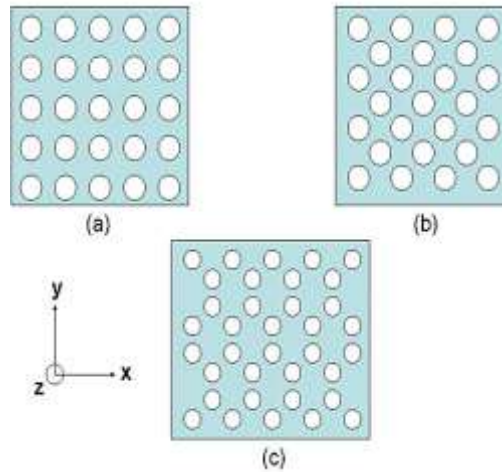


Figure I. 11 : Exemples de réseaux bidimensionnels : (a) réseau carré ; (b) réseau triangulaire ; (c) réseau graphite ; La direction z est considérée infinie [12].

I. 5. 2. Réseau réciproque :

A tout réseau direct, on peut faire correspondre un réseau réciproque ayant un système de base constitué par deux vecteurs \mathbf{b}_1 et \mathbf{b}_2 définis par le produit scalaire suivant :

$$(\mathbf{b}_i \cdot \mathbf{d}_k) = \sigma_{ik} \quad [i=k=1,2] \quad (\text{I. 5})$$

Avec : σ_{ik} représente le symbole de Kronecker .

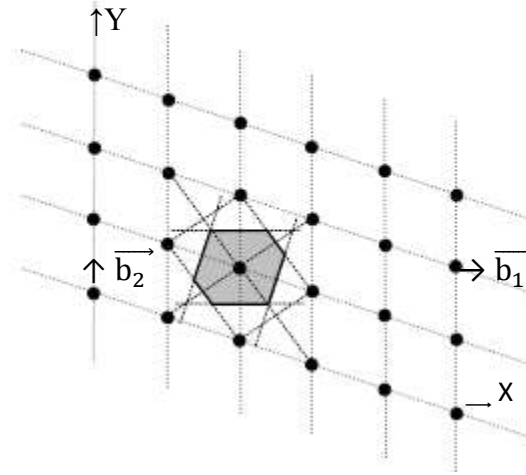
$$\sigma_{ik} = 0 \text{ si } i \neq k$$

$$\sigma_{ik} = 1 \text{ si } i = k$$

I. 5. 2. 1. Zone de Brillouin :

Nous allons maintenant définir une notion de zones de Brillouin dans le réseau réciproque. Nous allons montrer que, grâce au réseau réciproque, la fréquence est une fonction périodique du nombre d'ondes. Considérons une onde plane se propageant dans un milieu à deux dimensions défini dans un repère orthonormé (Oxy). Ce résultat montre que la fréquence des ondes dans un réseau à deux dimensions est une fonction périodique du vecteur \vec{a} , dans le

réseau réciproque rapporté aux vecteurs \vec{b}_1 et \vec{b}_2 Pour construire cette zone, nous plaçons au centre de la cellule l'origine O du réseau réciproque [12].

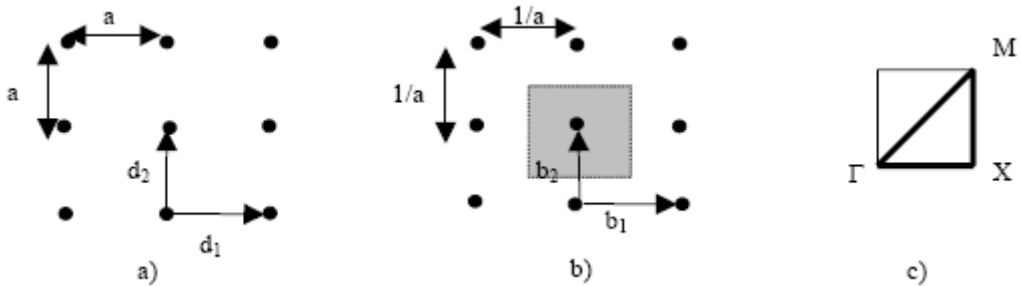


La figure I. 12 : Construction de la première zone de Brillouin définie dans le réseau réciproque.

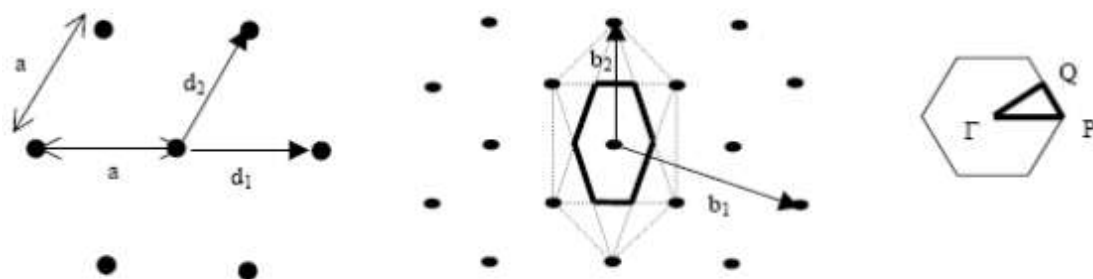
Maintenant on va mettre chaque réseau direct avec son réseau réciproque :

La figure I. 13 donne la forme de la zone de Brillouin irréductible pour chaque type de réseau

-Le réseau carré :



-Le réseau triangulaire :



-Le réseau hexagonal :

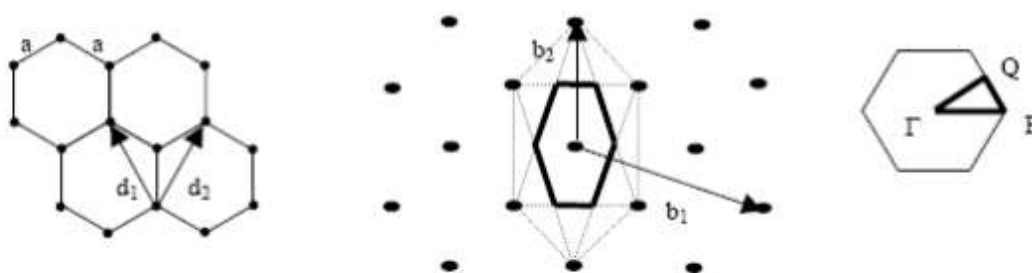


Figure I. 13 : Réseaux directs et réciproques avec sa zone de Brillouin.

I. 6. La méthode des ondes planes :

La méthode des ondes planes est la méthode privilégiée pour le calcul des diagrammes de dispersion dans les CP [Joannopoulos 1995]. Comme son nom l'indique, elle repose sur la décomposition en ondes planes du champ électrique ou magnétique. C'est une méthode de résolution dans le domaine fréquentiel des équations de Maxwell; Elle est basée sur la décomposition en ondes planes du problème électromagnétique. Cette méthode est essentiellement utilisée pour analyser les propriétés dispersives des matériaux à bandes interdites photoniques et permet de déterminer la fréquence, la polarisation, la symétrie et la distribution du champ pour les modes d'une structure photonique. La technique PWE consiste à résoudre, dans l'espace fréquentiel, l'équation d'onde linéaire en développant le champ électromagnétique sur une base d'ondes planes. La méthode de décomposition en ondes planes est très efficace pour calculer les diagrammes de bandes des cristaux photoniques parfaitement périodiques [13].

I. 6. 1. Equations de Maxwell dans les cristaux photoniques 2D :

I. 6.1. 1. Equations de Maxwell dans l'espace réel :

Nous étudions la propagation des ondes de Bloch électromagnétiques dans le plan (Oxy) du cristal photonique 2D. Ces ondes sont caractérisées par leur vecteur d'onde $k = (k_x, k_y, 0)$. Le champ magnétique des ondes de Bloch de polarisation TE est parallèle à l'axe (Oz) tandis que leur champ électrique et leur induction électrique sont perpendiculaires à l'axe (Oz) [14].

$$H_k = (0, 0, H_{zk}), E_k = (E_{xk}, E_{yk}, 0) \text{ et } D_k = (D_{xk}, D_{yk}, 0) \quad (\text{I. 6})$$

Le champ magnétique des ondes de Bloch de polarisation TM est perpendiculaire à l'axe (Oz) tandis que leur champ électrique et leur induction électrique sont parallèles à l'axe (Oz):

$$H_k = (H_{zk}, H_{zk}, 0), E_k = (0, 0, E_{yk}) \text{ et } D_k = (0, 0, D_{yk}) \quad (\text{I. 7})$$

Dans l'espace réel, les composantes des champs sont reliées par les équations de Maxwell:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{H}_k = 0 \quad (\text{I. 8})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D}_k = 0 \quad (\text{I. 9})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{H}_k = -i\omega D_k \quad (\text{I. 10})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E}_k = i\omega H_k \quad (\text{I. 11})$$

Propagation d'une onde de Bloch dans un cristal photonique bidimensionnel et par la relation constitutive:

$$D_k = \varepsilon_0 \varepsilon E_k \quad (\text{I. 12})$$

Où la permittivité $\varepsilon = \varepsilon(r)$ est une fonction scalaire périodique sur le réseau bidimensionnel [14]

I. 7. Définition du gap :

Les cristaux photoniques ou les matériaux à Bande Interdite Photonique, plus simplement appelés BIP (en anglais, Photonic Band Gap, PBG) sont des structures dont la constante diélectrique est modulée de façon périodique. Ils présentent des bandes de fréquence pour lesquelles la propagation des ondes électromagnétiques est interdite [15].

La propriété de «gap » ou « bande interdite » a été initialement montrée par Lord Rayleigh en 1887 dans les structures de type miroir de Bragg. La généralisation du concept à deux et trois Dimensions a été initiée en 1987 par Zengerle, Yablonovitch et John dans le but de contrôler l'émission spontanée de la lumière [16].

I. 7. 1. Diagramme de bande :

Les diagrammes de bandes sont parmi les outils les plus utilisés pour illustrer les propriétés de propagation d'une onde acoustique ou élastique au sein des cristaux. Il s'agit en fait d'une représentation de la relation de dispersion entre la fréquence de l'onde ω et le vecteur de propagation k . Dans le cas des structures unidimensionnelles, l'ensemble des diffuseurs est réparti de façon périodique, les ondes sont très fortement diffusées d'un obstacle à l'autre. Elles interfèrent de manière constructive ou destructive suivant la fréquence de l'onde incidente. Par conséquent, une bande interdite apparaît quand les ondes diffusées interfèrent d'une façon destructive dans la direction de propagation de l'onde incidente.

Un cristal unidimensionnel n'a pas de bande interdite complète parce que ses propriétés élastiques sont périodiques dans une direction. Lorsque le vecteur d'onde se forme perpendiculairement à la direction de propagation, il ne sera pas traduit, alors il n'y aura pas de bande interdite dans cette direction. En effet, le mécanisme régissant la constitution de bande interdite dans un cristal 1D est basé sur les réflexions de Bragg en raison de la périodicité ou sur le phénomène de résonance locale des éléments mis en réseaux. Le cas des structures périodiques à une dimension ne présente qu'un intérêt réduit pour les applications. On réalise alors des structures périodiques à deux et trois dimensions [14].

I. 7. 2. Paramètres d'influence sur la bande interdite :

Pour ouvrir une bande interdite dans le plan ou l'espace, toutes les bandes interdites unidirectionnelles doivent se recouvrir au moins partiellement sur la première zone de Brillouin. Le recouvrement sera maximal si les bandes interdites sont centrées à des énergies proches. La situation la plus favorable est celle où la zone de Brillouin est la plus isotrope possible, Les réseaux qui s'en rapprochent le plus sont le réseau triangulaire à deux dimensions et le réseau cubique à faces centrées à trois dimensions.

Les paramètres ayant une influence significative sur la largeur et la position des bandes interdites sont : La topologie du réseau, le contraste d'indice et la fraction volumique des inclusions [14].

- a) La topologie du réseau : En effet, les propriétés des bandes ouvertes, notamment la position et la largeur des bandes interdites photoniques dépendent fortement de la symétrie et de la forme du diffuseur ainsi que de son orientation.
- b) La fraction volumique (facteur de remplissage) : Le nombre et la largeur des bandes d'arrêt dépend aussi du taux de remplissage,
- c) Le contraste d'indice.

I. 8. Les défauts :

Soit "0D", un élément modifié, soit "1D", une ligne. Dans un cristal photonique, la création d'un défaut est causée par la rupture de la périodicité diélectrique ϵ . Cette rupture va engendrer l'ouverture d'une bande de fréquence autorisée à l'intérieur de la bande interdite photonique. La largeur et la position de cette bande autorisée sont gérées par les caractéristiques du défaut [6].

Comme pour les semi-conducteurs des défauts peuvent être volontairement introduits dans les cristaux photoniques. Les défauts dans les semi-conducteurs ne permettront de réaliser de véritables fonctions optiques et de contrôler les flux de lumière que si l'on y introduit des défauts. Comme pour les cristaux solides, il existe deux principaux types de défauts : les défauts ponctuels et les défauts étendus. Les premiers, associés à une rupture locale de périodicité, se traduisent par la présence de modes électromagnétiques à des fréquences discrètes, analogues aux défauts électroniques. Les seconds, que l'on peut considérer comme analogues aux dislocations, peuvent donner lieu à des bandes permises de propagation, là où se trouve une bande interdite dans le cristal idéal [2].

Un CP sans défaut est celui qui possède tous ces motifs. Les applications des cristaux photoniques tournent autour de la bande interdite. Afin d'assurer une propagation permise on introduit un défaut dans la structure périodique de celui-ci, ces défauts sont obtenus en modifiant localement la périodicité du cristal. Un défaut dans un cristal photonique 2D peut être un trou pour effet d'introduire des niveaux d'énergie autorisés dans la bande interdite [17].

L'existence d'un défaut dans la périodicité du cristal va entraîner l'apparition de niveaux permis, appelés modes de défauts dans la bande interdite. La création d'un défaut consiste à briser localement la périodicité spatiale du réseau en ajoutant ou en enlevant localement un peu de matière diélectrique. Dans le cas d'un réseau de trous, le défaut consiste en l'omission d'un ou de plusieurs trous. On peut aussi créer des défauts en modifiant le rayon des trous. Selon le nombre de trous modifiés, on peut distinguer plusieurs types de défauts dont les principaux sont les suivants : [18]

I. 8. 1. Défauts ponctuels « cavités » :

Les défauts ponctuels sont créés en modifiant les caractéristiques d'une cellule du réseau (figure I.14). Ce type de défaut peut être réalisé soit par un :

- Changement de taille d'un motif du cristal.
- Déplacement d'un de ces motifs.
- L'absence l'un des motifs.
- L'insertion d'un motif différent.



Figure I. 14 : (a)retrait d'un pilier

(b) modifiant de rayon d'un pilier.

Si on injecte une microcavité un mode électromagnétique dont la fréquence appartient à la bande interdite photonique ; la lumière ne pourra se propager dans le cristal mais elle sera piégée et confinée autour du défaut.

De ceci découlent deux types d'applications des cavités à cristaux photoniques, d'une part les sources de lumière, d'autres parties filtres sélectifs en longueurs d'onde. Considérons un cristal photonique bidimensionnel ; il est en général constitué d'un réseau de trous percés dans un matériau diélectrique, ou de tiges de diélectrique dans l'air. Dans un cas comme dans l'autre, considérons un défaut localisé: un emplacement où le trou n'est pas percé, ou bien il n'y a pas de tige (figure I.14(a)). Plus généralement, on peut faire varier le rayon de la tige ou du trou en question pour faire varier continûment la perturbation qu'on introduit. Si on injecte dans ce défaut un mode électromagnétique dont l'énergie est dans la bande interdite du cristal photonique, il se retrouve complètement confiné, vu qu'il est entouré d'un matériau réfléchissant à cette longueur d'onde. En fait, le problème physique est décrit par une cavité; seuls certains modes y sont donc autorisés (figure I.15).

Les fréquences de ces modes dépendent du défaut, mais en faisant varier le rayon du défaut, on peut atteindre n'importe quelle fréquence située dans la bande interdite [19].

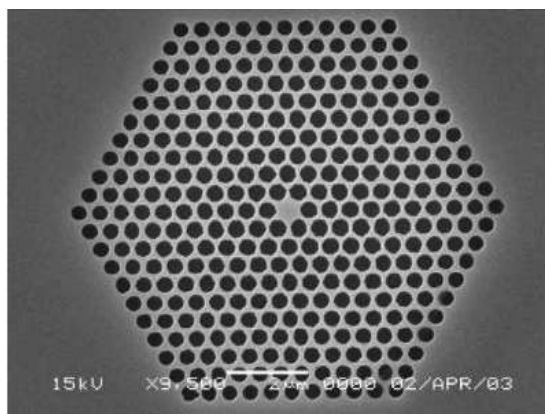


Figure I. 15:Exemple de cavité H1 (H car la cavité est hexagonale, et 1 parce qu'il a un seul trou manquant).

La figure I. 16 présente le spectre de transmission calculé d'un cristal 2D de symétrie hexagonale, formé de tiges diélectriques, le défaut hexagonale, formé de tiges diélectriques, le défaut est dû dans ce cas à une tige manquante. Si le spectre de transmission reste, pour une grande part, identique à celui du cristal sans défaut avec une bande interdite comprise entre 0.9 et $1.3\mu\text{m}$ en longueur d'onde, la présence du défaut se traduit par un pic de transmission étroit et unique à $1.1\mu\text{m}$.

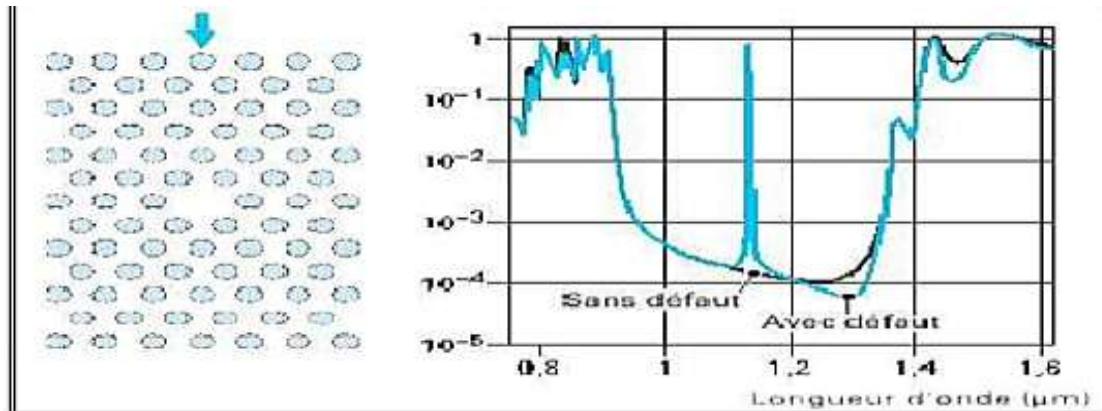


Figure I. 16: spectre de transmission d'un cristal hexagonal de tiges diélectriques avec ou sans défaut lacunaire [19].

I. 8. 2. Défauts étendus:

Ces défauts permettent de réaliser un guidage diffractif des ondes appelés aussi défauts linéaires, de dimension 1,2 ou 3, ne peuvent évidemment être obtenus que dans les cristaux de dimension au moins équivalente. Parmi ces défauts, les défauts 1D (**W1**) sont certainement ceux qui ont suscité le plus grand nombre d'études car ils ont vocation à être utilisés comme guides de lumière au sein d'un cristal donné (figure I.17). On peut d'ailleurs imaginer des défauts 2D (**W2**) ou 3D (**W3**) constitués d'une suite de guides W1, mis bout à bout et orientés

dans les directions différentes, de façon à véhiculer la lumière sur tous les chemins possibles à l'intérieur du cristal. L'exemple de base est celui du guide d'onde linéaire W1 dans un cristal photonique 2D. Une façon de réaliser un tel guide consiste à placer des défauts ponctuels, couplés et régulièrement espacés, dans une direction du cristal 2D. Le couplage entre une infinité de résonateurs conduit à une bande de propagation permise dans la direction de l'alignement. Ce type de guide à résonateurs couplés a été proposé en 1999 [1].

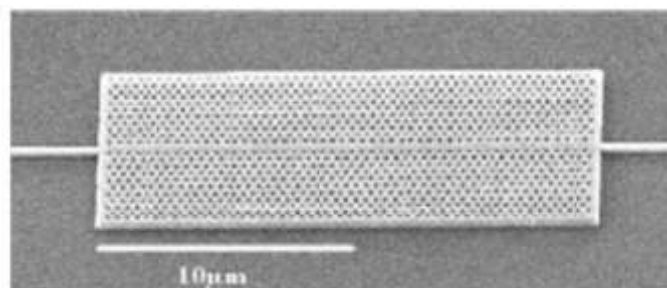


Figure I. 17: Exemple de guide W1 à cristal photonique triangulaire de trous d'air sur un Substrat de silicium sur isolant.

I. 9. Applications des cristaux photoniques :

Des fonctions de guidage, de routage et d'émission de lumière performantes et ultracompactes, telles sont les voies explorées dans le domaine des cristaux photoniques diélectriques pour répondre aux besoins d'intégration pour les télécommunications optiques à très haut débit de demain.

Nous distinguerons deux types d'utilisations des cristaux photoniques :

- Celles qui utilisent le cristal photonique à des longueurs d'onde dans le gap.
- Celles qui font appel à une propriété plus particulière du diagramme de bandes du Cristal.

I. 9. 1. Les guides d'ondes rectilignes:

I. 9. 1. 1. Guide $W_1^K A$ en structure triangulaire :

Dans un cristal photonique bidimensionnel, la création d'un défaut est causée par la rupture de la périodicité diélectrique. Cette rupture va engendrer l'ouverture d'une bande de fréquence autorisée à l'intérieur de la bande interdite photonique. La largeur et la position de cette bande autorisée sont générées par les caractéristiques du défaut. Les guides d'ondes, qui sont obtenus par le retrait d'une ou plusieurs rangées de trous d'air d'un réseau qui peut être soit triangulaire ou carré, sont le long de la direction du côté le plus long du domaine de calcul. Le matériau diélectrique a une constante diélectrique de 10,5 (c'est-à-dire un indice de

réfraction de 3.24 dans une structure dopée InP/GaInAsP/InP) pour obtenir une bande interdite photonique autour de $1,55 \mu\text{m}$. Une constante de réseau est de $0,48 \mu\text{m}$ avec un facteur de remplissage d'environ 44% ont été choisis pour une structure triangulaire. La structure est excitée en polarisation TE. Une source pulsée Gaussienne est utilisée pour exciter le mode de guide d'onde fondamentale à l'entrée du guide d'onde. Le pas de discrétisation est choisi tel que $\Delta x = \Delta y = 0.04 \mu\text{m}$ [2]. La structure à maille triangulaire à simuler est représentée sur la figure I.18.

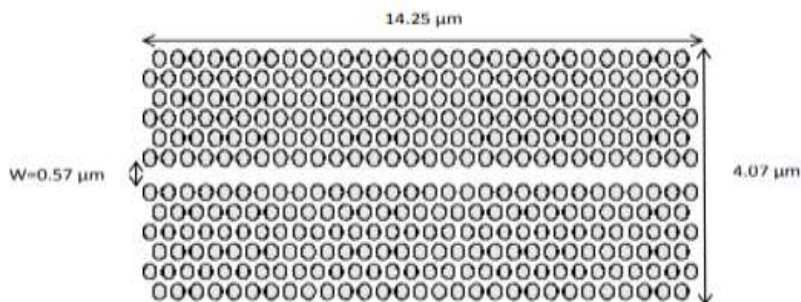


Figure I. 18: Structure triangulaire d'un guide mono rangée $W_1^k A$.

En utilisant la méthode des différences finies dans le domaine temporel à deux dimensions FDTD-2D. La réponse spectrale en transmission et en réflexion du guide mono rangée $w_1^k A$ est rapportée sur la figure I. 19.

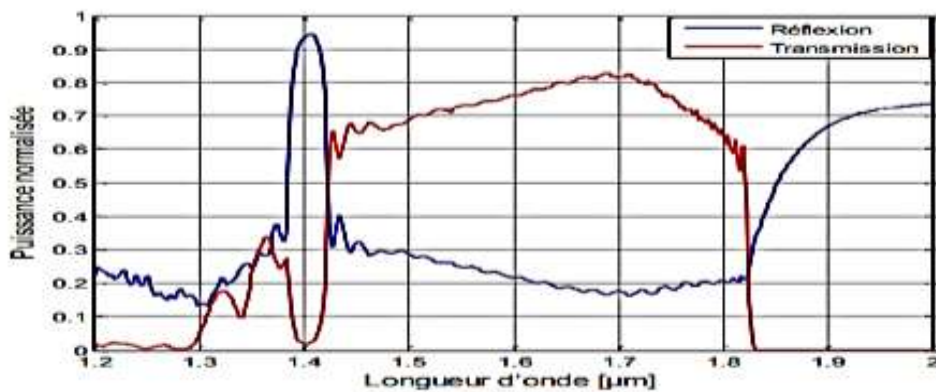


Figure I. 19 : La réponse spectrale en transmission et réflexion.

On observe que la transmission s'étend sur la gamme de longueurs d'ondes $[1,2 - 2]$ μm avec un maximum qui plafonne 82 % à $1,7 \mu\text{m}$. La puissance transmise en voisinage de la longueur d'onde $1,55 \mu\text{m}$ est de l'ordre de 73%. Ces maximums sont certainement explicables

par la présence du mode guidé sans pertes qui existe à ces longueurs d'ondes, alors que la faible dégradation de la puissance de la transmission est due à la présence des mini-BIPs [2].

I. 9. 2 Filtre add / drop :

Une fonction particulièrement importante d'optique intégrée pourrait être réalisée avec des cristaux photoniques : le multiplexage en longueur d'onde (WDM, Wavelength Division Multiplexing). Le but est d'insérer ou d'extraire des longueurs d'onde bien précises dans un flux de données. Ce dispositif peut être réalisé en utilisant la sélectivité d'une cavité résonante couplée par recouvrement des ondes évanescentes à des guides d'onde. Une première proposition théorique fut donnée par Fan et al. en 1998. Depuis, plusieurs réalisations ont montré la possibilité du couplage d'une cavité avec un guide. Par exemple, une réalisation de Chutinan, dont un schéma est rapporté à la figure II.19, permet l'extraction hors du plan ou l'insertion dans un guide d'une longueur d'onde précise (WDM mono-canal). Le facteur de qualité mesuré du mode résonnant est dans ce cas de 400 et l'on peut espérer une efficacité de couplage de 50 % entre la cavité et le guide. Ce type de dispositif est appelé un filtre « Add-Drop » [12] (figure I.20).

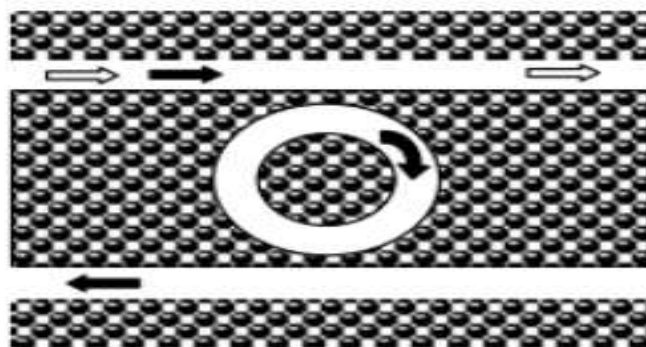


Figure I. 20: Représentation d'un filtre add / drop.

I. 9. 3. DEMUX-coupler:

Les propositions de démultiplexeurs à cristaux photoniques tendent à favoriser des cavités très petites (quelques périodes) et la fonctionnalité « add-drop », la plus exigeante. Le principe du dispositif proposé est de se servir du couplage par diffraction de Bragg entre un mode fondamental rapide pour la propagation du signal et un mode d'ordre supérieur, lent, pour l'extraction latérale du signal. Pour des guides à cristaux photoniques (CP) "W3" ou "W5", formés de 3 ou 5 rangées manquantes, ce couplage correspond à une mini stop band, dont la

largeur typique est de 3-20 nanomètres à 1500 nm, tout fait adaptée au coarse WDM (CWDM), et donc aux réseaux métropolitains.

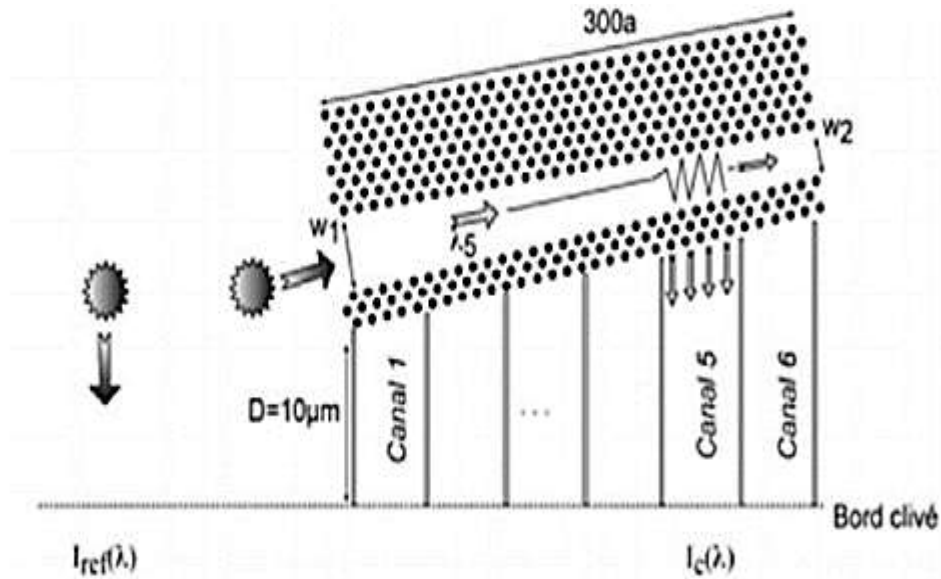


Figure I. 21: Principe de démultiplexeur spectrographique : le guide PC de largeur proche de «W3 » couple le mode fondamental au mode d'ordre supérieur uniquement dans la section où la diffraction de Bragg entre les deux modes est autorisée. Ce mode est ensuite extrait latéralement à travers les trois rangées de trous.

Comme le montre la figure I. 21, il suffit en première approximation d'affiner une des parois du guide et de varier lentement un de ses paramètres (la largeur dans l'illustration, mais ce pourrait être aussi la période) : une longueur d'onde donnée est alors aiguillée dans une section donnée parce que le couplage au mode d'ordre supérieur n'a lieu que dans cette section-là, et la paroi affinée laisse la lumière du mode d'ordre supérieur sortir latéralement, alors que le guidage du mode fondamental reste très robuste à toutes les longueurs d'onde restantes, l'effet tunnel sur ce mode « réfractif » étant très faible. La figure I.22, illustre le couplage de mode de W3 de façon générique. Dans le dispositif, la position de la mini-stopband évolue avec la largeur du guide. On voit que ce changement de largeur de 40 nm, dans un cas typique, conduit à des mini-stopband bien séparées [3].

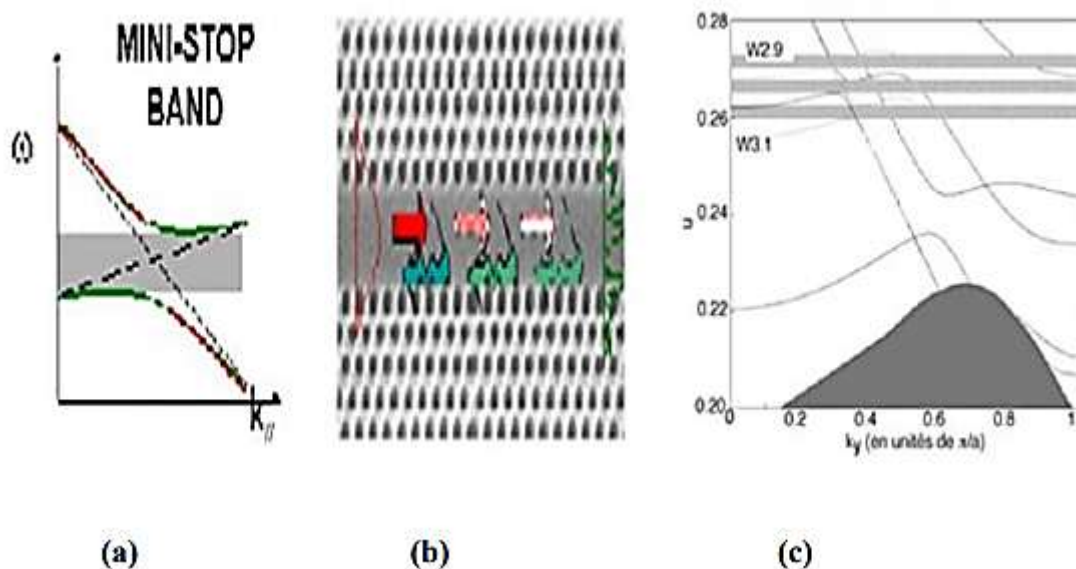


Figure I. 22: illustration de l'utilisation de la mini-stopband : (a) relation de dispersion locale, le mode fondamental étant le plus raide, le mode d'ordre supérieur le moins raide ; (b) schéma du couplage de mode dans le guide W3, (c) superposition des relations de dispersion pour des guides dont la largeur est modifiée de 0.1 rangée en plus ou moins comparé à W3[3].

I. 9. 4. Fibres optiques :

Une fibre optique est un guide de lumière, généralement cylindrique, en matériau diélectrique transparent dont l'indice suivant un diamètre sera plus élevé dans la zone centrale appelée le cœur de la fibre que dans la zone externe appelée gaine optique (figure I.23).

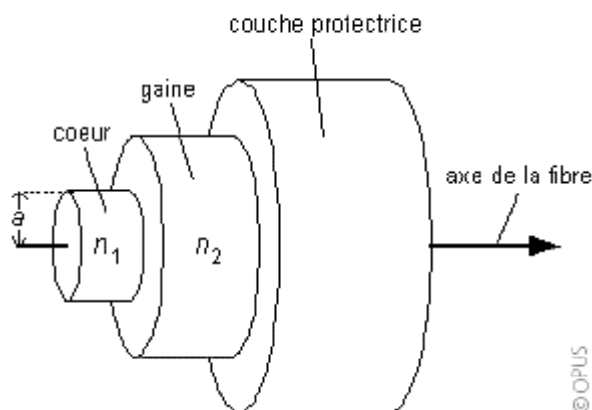


Figure I. 23: Fibre optique classique.

Les fibres utilisées classiquement dans le domaine des télécommunications guident la lumière par réflexion totale interne. Les fibres micro-structurées air-silice (M A S), qui sont aujourd'hui très largement développées, utilisent soit ce principe de guidage dans le cas où le

cœur est en silice pure, soit un guidage par bande interdite photonique, et c'est généralement dans le cas de fibre à cœur creux. Dans le but de créer un guidage dans une fibre optique creuse ou dite à cœur d'air, la propagation est basée sur le phénomène de la bande interdite photonique qui est observable dans les cristaux photoniques. Si l'on introduit un défaut de périodicité dans le réseau, un faisceau lumineux dont la longueur d'onde appartient à la bande interdite photonique pourra être piégé et propagé au niveau du défaut. Les propriétés optiques des cristaux photoniques peuvent donc être employées afin de réaliser des guides d'onde, notamment des fibres optiques. Par cette méthode on peut réaliser des guides d'onde dont l'indice de réfraction du défaut est inférieur à l'indice environnant. On peut donc concevoir des fibres à cœur d'air à guidage par bande interdite photonique. Cette nouvelle génération de fibres optiques doit permettre le guidage d'ondes lumineuses, ultraviolettes, visibles ou infrarouges, ouvrant des champs d'applications vastes dans les domaines des télécommunications, de l'industrie, de la bio photonique ou de l'environnement [20].

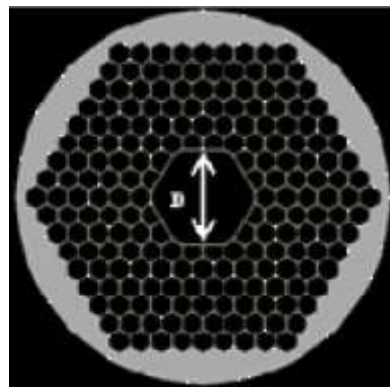


Figure I. 24:Exemple de section transverse de fibre creuse air-silice. Les trous d'air sont représentés en noir, la silice est en gris.

I. 9. 5. Le diviseur à cristaux photoniques :

I. 9. 5. 1. Définition :

Le rôle d'un diviseur est de séparer la lumière dans les différentes parties de circuit optique, il existe 2 types :

*le diviseur de type jonction Y : il contient une portion de jonction Y et deux ou quatre guides de sortie, ce type présente l'avantage d'offrir une réponse spectrale plate pour un intervalle de longueur d'onde très étendue.

*le diviseur de type jonction T : il contient un guide d'onde d'entrée juxtaposé avec une portion de guide plus large et multimode, il propage avec différent vitesse de phase, ce type présente l'avantage de plus faible pertes de l'ordre de 1 à 2 dB pour des diviseurs de 1 vers 23 jusqu'à 1 vers 8.

I. 9. 5. 2 Travaux réalisés sur les diviseurs à base de cristaux photonique :

Selon la littérature, plusieurs topologies des diviseurs en cristaux photoniques ont été étudiées. Sur la figure I .24, nous présentons deux types de diviseurs en Y 1X2 et 1X3 et en T 1X2 et 1X3.

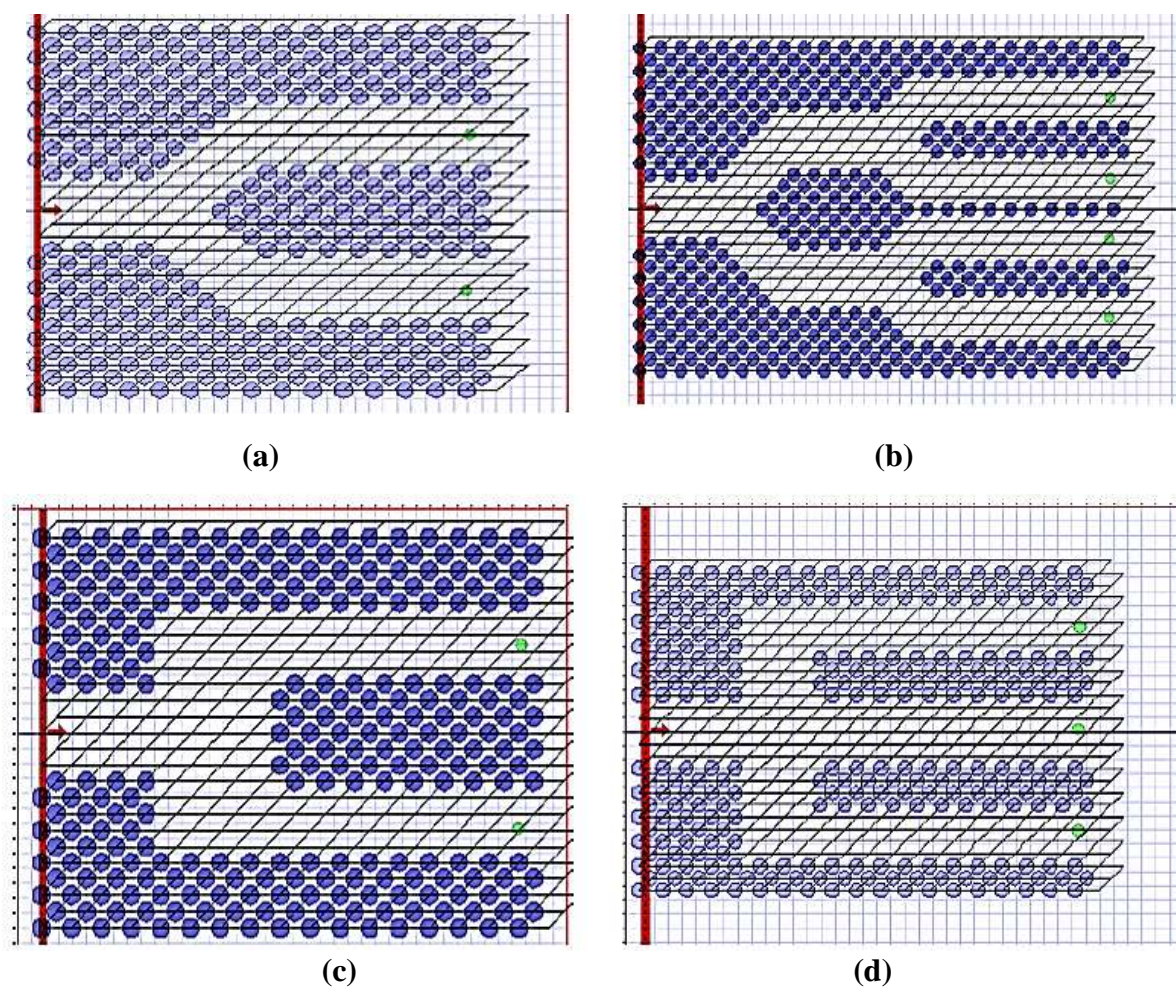


Figure I. 25 : structure d'un diviseur : (a) 1x2 avec une jonction Y, (b) 1x4 avec une jonction Y, (c) 1x2 avec une jonction T, (d) 1x3 avec une jonction T [21].

Les paramètres géométriques des quatre structures sont les suivantes : la constante de réseau $a= 0.435\mu\text{m}$, le rayon de trous du cristal photonique $R= 0,128 \mu\text{m}$, le diamètre du port

d'entrée optimisé $D = 1,02 \mu\text{m}$. Les résultats de simulation des diviseurs sont prélevés uniquement sur la longueur d'onde $\lambda_1 = 1,55 \mu\text{m}$ (mode TE). L'évolution du champ magnétique Hz est présentée sur la figure I. 26 [21].

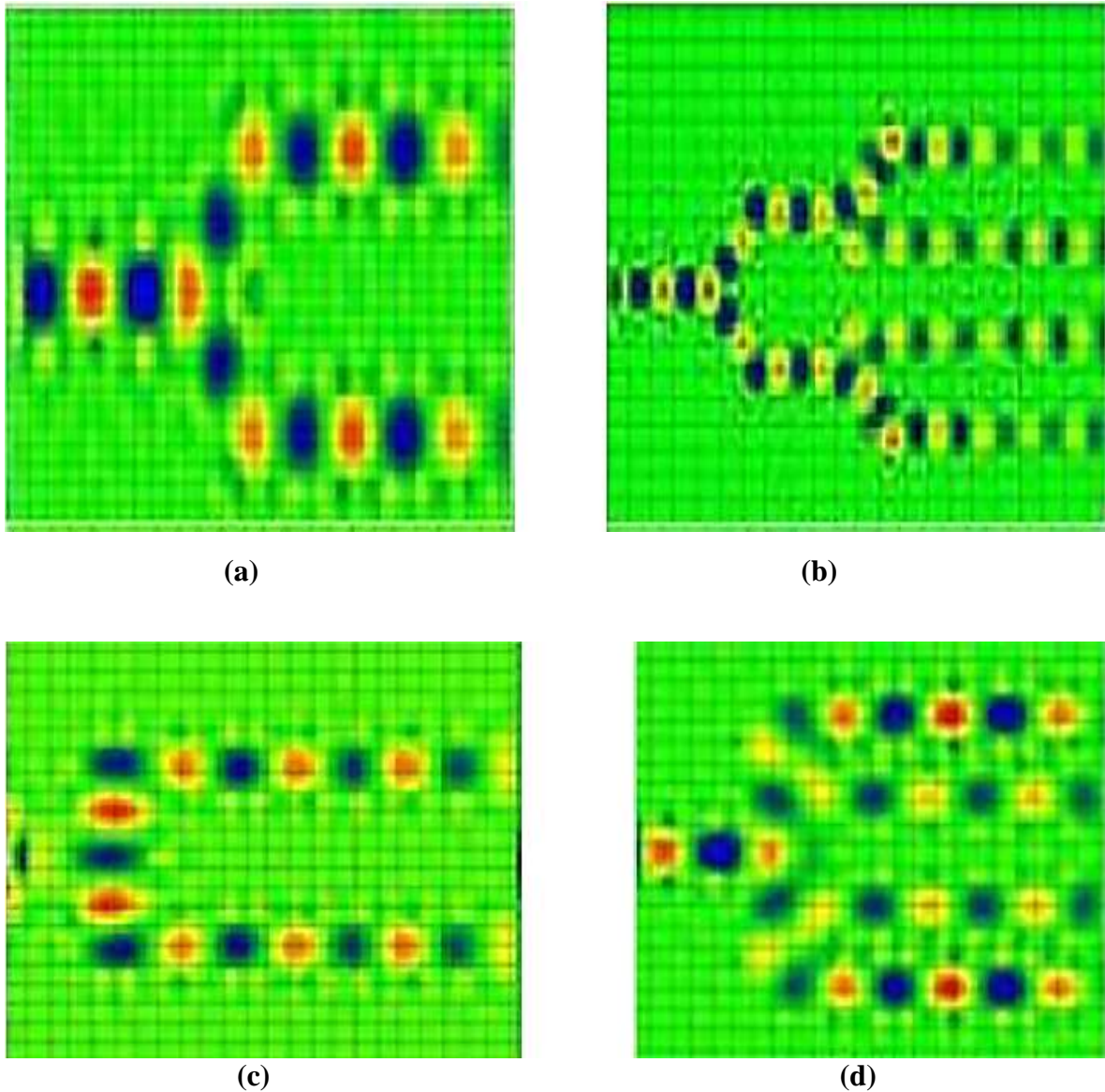


Figure I. 26 : résultats de simulation : (a) diviseur en Y (1x2), (b) diviseur en Y (1x4), (c) diviseur en T (1x2), (d) diviseur en T (1x3) [21].

D'après les résultats de la simulation, il a été prouvé la jonction en Y est meilleur par rapport à la jonction T.

I. 10. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudiés les concepts généraux sur les cristaux photoniques. Ces matériaux, dont la constante diélectrique varie périodiquement sur une ou

plusieurs directions de l'espace permettent d'interdire la propagation de la lumière dans ce qu'on appelle la bande interdite photonique. Nous soulignons que ces matériaux ont été inspirés par la nature étant donné qu'il existe des cristaux photoniques naturels à l'état minéral et biologique, de plus en créant un défaut au niveau du cristal photonique, ceci permet d'ouvrir une bande de transmission à l'intérieur de la bande interdite photonique. Les cristaux photoniques ouvrent donc la voie de plusieurs fonctions optiques telles que les guides d'ondes, les filtres, les fibres optiques, les diviseurs et les DEMUX-coupler.

Le chapitre suivant est consacré à une fonction particulière très répandue dans les systèmes de télécommunications optiques : le démultiplexage en longueur d'onde.

Chapitre II : Démultiplexage en cristaux photoniques

II. 1. Introduction :

L'invention a trait à un multiplexeur/démultiplexeur en longueur d'onde qui se présente sous la forme d'un dispositif possédant une fonction de multiplexage conçue pour regrouper des lumières ayant des longueurs d'onde différentes ainsi qu'une fonction de démultiplexage prévue pour séparer les lumières ayant des longueurs d'onde différentes dans un émetteur et un récepteur afin de réaliser une interconnexion optique ((Le multiplexage en longueur d'onde, souvent appelé WDM (Wavelength Division Multiplexing en anglais)).

Un multiplexeur / démultiplexeur est prévu pour une interconnexion optique entre des composants électroniques sur une puce de circuit intégré.

La large bande passante du canal de transmission optique (guide, fibre optique) permet de transporter plusieurs signaux à des longueurs d'onde différentes dans le même canal via un multiplexeur optique. C'est le multiplexage en longueur d'onde (WDM pour Wavelength Division Multiplexing). Chaque porteuse est transmise indépendamment des autres, dans la mesure où les canaux sont espacés spectralement. À la fin du canal de transmission, avant la détection, les signaux sont séparés à l'aide d'un démultiplexeur. Les équipements de démultiplexage en longueur d'onde sont des éléments passifs, souvent de type réseau de diffraction. Ils agissent comme des filtres en sélectionnant le signal dans une zone de longueur d'onde [22].

II. 2 Etude de cavités à Cristaux Photoniques 2D :

Dans le cas de cristaux 2D, les défauts sont créés soit par :

- une modification locale de l'indice.
- par un changement de taille d'un motif cristallin (défaut de substitution).
- le déplacement de l'un de ces motifs (défaut interstitiel).
- l'absence de l'un des motifs (défaut lacunaire).
- l'insertion d'un motif différent (dopant).

La présence d'un défaut ponctuel peut conduire à l'existence de niveaux discrets dans une bande interdite.

II. 2. 1 Etude de la cavité S1 pour un défaut de substitution :

Ces dernières années les chercheurs s'intéressent de plus en plus aux cavités à cristaux photoniques parce que elle a une structures qui confinent fortement la lumière et permettent d'obtenir des facteurs de qualité très élevés.

Le multiplexage des informations est l'injection de plusieurs longueurs d'onde différentes dans la même fibre optique, qui doivent être filtrées à la sortie.

II. 2. 1. 1 Variation du rayon de la maille centrale (r) :

Pour étudier une cavité S1 on utilise la méthode des différences finies temporelles FDTD 2D. Pour schématiser l'influence de rayon de tige sur le facteur de qualité Q et la position de la longueur d'onde des modes résonnants de la cavité H1, la valeur de r est varié entre $0.254 \mu\text{m}$ jusqu'à $0.30 \mu\text{m}$ (figure II.1).

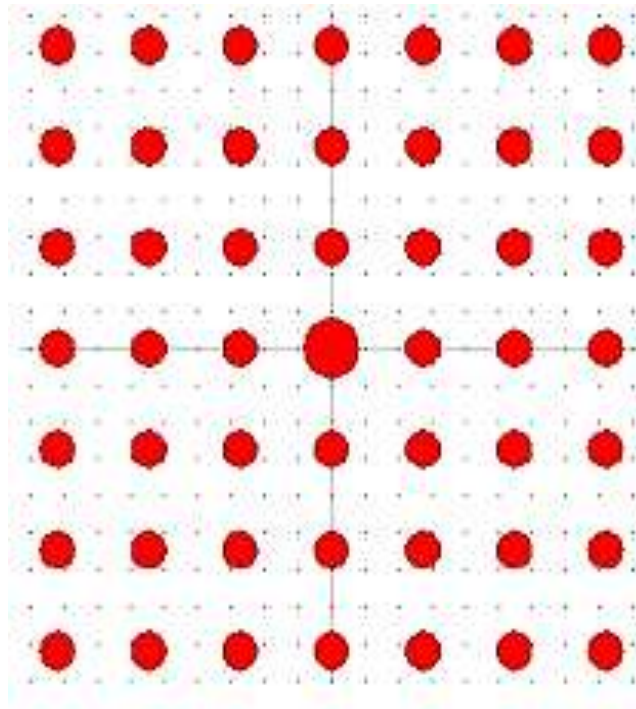


Figure II.1: Structure de cavité S1 [8].

| Rayon de tige centrale r (μm) | Longueur d'onde de résonance (μm) | Facteur de qualité Q |
|---|---|----------------------|
| 0.294 | 1.5092 | 5766.9 |
| 0.295 | 1.5124 | 5704.2 |
| 0.296 | 1.5163 | 5695 |
| 0.297 | 1.5193 | 5682.2 |
| 0.298 | 1.5232 | 5682.2 |
| 0.299 | 1.5267 | 5658.6 |
| 0.300 | 1.5304 | 5644.6 |
| 0.301 | 1.5338 | 5643.7 |

Tableau II. 1 : Variation de la longueur d'onde de résonance et le facteur de qualité en fonction du rayon r de la tige centrale [8].

On remarque que la position de la longueur d'onde de résonance dépend de la valeur du rayon r. Par conséquent quand on fait varier le rayon du défaut, on peut atteindre n'importe quelle fréquence située dans la bande interdite photonique. On remarque aussi que lorsqu'on augmente la taille du rayon r les longueurs d'ondes de résonance se décalent vers les grandes valeurs [8].

D'après les résultats de la Figure II.3 on remarque que le rayon possède une grande influence sur le facteur de qualité et la longueur d'onde de résonance.

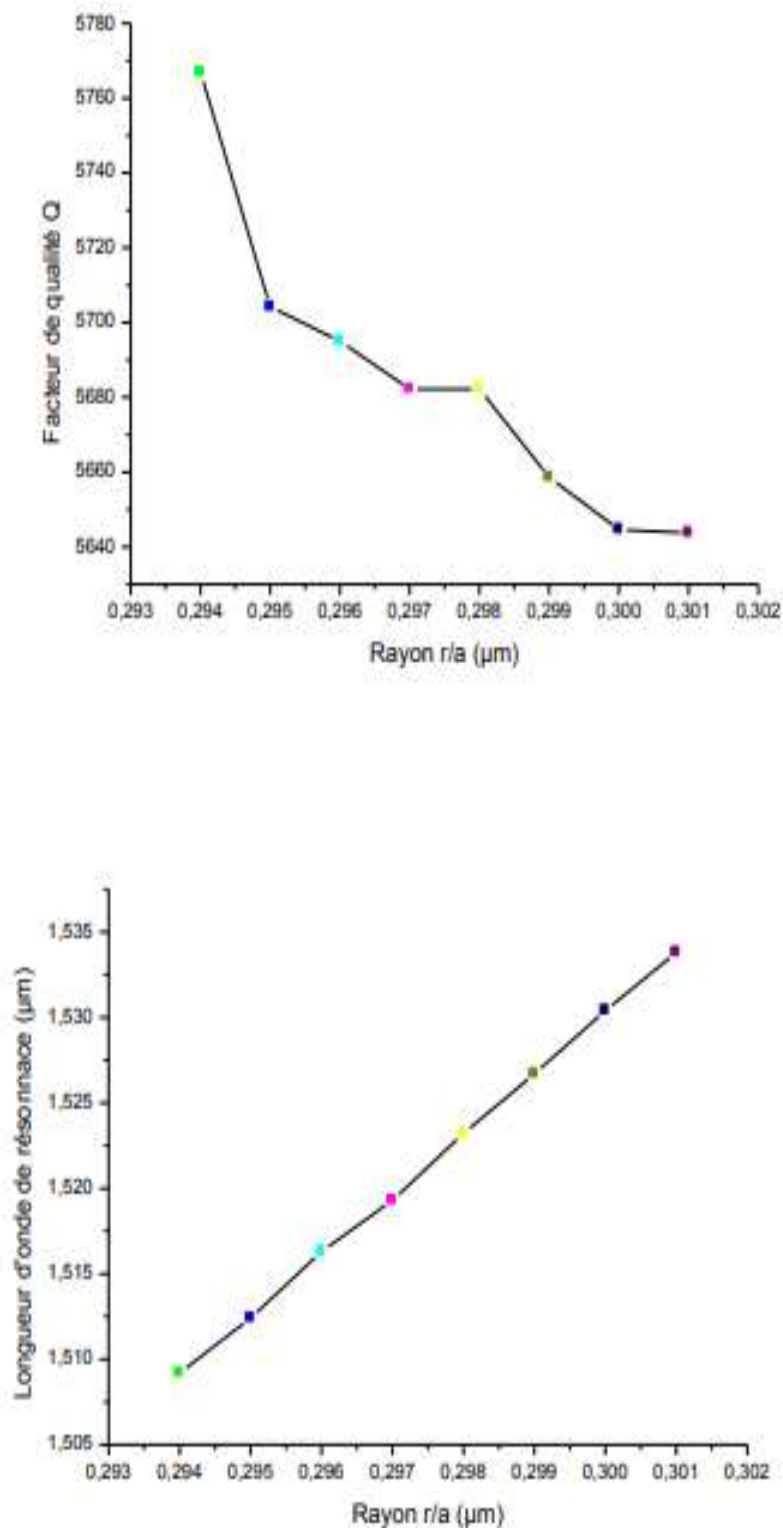


Figure II. 2: Variation de la longueur d'onde de résonance et facteur de qualité en fonction de la variation du rayon de la tige centrale [8].

La figure II. 3 illustre les résultats de simulation obtenus par logiciel Rsoft en terme de transmission pour différentes valeur de r allant de $0.254 \mu\text{m}$ jusqu'à $0.301 \mu\text{m}$.

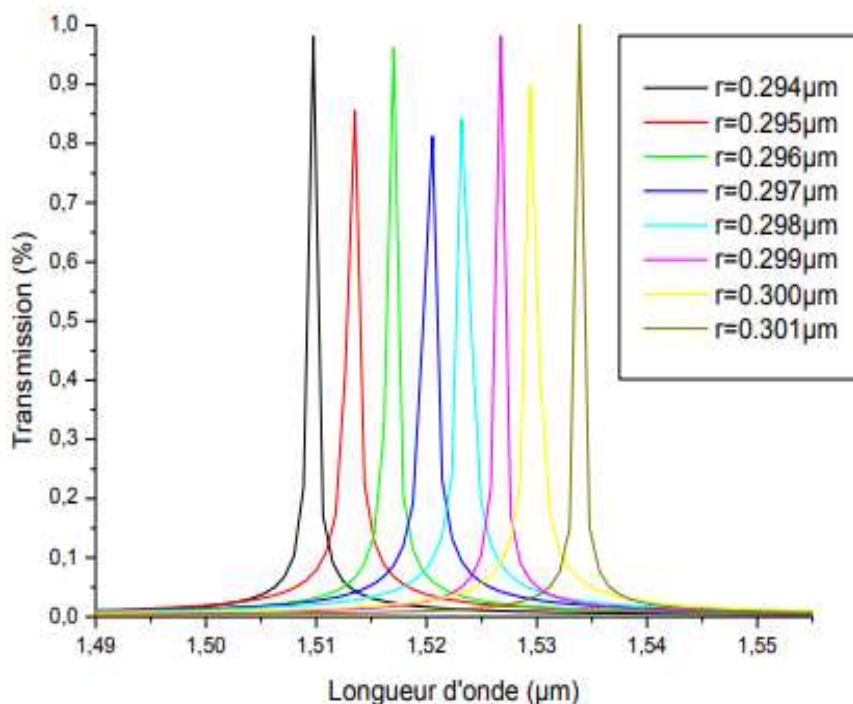


Figure II. 3: Spectre de transmission des Canaux en fonction de la variation du rayon de la tige centrale [8].

II. 3 Etudes des guides à cristaux photoniques :

Un attrait majeur des cristaux photoniques repose sur l'insertion contrôlée de défauts au sein du cristal lors de sa fabrication. Les géométries possibles sont quasi infinies et peuvent aller de la modification de la taille ou de l'indice d'un seul motif du cristal à des défauts plus étendus comme le retrait de rangées entières de motifs. Comme pour les semi-conducteurs, ces défauts peuvent générer des états permis aux fréquences de la bande interdite du cristal parfait et être ainsi le « support » d'un champ électromagnétique préparatif pour ces fréquences. Un contrôle de la propagation de la lumière au sein du cristal et à l'échelle de la longueur d'onde est alors envisageable via ces défauts. L'utilisation de ces structures ouvre notamment une voie vers une miniaturisation des composants d'optique intégrée et une amélioration de leurs performances [23].

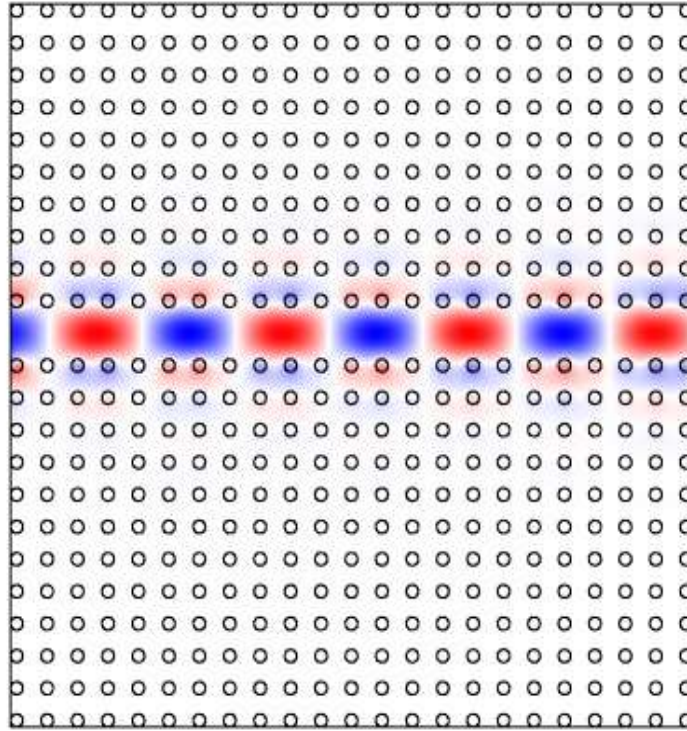


Figure II. 4: Un guide d'onde W1.

II. 3. 1 Conception d'un guide d'onde de type virage à 60° :

On s'intéresse par la conception d'un virage à base de CP2D qui représente le composant essentiel d'un démultiplexeur. Comme il est illustré sur la figure II. 5 , le guide virage est obtenu par la combinaison de deux guides de type $W_1^K A$ de largeur W et qui forment entre eux un angle $\alpha = 60^\circ$, dans une structure de réseau à maille triangulaire formé de trous d'airs de rayons bien choisis assurant un bon fonctionnement de démultiplexeur proposé au voisinage des longueurs d'ondes ciblées qui sont $1.31\mu\text{m}$ et $1.55\mu\text{m}$. Le rayon de trous est égal à $0.18\mu\text{m}$, tandis que le facteur de remplissage en air est de 52% [3].

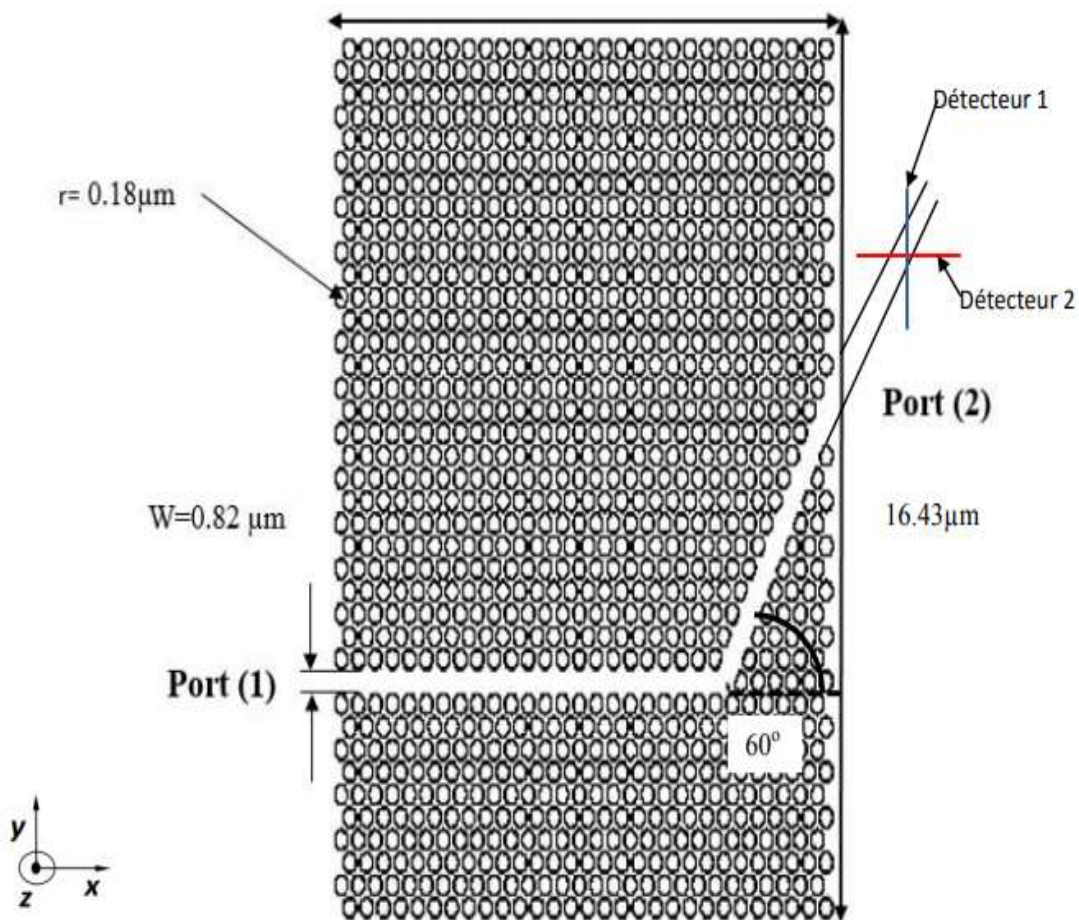


Figure II. 5 : Structure d'un guide virage réalisé dans un cristal photonique bidimensionnel triangulaire de trous d'air [3].

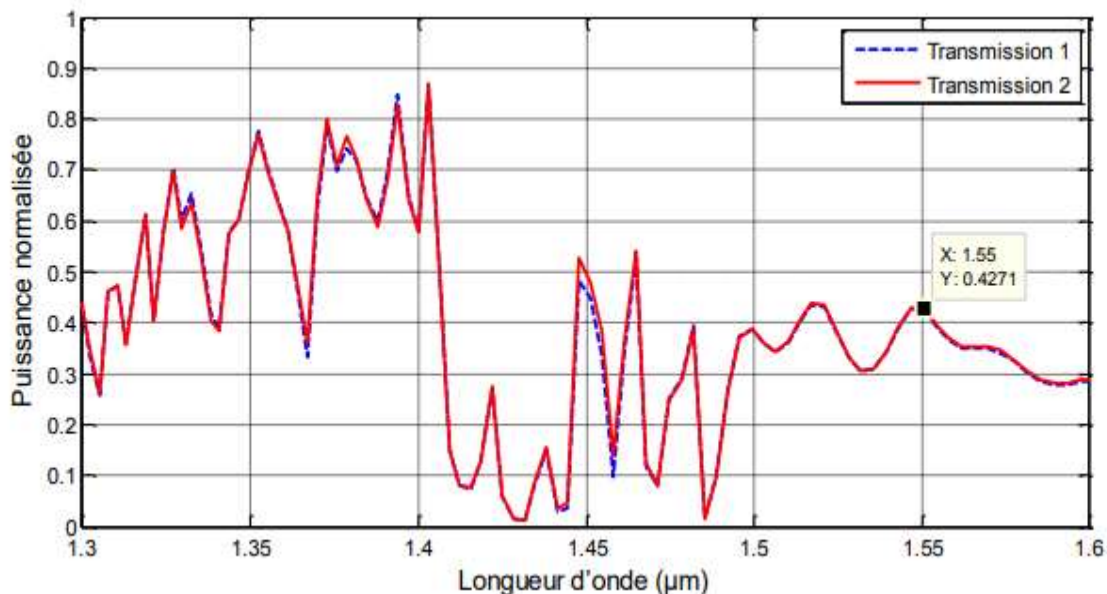


Figure II. 6 : Spectre de transmission normalisé du Guide virage à 60° [3].

II. 4. Démultiplexeurs en cristaux photoniques :

Les applications potentielles des cristaux photoniques sont très vastes et couvrent plusieurs domaines, tels que : les composants à facteur de qualité très élevé, les coupleurs directionnels, les doubles virages, les filtres, les démultiplexeurs, les diviseurs de puissance, les capteurs et biocapteurs. Ces nouveaux dispositifs optoélectroniques reproduisant les caractéristiques d'un circuit intégré, utilisant les photons comme porteurs d'information au lieu des électrons. La lumière a en effet plusieurs avantages par rapport aux électrons. Elle peut voyager dans un matériau diélectrique plus rapidement qu'un électron dans un fil métallique ; elle peut porter une grande quantité d'information par seconde ; les interactions entre photons et matériau diélectrique sont moins importantes que celles entre électrons et matériau métallique, ce qui réduit les pertes d'énergie.

II. 4.1. Etude d'un démultiplexeur :

Un démultiplexeur en cristaux photonique est un couplage entre le guide d'onde et la cavité photonique, donc quand on ajustant la taille du point on modifiée la propriété de résonance (figure II. 7).

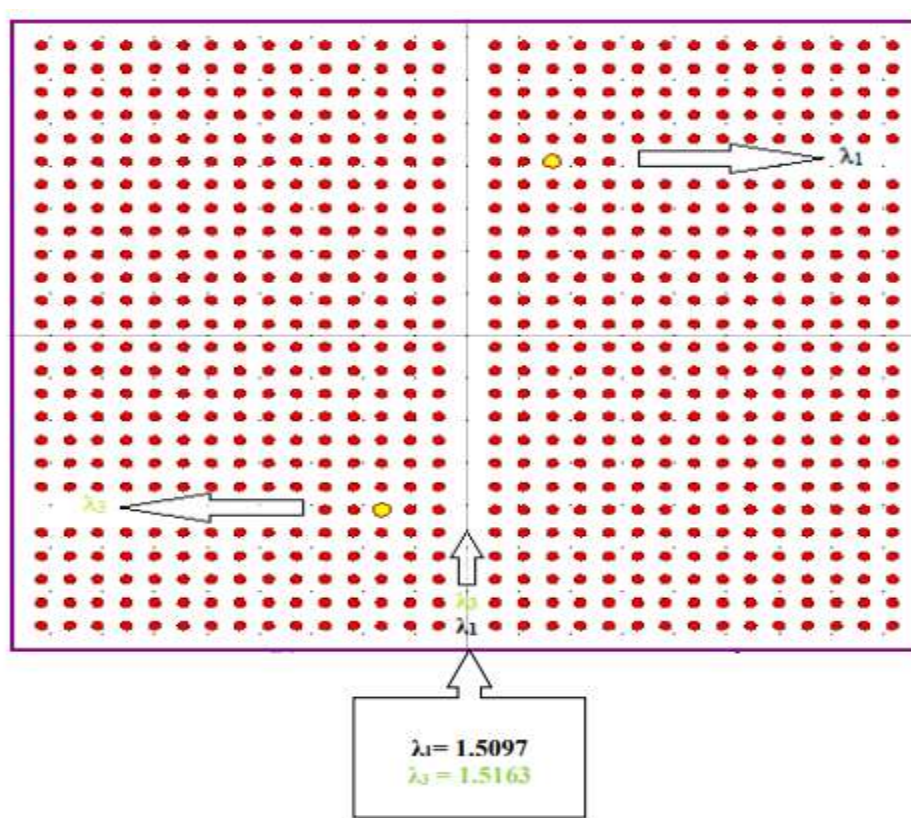


Figure II. 7 : Structure d'un démultiplexeur a deux canaux pour un défaut substitutionnel de $\lambda_1=1.5097$ et $\lambda_3=1.5163$ [8].

Le contrôle la fréquence de résonance de la cavité optique est faite par la variation du rayon du défaut ponctuel (r). Huit longueurs d'ondes sont respectivement égales à [1.5097 μm , 1.5124 μm , 1.5163 μm , 1.5193 μm , 1.5232 μm , 1.5267 μm , 1.5304 μm et 1.5338 μm .] Les longueurs d'ondes obtenues pour les chaque rayon $r = 0.294, 0.295, 0.296, 0.297, 0.298, 0.299, 0.300$ et $0.301 \mu\text{m}$).

Les deux figures II. 8 et II. 9 représentent deux architectures d'un démultiplexeurs optique à 4 et à 8 canaux pour un défaut substitutionnel.

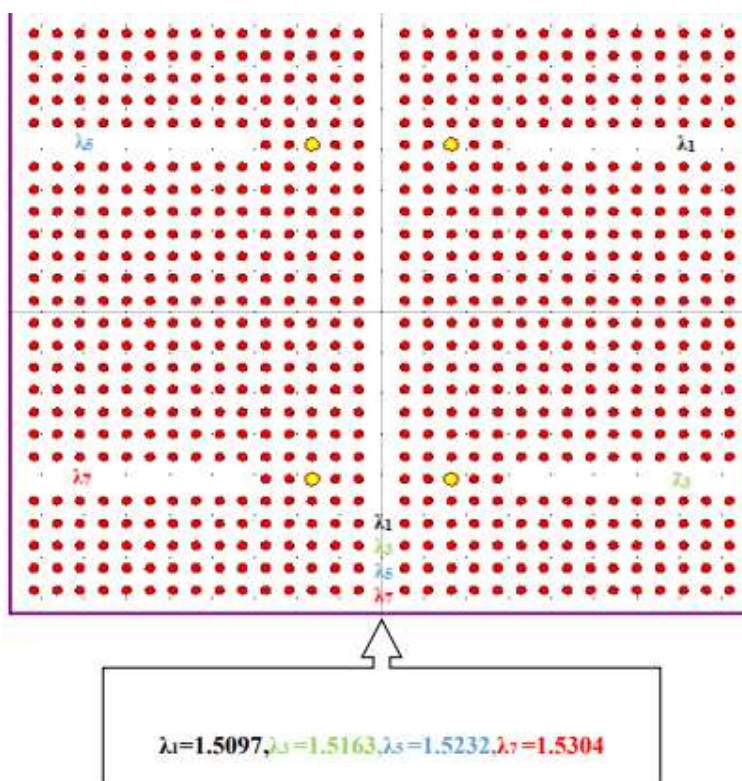


Figure II. 8: Structure d'un démultiplexeur à quatre canal pour un défaut substitutionnel pour $\lambda_1=1.5097 \mu\text{m}$, $\lambda_3=1.516 \mu\text{m}$, $\lambda_5=1.5232 \mu\text{m}$ et $\lambda_7=1.5304 \mu\text{m}$ [8].

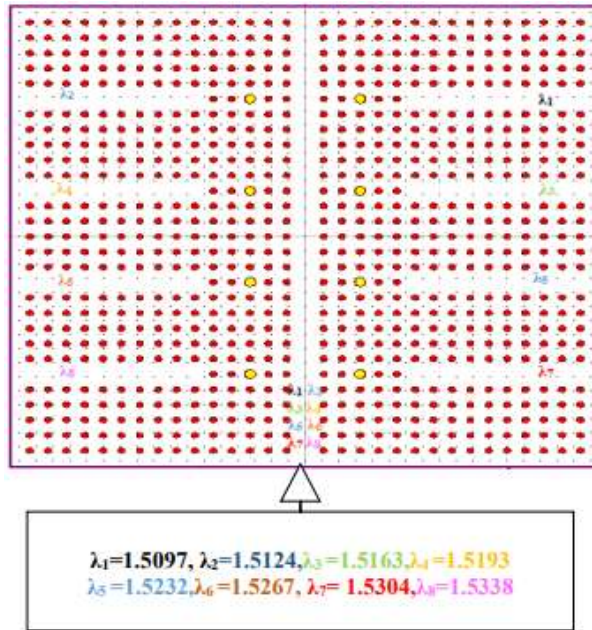


Figure II. 9: Structure d'un démultiplexeur à huit canaux pour un défaut substitutionnel pour : $\lambda_1 = 1.5097 \mu\text{m}$, $\lambda_2 = 1.5124 \mu\text{m}$, $\lambda_3 = 1.5163 \mu\text{m}$, $\lambda_4 = 1.5193 \mu\text{m}$, $\lambda_5 = 1.5232 \mu\text{m}$, $\lambda_6 = 1.5267 \mu\text{m}$, $\lambda_7 = 1.5304 \mu\text{m}$ et $\lambda_8 = 1.5338 \mu\text{m}$ [8].

La cartographie du champ électrique E_y pour chaque démux est donné par les figures figure II.10 et figure II.11.

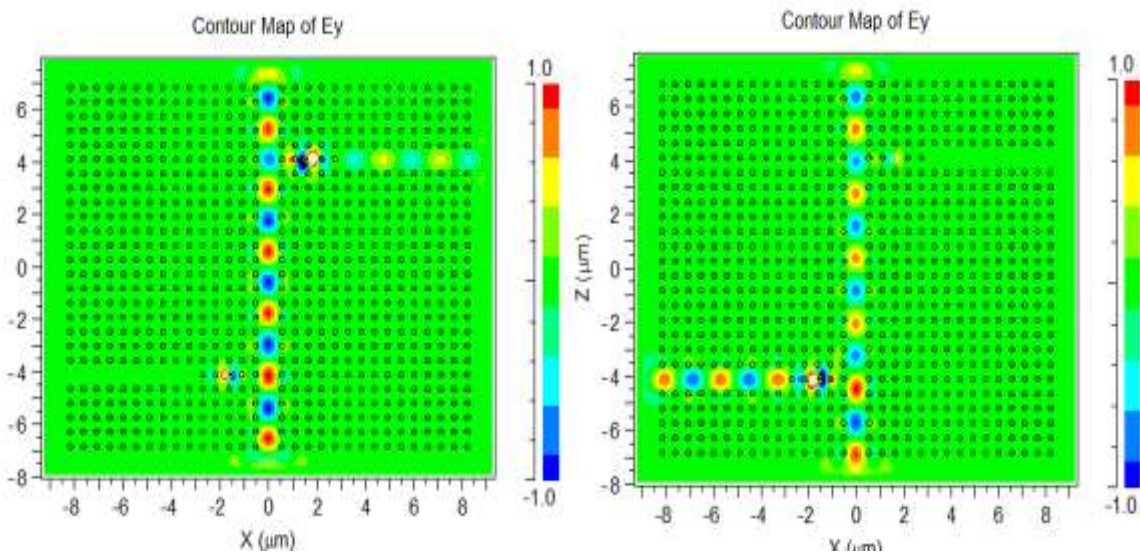


Figure II. 10: La propagation de la lumière dans un démultiplexeur à deux canaux pour : $\lambda_1 = 1.5097$ et $\lambda_3 = 1.5163$ [8].

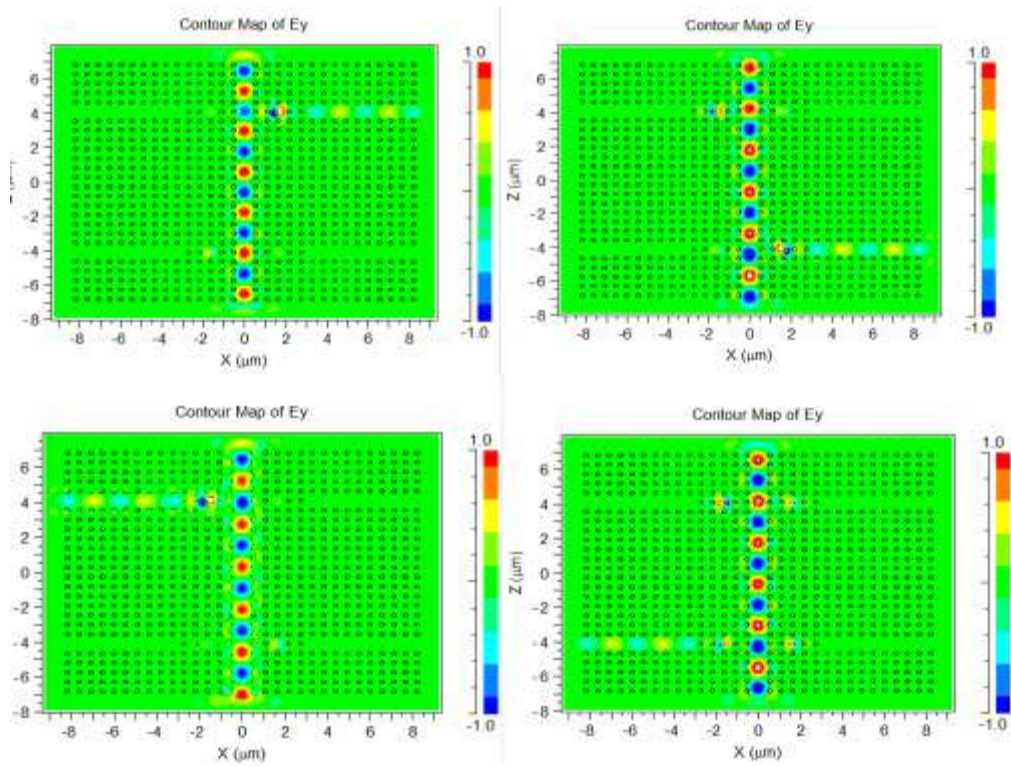
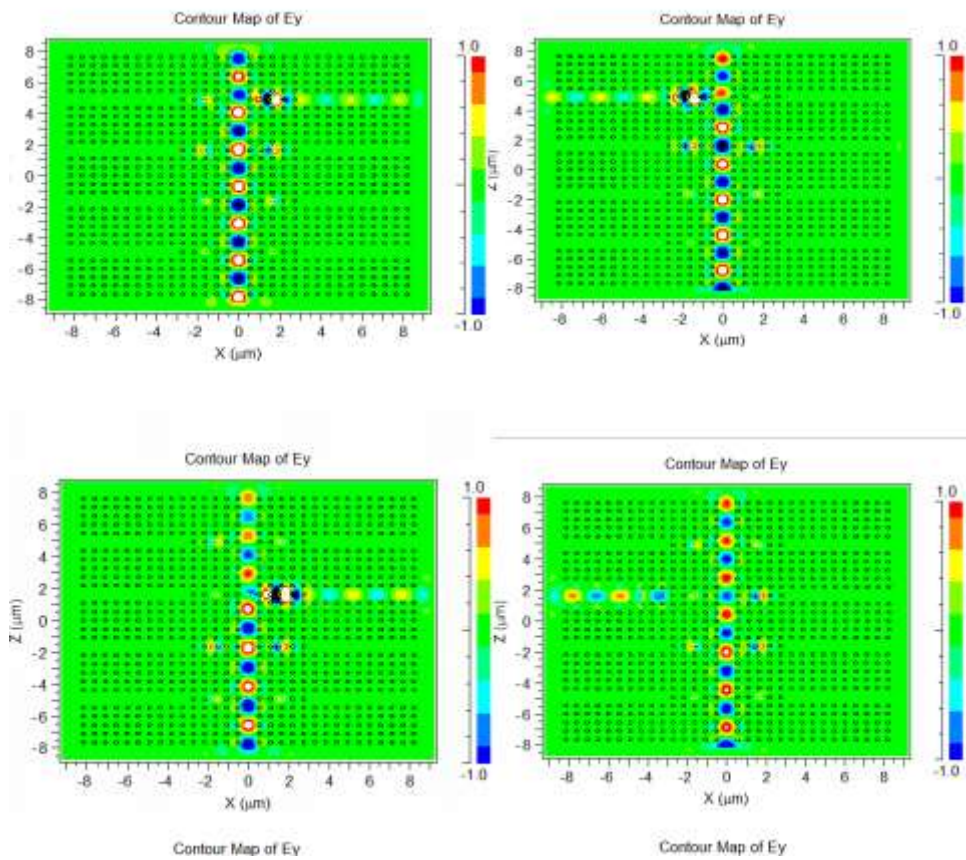


Figure II. 11 : La propagation de la lumière dans un démultiplexeur à quatre canaux pour : $\lambda_1 = 1.5097$, $\lambda_3 = 1.5163$, $\lambda_5 = 1.5232$, $\lambda_7 = 1.5304$ [8].



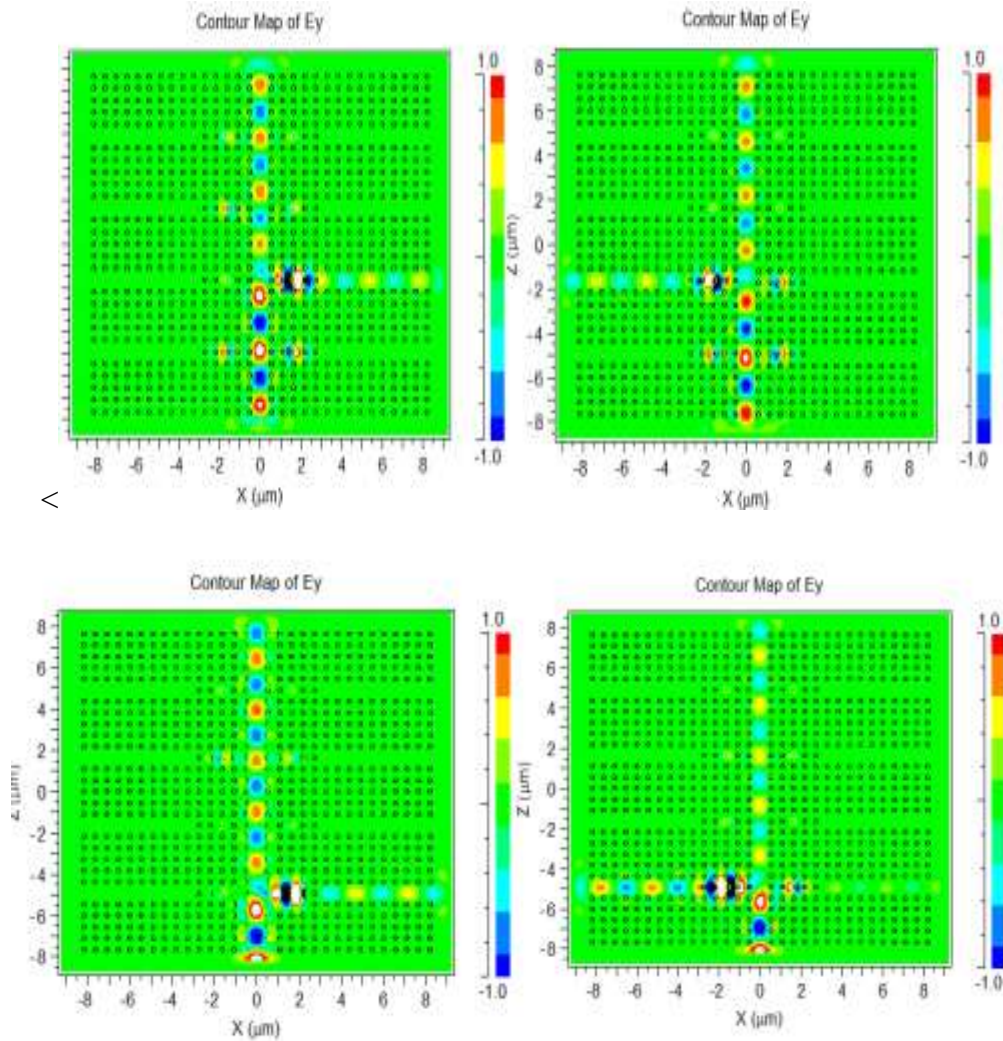


Figure II. 12 : La propagation de la lumière dans un démultiplexeur à huit canaux pour : $\lambda_1=1.5097$, $\lambda_2=1.5124$, $\lambda_3=1.5163$, $\lambda_4=1.5193$, $\lambda_5=1.5232$, $\lambda_6=1.5267$, $\lambda_7=1.5304$ et $\lambda_8=1.5338$ [8].

Le but de cette application est de prouver qu'on peut sélectionner ou extraire plusieurs longueurs d'ondes bien définies et bien distinctes à partir d'un seul signal émis, en utilisant les propriétés des démultiplexeurs à cristaux photoniques déjà étudiés. Donc en ajustant la taille du défaut, on peut atteindre n'importe quelle fréquence dans la gamme des télécoms en utilisant une seule structure à cristal photonique voir un seul dispositif. C'est une propriété inhérente aux démultiplexeurs à base des cristaux photonique qui confère à ces derniers des potentialités confirmées dans le domaine de la transmission optique [8].

II. 5. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu sur la fonction de démultiplexage en longueur d'onde à base des cristaux photoniques, obtenu par l'introduction des défauts substrationnels.

Le chapitre suivant est consacré particulièrement aux résultats de simulation des nouvelles topologies des démultiplexeurs optiques obtenus par le logiciel COMSOL.

Chapitre III : Présentation des résultats de simulation

III. 1. Introduction :

La majorité des applications des cristaux photoniques est basée sur leur bande interdite et pour disposer une fréquence permise à l'intérieure de cette bande interdite, il est nécessaire d'introduire des défauts dans cette structure périodique. Ces défauts sont réalisés en modifiant localement la géométrie du cristal (a,r...).

Un multiplexeur est un composant qui permet de transmettre plusieurs signaux sur le même conducteur donc le rôle d'un démultiplexeur est de séparer les signaux fusiné à l'entrée. Dans ce travail, un démultiplexeur en longueur d'onde (WDM : Wavelength Division Démultiplexing) à base de résonateurs en anneaux à CPs en forme de 'plus' a été conçu pour la séparation des longueurs d'ondes $1.55\mu\text{m}$ et $1.31\mu\text{m}$ très utilisée dans les systèmes de transmission optique à très haut débit.

Ce chapitre est réservé à la présentation des résultats de simulation de plusieurs topologies des démultiplexeurs en utilisant un simulateur COMSOL Multiphysics.

III. 2. Définition de logiciel COMSOL :

COMSOL Multiphysics est un logiciel qui est fondé en 1986 par l'entreprise « COMSOL ». Cette entreprise se spécialise dans le domaine de développement de logiciel de support technique et de formation spécialisé et conseil. COMSOL Multiphysics c'est un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis. Ce logiciel permet de simuler de nombreuses applications en ingénierie, et tout particulièrement les phénomènes couplés ou simulation multi-physiques [15].

Le logiciel COMSOL version 5.4a est un des simulateurs les plus utilisés par les chercheurs afin de simuler les phénomènes liés aux matériaux et les différentes techniques utilisées pour la technologie de la photolithographie. La figure III. 1 présente le software que nous avons utilisé pour notre simulation.

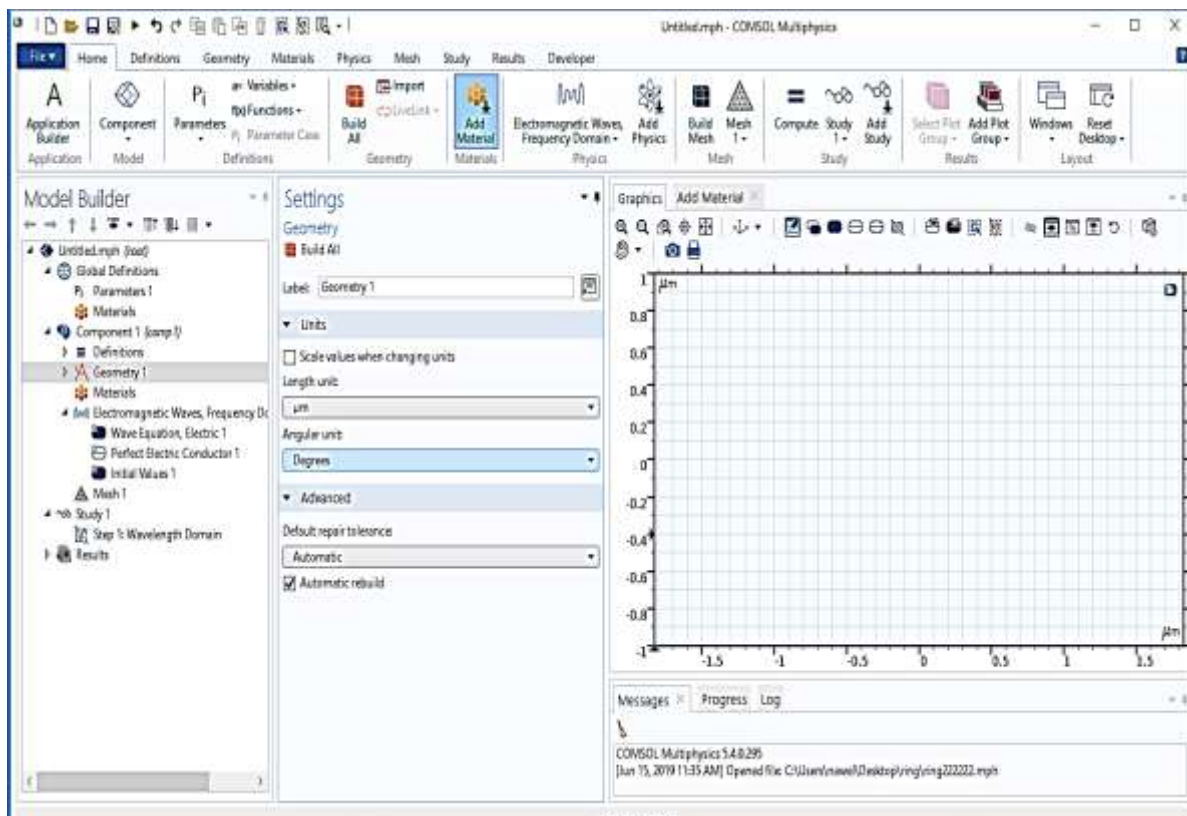


Figure III. 1 : Présentation du software COMSOL Version 5.4a utilisé pour la simulation.

III. 3. Présentation des résultats de simulation :

L'objectif de ce chapitre consiste à déterminer les caractéristiques de réflexion et de transmission d'une structure d'un démultiplexeur avec certain cahier de charge.

Pour la réalisation des démultiplexeurs en cristaux photoniques nous sommes intéressés par les guides à cavités couplées pour la fabrication de virages aigus à fort taux de transmission ou de fonctions de démultiplexage.

Pour notre projet, l'étude est portée sur une structure photonique à maille élémentaire carrée 2D déconnectée constituée des tiges GaAs dans l'air. Dans notre simulation on a choisi les paramètres suivants:

a : l'espace entre le centre de deux motifs adjacents ($a=0.48 \mu\text{m}$).

K : le rayon normalisé de la tige (0.19) avec $k=r/a$.

r : le rayon de tiges.

n : l'indice de réfraction des tiges diélectriques ($n=3,5227$).

III. 3. 1. Les guides ondes :

Une fonction particulièrement importante d'optique intégrée pourrait être réalisée avec des cristaux photoniques à défaut linéaire : le démultiplexage en longueur d'onde. Le but est d'extraire des longueurs d'ondes bien précises dans un flux de données. Ce dispositif peut être réalisé en utilisant la sélectivité d'une cavité résonante couplée par recouvrement des ondes évanescentes à des guides d'onde. Ce type de dispositif est appelé un filtre « Add-Drop ». D'autre configuration de la structure à cristaux photoniques peut utiliser pour séparer deux longueurs d'ondes [24].

III. 3. 1. 1. Cristal photonique 2D sans défaut:

A. Maille carrée:

L'étude est portée sur une structure 2D déconnectée constituée d'un réseau carré de tiges en GaAs. Le nombre de motifs dans le réseau égal à 484 tiges cylindriques (dans la direction $x=22$ tiges et $y=22$ tiges).

La figure III. 2 illustre la structure d'un CP-2D sans défaut à maille carrée :

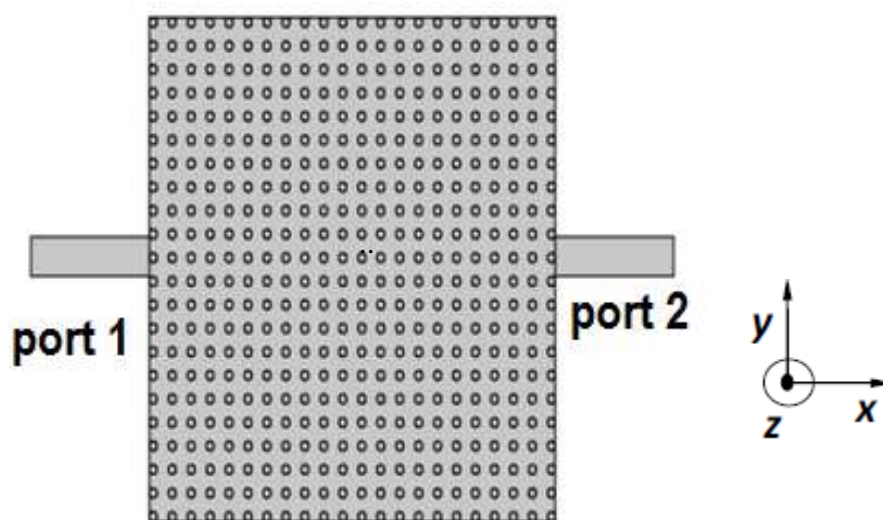


Figure III. 2: Représentation schématique d'un CP-2D déconnecté sans défaut à motif carré.

La figure III. 3 illustre la réponse spectral en terme de transmission en fonction de la longueur d'onde s'étalant sur la gamme $[1.2, 1.8] \mu\text{m}$, ou on enregistre une transmission quasiment nulle.

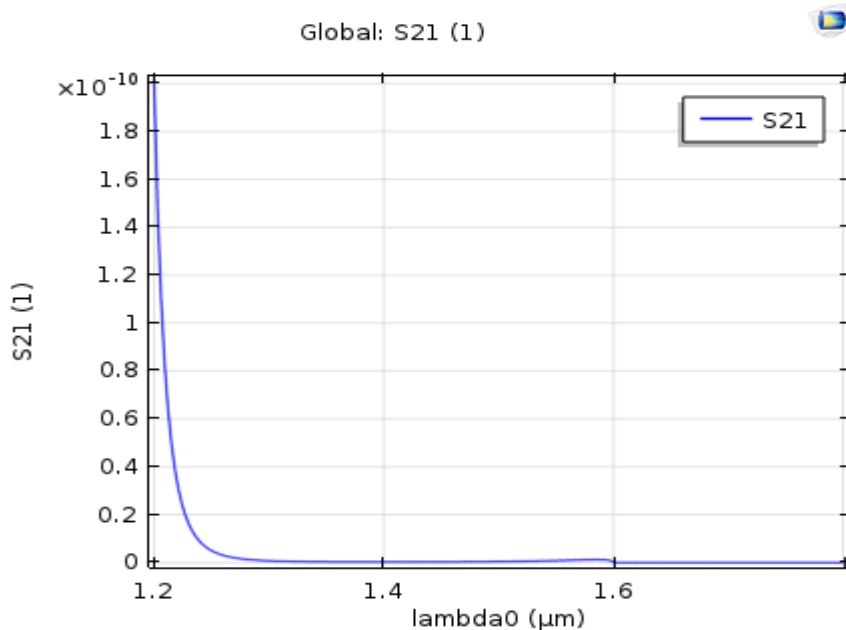


Figure III. 3 : Réponse spectrale de transmission d'un CP-2D déconnecté sans défaut à motif carré.

La figure III. 4 illustre la cartographie du champ électrique E_z le long de la structure. On remarque nettement l'absence du phénomène de guidage de l'onde électromagnétique.

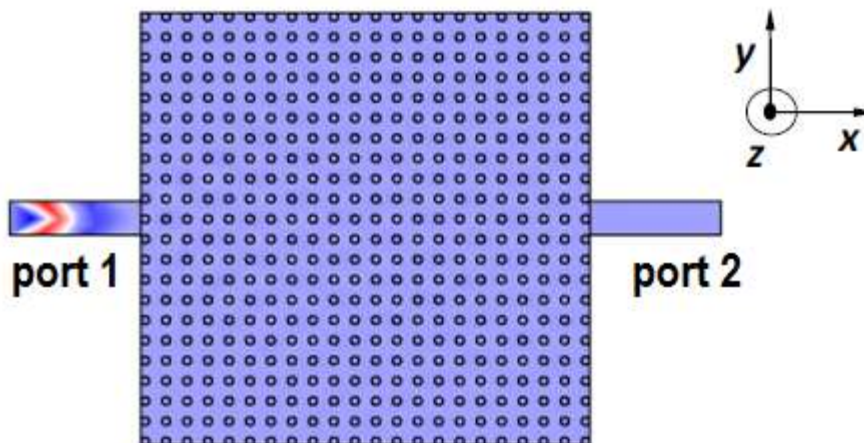


Figure III. 4 : Illustration de la propagation du champ électrique E_z dans un cristal photonique 2D carré sans défaut.

B. Maille triangulaire :

La figure III. 5 présente la structure d'un cristal photonique 2D déconnecté sans défaut à maille triangulaire.

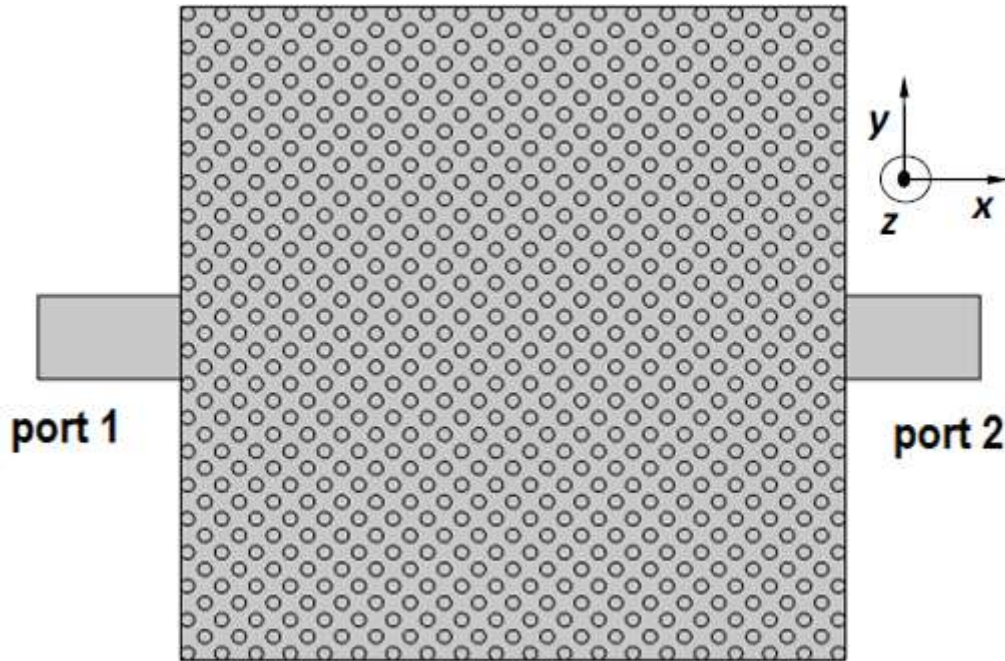


Figure III. 5: Représentation schématique d'un CP-2D déconnecté sans défaut à motif triangulaire ($a=0.6$, $k=0.2$).

La figure III. 6 présente la réponse spectrale en terme de transmission d'un CP-2D sans défaut à maille triangulaire en fonction de la longueur d'onde s'étalant sur la bande $[1.2, 1.8]$ μm . La quantité de transmission prélevée est totalement nulle. Ceci interprète l'absence d'acheminement de l'onde envoyée à l'entrée de la structure via un guide d'onde adiabatique.

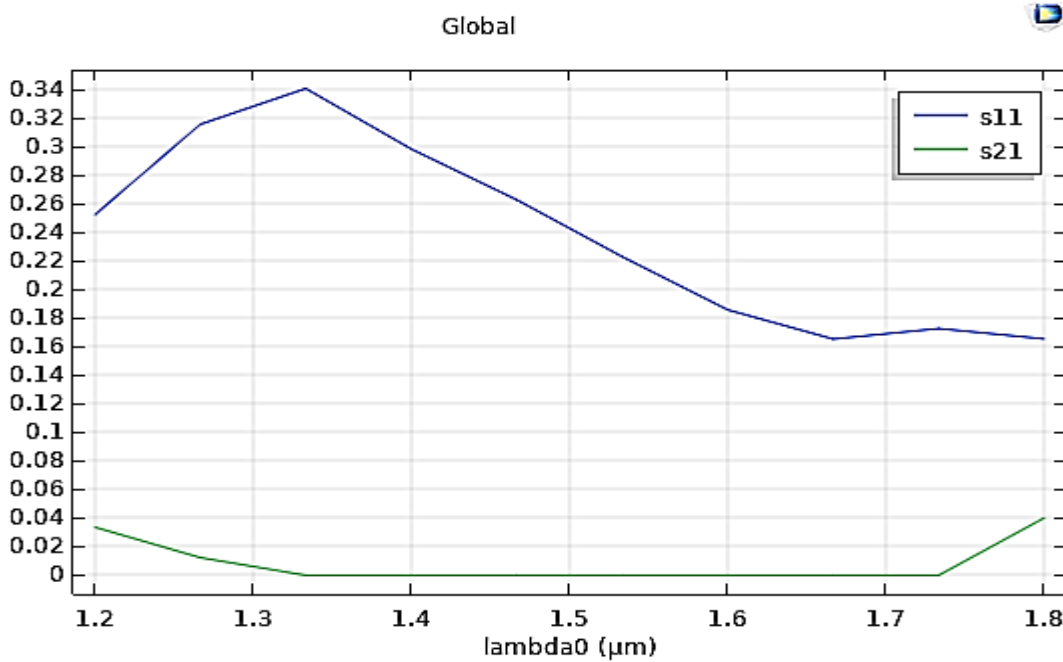


Figure III. 6: Réponse spectrale de transmission d'un CP-2D déconnecté sans défaut structure à motif triangulaire.

La figure III. 7 illustre la répartition du champ électrique E_z ou on observe nettement le retour de l'onde à l'entrée de la structure étudiée. Ceci justifie le résultat obtenu dans la figure III. 6.



Figure III. 7 : Répartition de champ électrique E_z dans un CP-2D sans défaut à motif triangulaire.

III. 3. 1. 2. Cristal photonique 2D avec défaut:

En introduisant un défaut linéaire (omission d'une ou plusieurs rangées de motifs élémentaires), il est possible de guider la lumière selon une direction choisie. La lumière va se propager le long de ce guide avec une fréquence appartenant à la bande interdite photonique du cristal.

Les défauts linéaires sont appelés aussi défauts étendus peuvent servir de guides d'ondes. Au sein de ces défauts, des modes ayant une fréquence appartenant à la BIP peuvent exister. Ces modes électromagnétiques associés aux guides d'onde sont des modes confinés et peuvent se propager le long de ce guide et avec les parois parfaitement réfléchives. De cette façon on peut dévier le chemin de la lumière [7]. Le phénomène de guidage est bien assuré dans ce cas-là.

A. Les guides d'ondes mono rangées carré à base d'un CP-2D à maille carrée:

La figure III. 8 montre la réponse spectrale en terme de transmission d'un guide d'onde à base d'un CP-2D déconnecté à maille carrée obtenu par l'émission d'une seule rangée.

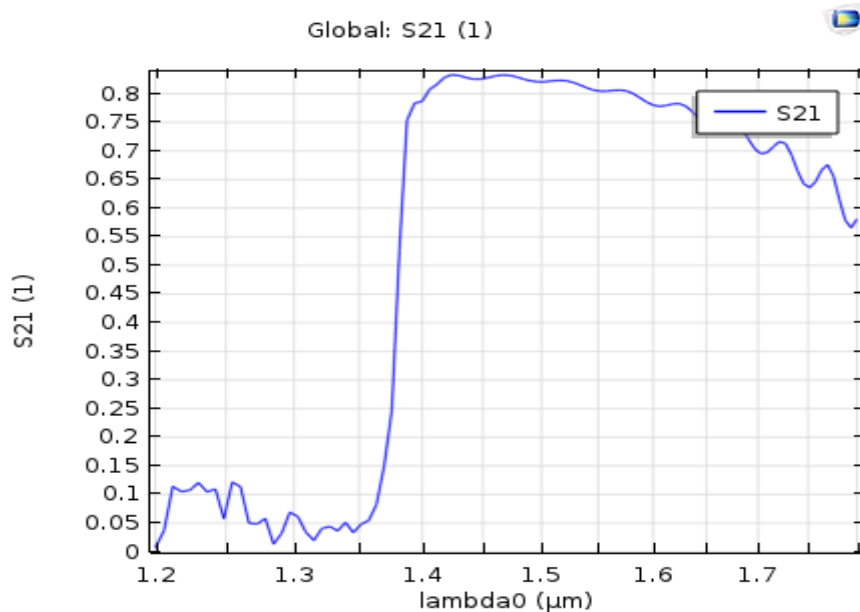


Figure III. 8: Réponse spectrale en terme de transmission d'un guide d'onde à base d'un CP-2D déconnecté.

D'après la figure III. 8, on remarque que la réponse spectrale admet un maximum dans la bande de longueurs d'ondes $[1.425-1.475]$ μm avec une puissance de 88%. Nous expliquons ces maximums par la présence du mode guidé sans pertes qui existe à ces longueurs d'ondes. On conclut que l'introduction du défaut étendu permet d'ouvrir une bande de transmises à l'intérieur du guide d'onde.

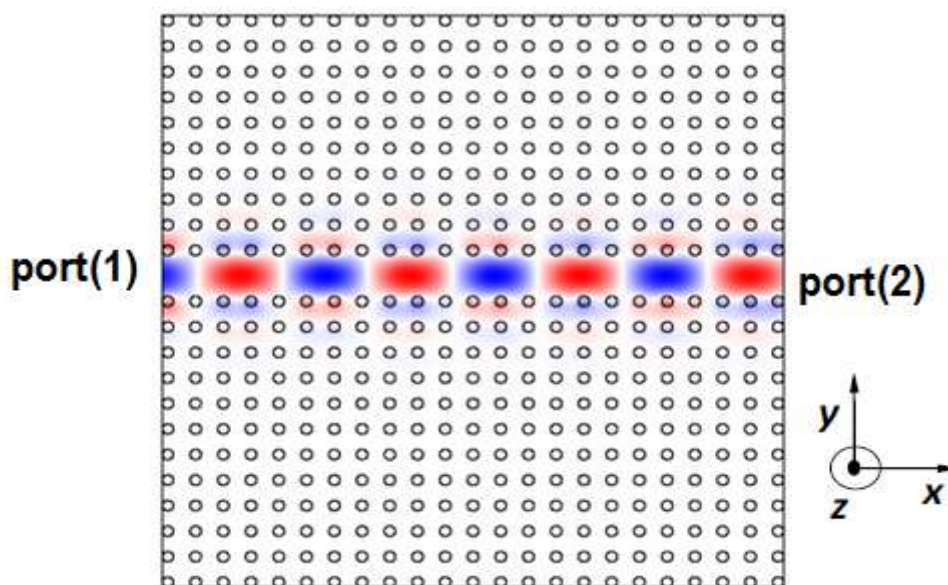


Figure III. 9: Répartition de champ électrique E_z d'un guide d'onde mono rangée à base d'un CP-2D déconnecté à maille carré.

La figure III. 9 illustre la répartition du champ E_z le long de la structure ou on observe clairement la propagation de l'onde électromagnétique injectée à l'entrée de la structure. La lumière suit le canal ou bien le défaut linéique formé par une seule rangée.

La figure III. 10 illustre la cartographie du champ E_z la long de la structure étudiée précédemment à la longueur d'onde $1.31 \mu\text{m}$.

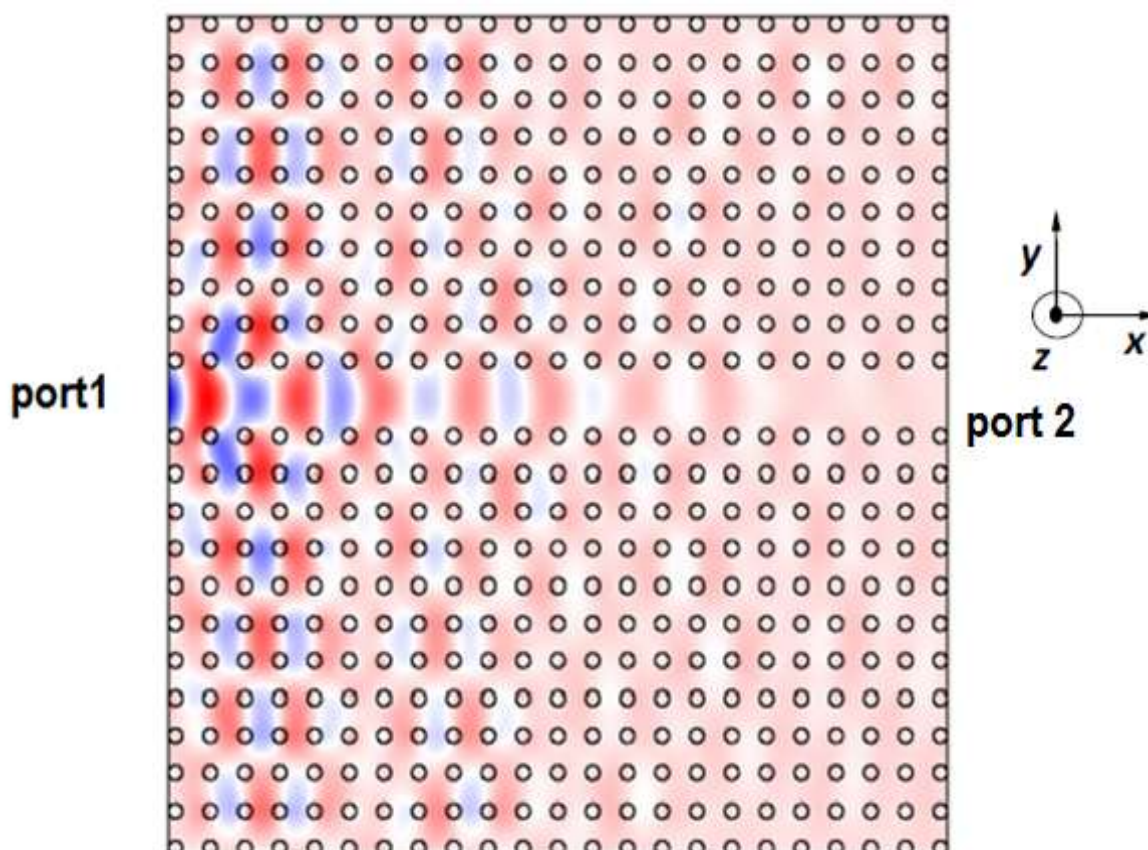


Figure III. 10 : Répartition de champ électrique E_z d'un guide d'onde à base d'un CP-2D déconnecté à maille carrée à $1.31 \mu\text{m}$.

Selon la figure III. 10, on observe la dispersion de la lumière dans l'air et l'absence du phénomène de guidage à la longueur d'onde $1.31 \mu\text{m}$. Ceci est conforme au résultat obtenu dans la figure III. 8.

La figure III. 11 illustre la répartition du champ E_z la long de la structure on observe clairement la propagation de l'onde électromagnétique injectée à l'entrée de la structure. La lumière suit le canal ou bien le défaut linéique formé par une seule rangée à la longueur d'onde $1.55 \mu\text{m}$.

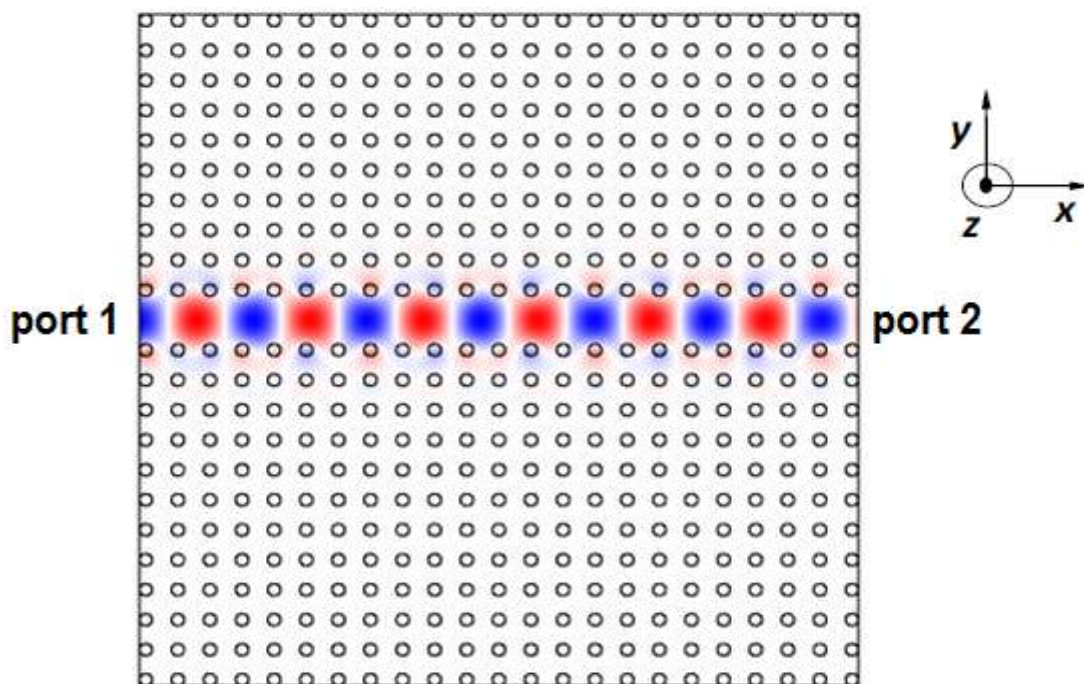


Figure III. 11: Répartition de champ électrique E_z d'un guide d'onde mono rangée à base d'un CP-2D déconnecté à maille carrée à $1.55\mu\text{m}$.

Selon la figure III. 11, on remarque bien le phénomène de guidage de la lumière envoyée à l'entrée de la structure. Ce résultat est confirmé avec celui de la figure III. 8.

B. Les guides d'ondes à trois rangées omises à base d'un CP-2D déconnecté à maille triangulaire:

La figure III. 12 représente la structure d'un guide d'onde à trois rangées omises à base d'un CP-2D déconnecté à maille triangulaire.

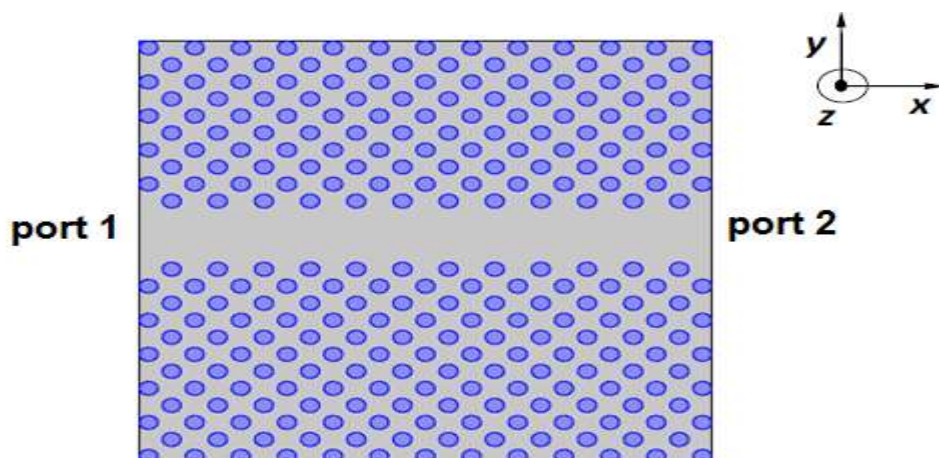


Figure III. 12 : Représentation schématique d'un guide d'onde $W_3^K A$ à base d'un CP-2D déconnecté à maille triangulaire.

La figure III. 13 illustre la réponse spectrale en terme de transmission d'un guide d'onde à base d'un CP-2D déconnecté à maille triangulaire. On remarque que l'introduction du défaut obtenu par la suppression de trois rangées le long de la structure engendre l'ouverture d'une bande de transmission qui plafonne le 81% à la longueur d'onde 1.225 μm .

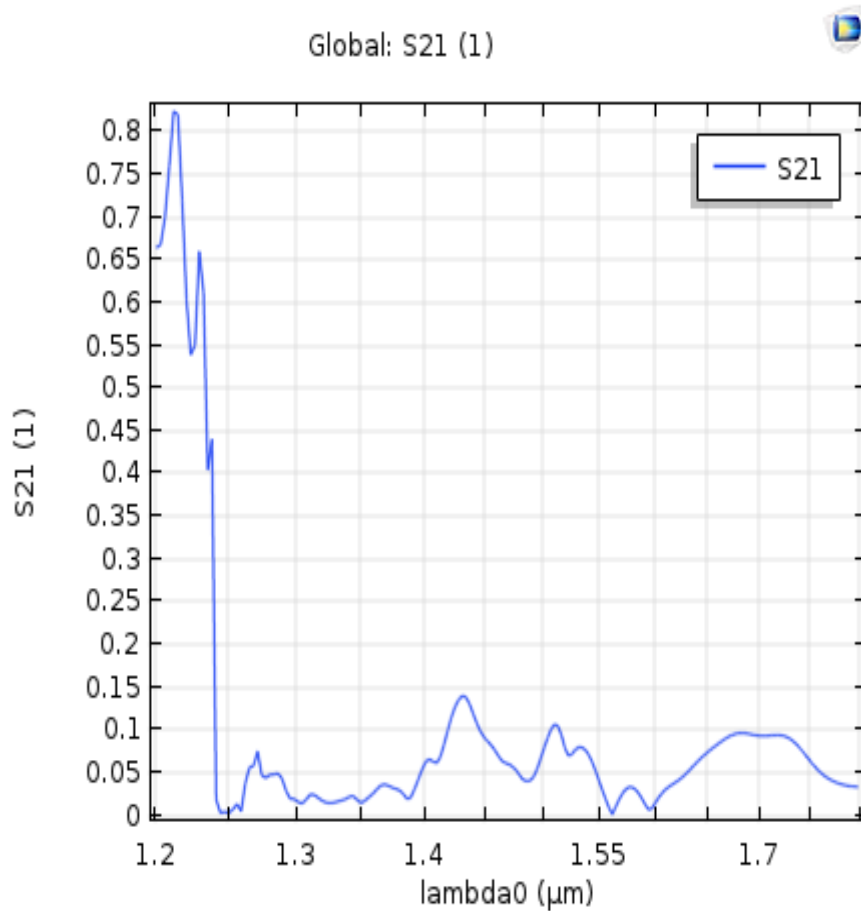


Figure III. 13: Réponse spectrale en terme de transmission un guide à base d'un CP-2D déconnecté à maille triangulaire.

La figure III. 14 illustre la représentation du champ E_z à la longueur d'onde 1.225 μm d'un guide d'onde $W_3^K A$ à base d'un CP-2D déconnecté à maille triangulaire.

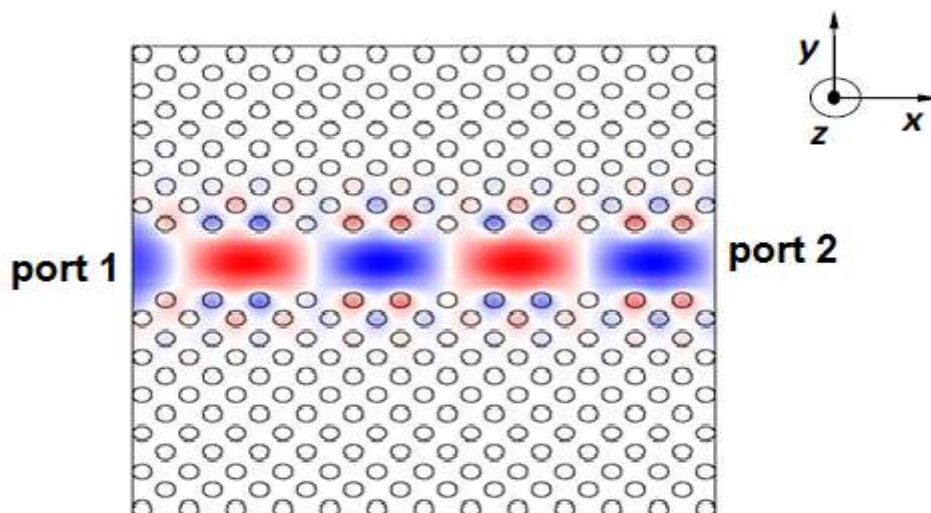


Figure III. 14: Répartition de champ électrique d'un guide d'onde $W_3^K A$ à base d'un CP-2D déconnecté à maille triangulaire.

Selon cette figure, on remarque nettement le parcours de l'onde à travers le canal de transmission.

III. 3. 2. Filtre en anneau:

La figure III. 15 illustre la topologie d'un filtre à base des CP-2D à maille carrée constitué d'un guide $W_1^k A$ et une cavité hexagonale sous forme d'un anneau.

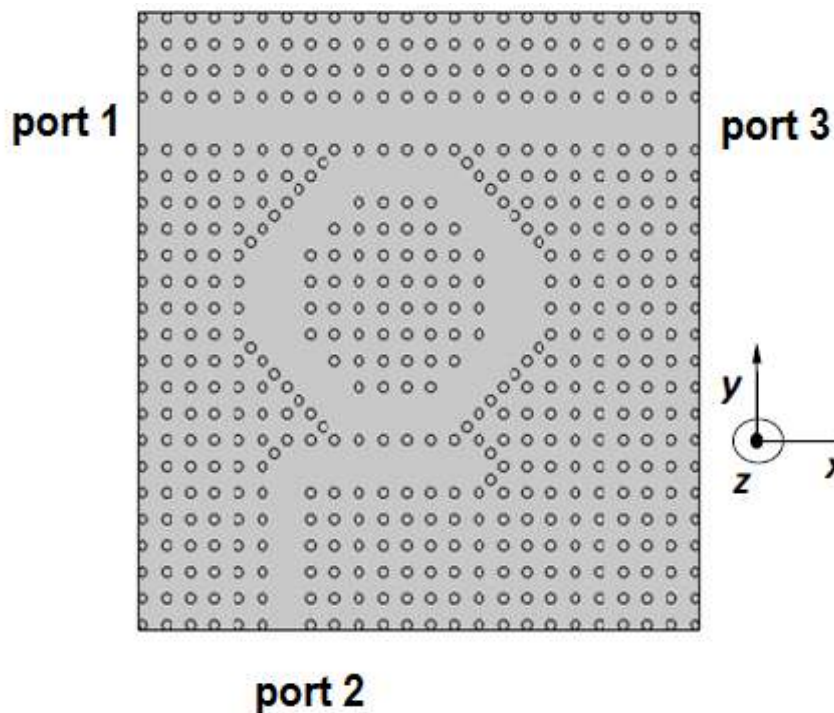


Figure III. 15 : Représentation schématique d'un filtre en anneau à motif carré ($a=0.48\mu\text{m}$, $k=0.19$).

La figure III. 16 illustre la réponse spectrale en terme de transmission du filtre en anneau à base d'un CP-2D déconnecté à maille carrée.

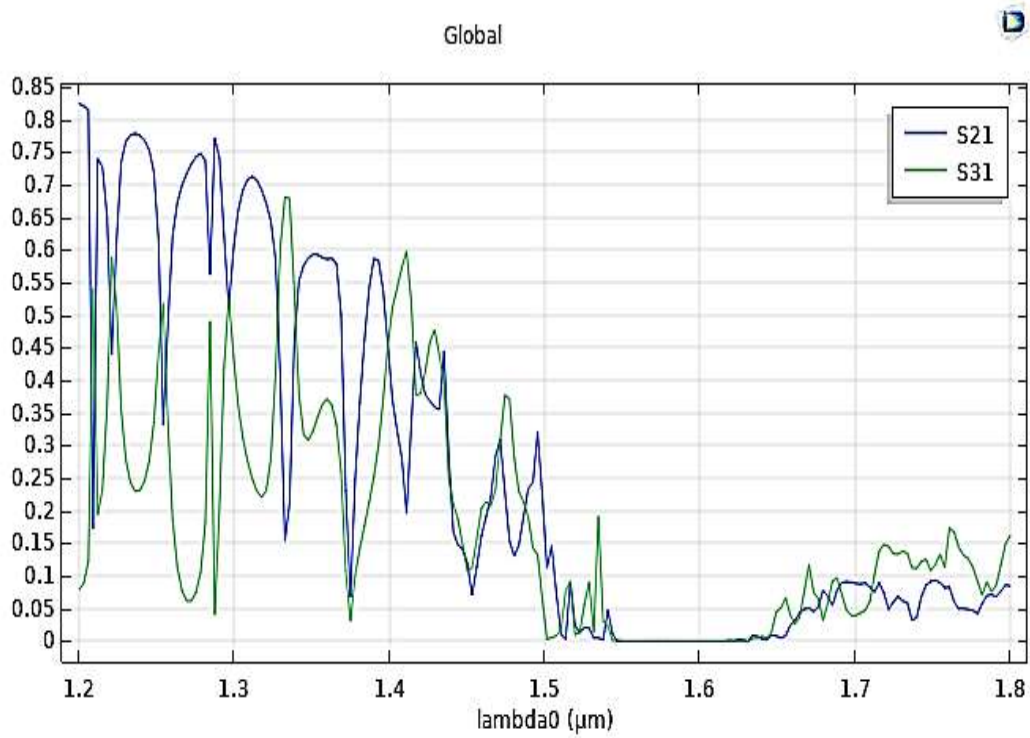


Figure III. 16: Spectre de transmission du filtre en anneau proposé.

Selon la figure III. 16, on remarque qu'il y a un transfert de lumière vers le port 2 de la structure. A la longueur d'onde $1.334 \mu\text{m}$, on enregistre une quantité de transmission de l'onde 71% dans le port 2 et 22% dans le port 3.

La figure III. 17 illustre la répartition du champ électrique E_z du filtre en anneau proposé. Selon cette figure, on remarque le phénomène du dropping de l'onde issue du guide mono-rangée vers le port 2 de la structure par l'intermédiaire d'un anneau hexagonal.

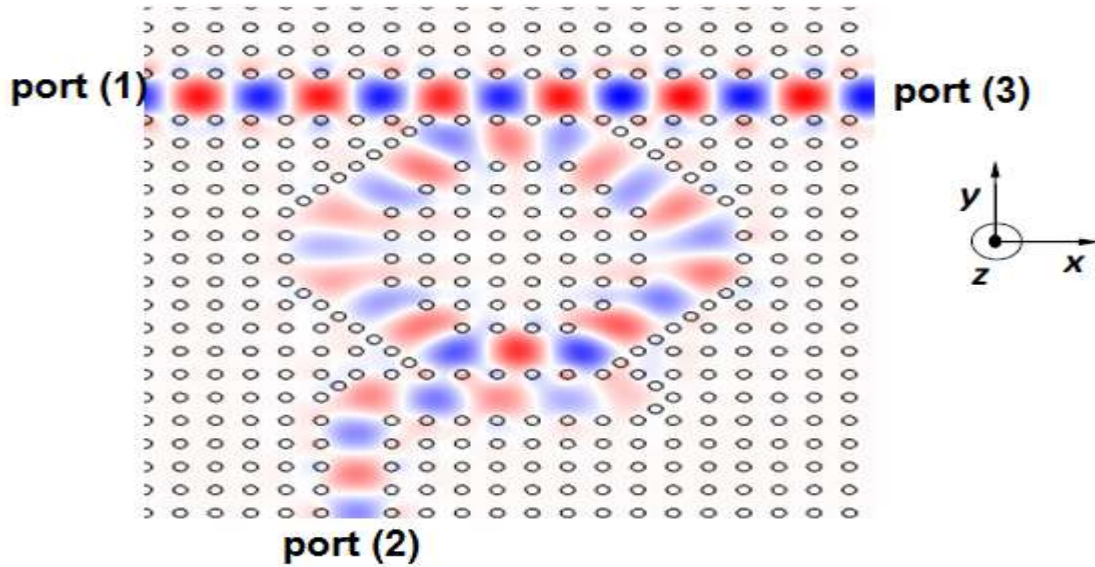


Figure III. 17 : Répartition de champ électrique E_z du filtre en anneau excité en mode TE .

III. 3. 3. Les démultiplexeurs en longueur d'onde :

Notre approche est de concevoir un démultiplexeur en longueur d'onde (WDM : Wavelength Division Démultiplexing) de taille très réduite, versatile et compact à la longueur d'onde $\lambda=1.55\mu\text{m}$ qui peut être adapté aux réseaux de télécommunications optiques. Ce démultiplexeur est basé sur l'utilisation des cristaux photoniques à défaut linéaire. Un cristal photonique avec défaut linéaire fait apparaître des modes supplémentaires qui se propagent à l'intérieur de la Bande Interdite Photonique (BIP) du cristal parfait.

III. 3. 3. 1 Un démultiplexeur à deux anneaux à base des cristaux photoniques 2D :

La figure III. 18 illustre la topologie d'un démultiplexeur optique à base des CP-2D à maille carré formé par deux anneaux hexagonal.

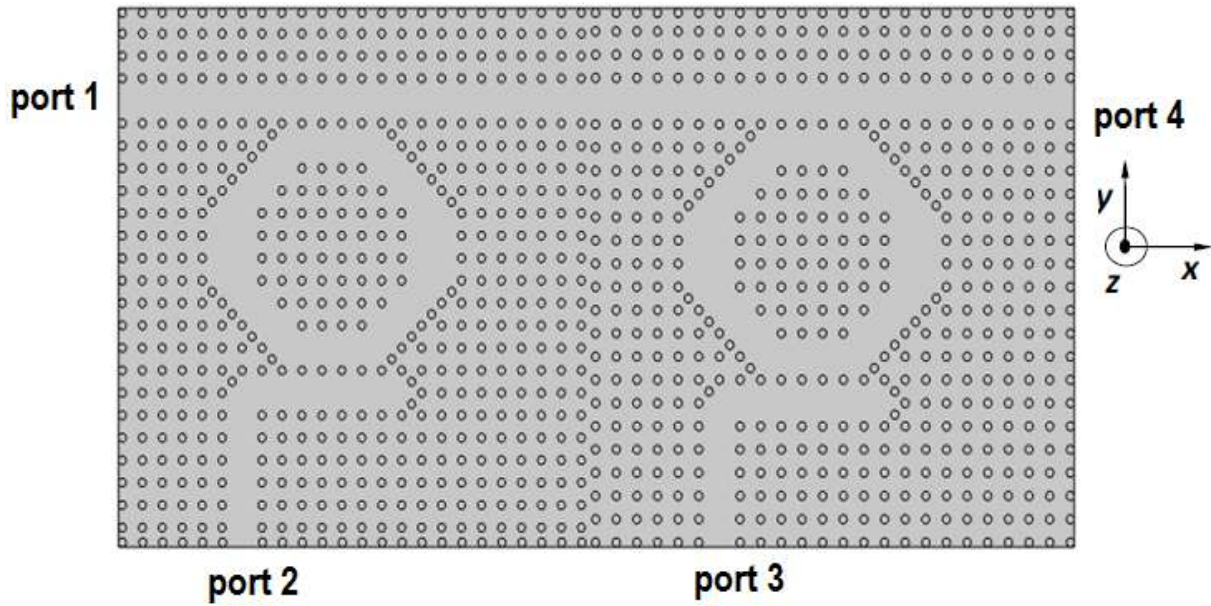


Figure III. 18 : Représentation schématique d'un démultiplexeur proposé.

La figure III. 19 illustre la réponse spectral en terme de transmission d'un démultiplexeur en longueur d'onde à base d'un CP-2D déconnecté à maille carré ayant deux anneaux sous forme hexagonale.

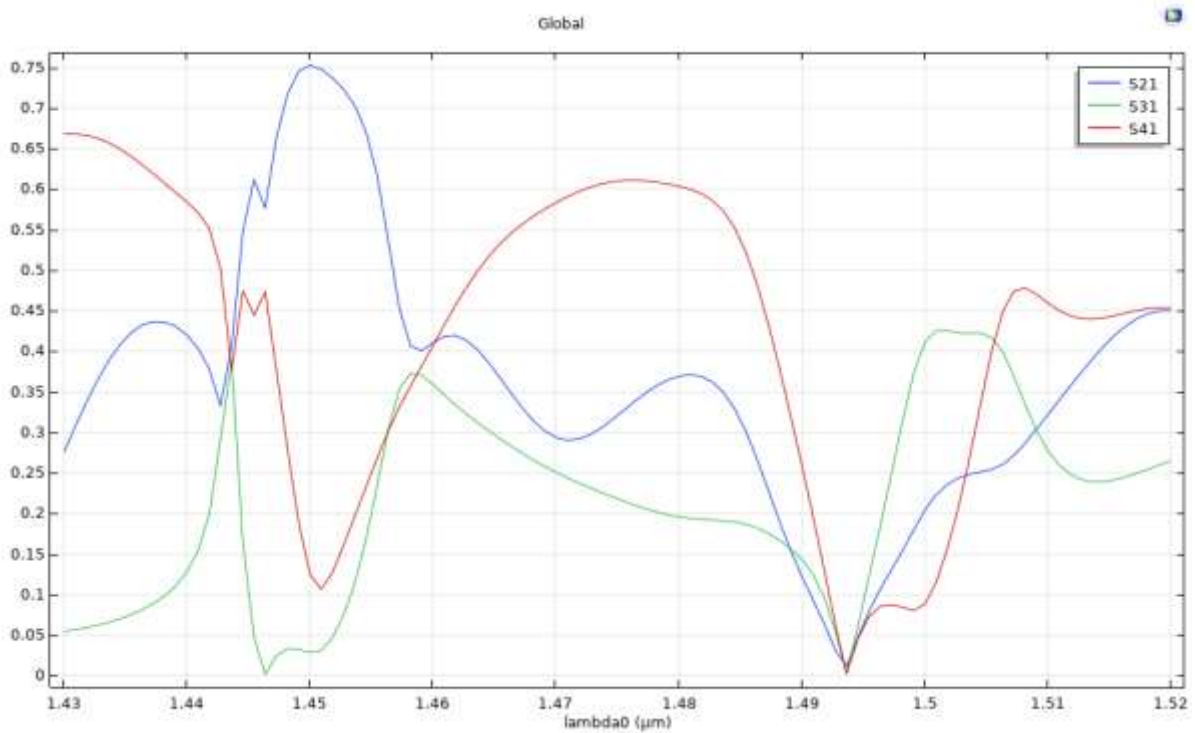


Figure III. 19 : Spectre de transmission du démultiplexeur proposé.

Selon la figure III. 19, on remarque que la transmission est maximale à la longueur d'onde $1.45\mu\text{m}$ qui est de l'ordre 75% dans le port 2. Tandis que, la transmission est faible dans le deux port 3 et 4 respectivement égale à 2.5% et 10%. Ce résultat interprète que dans la longueur d'onde $1.45\mu\text{m}$ l'onde injecte à l'entrée de la structure via le port 1 suit le canal de transmission pour passer directement au port de sortie № 2 par l'inter médiane du premier anneau. Les deux anneaux ont vu rôle de séparer les longueurs d'onde d'où la notion de démultiplexage en longueur d'onde.

La figure III. 20, illustre la répartition du champ E_z à travers un démux en longueur d'onde pour deux longueurs d'ondes différentes à savoir $\lambda=1.45\mu\text{m}$ et $\lambda=1.50\mu\text{m}$.

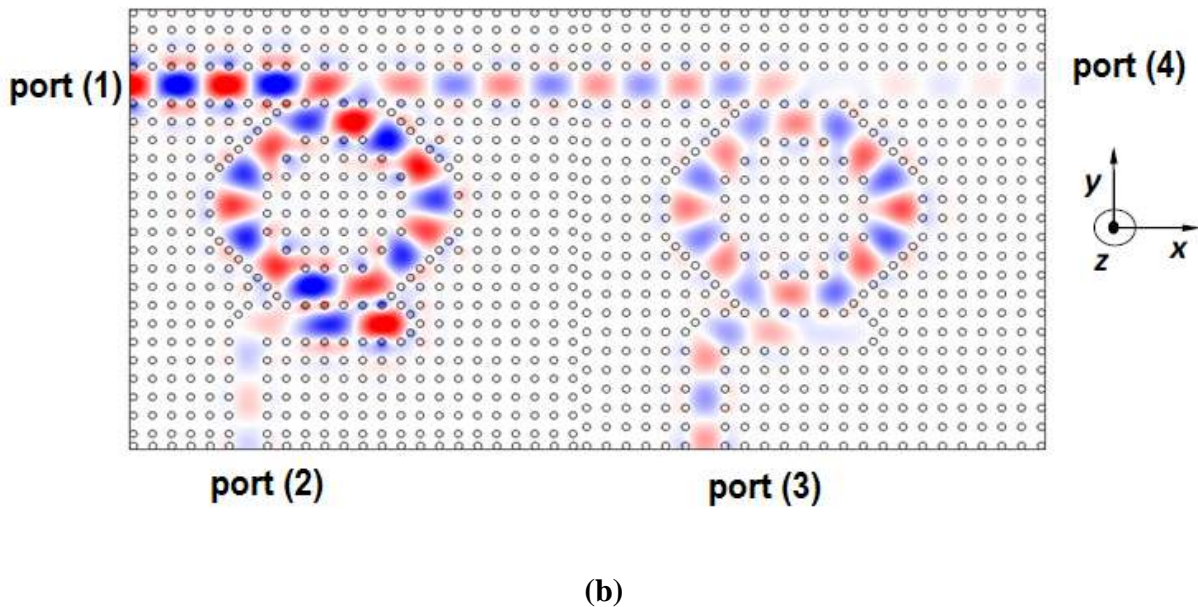
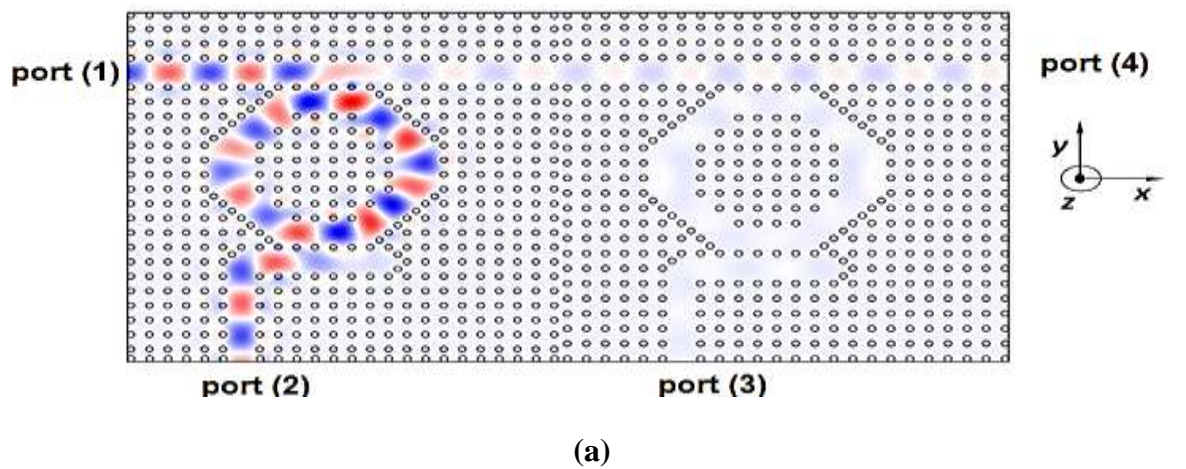


Figure III. 20 : Répartition de champ électrique E_z d'un démux à deux anneaux hexagonales

: (a) $\lambda_1 = 1.45 \mu\text{m}$, (b) $\lambda_2 = 1.50 \mu\text{m}$.

Pour améliorer le performance de démultiplexeur optique à deux anneaux à base de CPs-2D déconnecté à maille carré, nous avons cherché à optimiser notre structure proposée de telle manière de séparer l'onde électromagnétique à la longueur d'onde $1.55 \mu\text{m}$ très utilisée dans les systèmes de transmission optique à très haut débit.

La figure III. 21 illustre la structure d'un filtre en anneau optimisée.

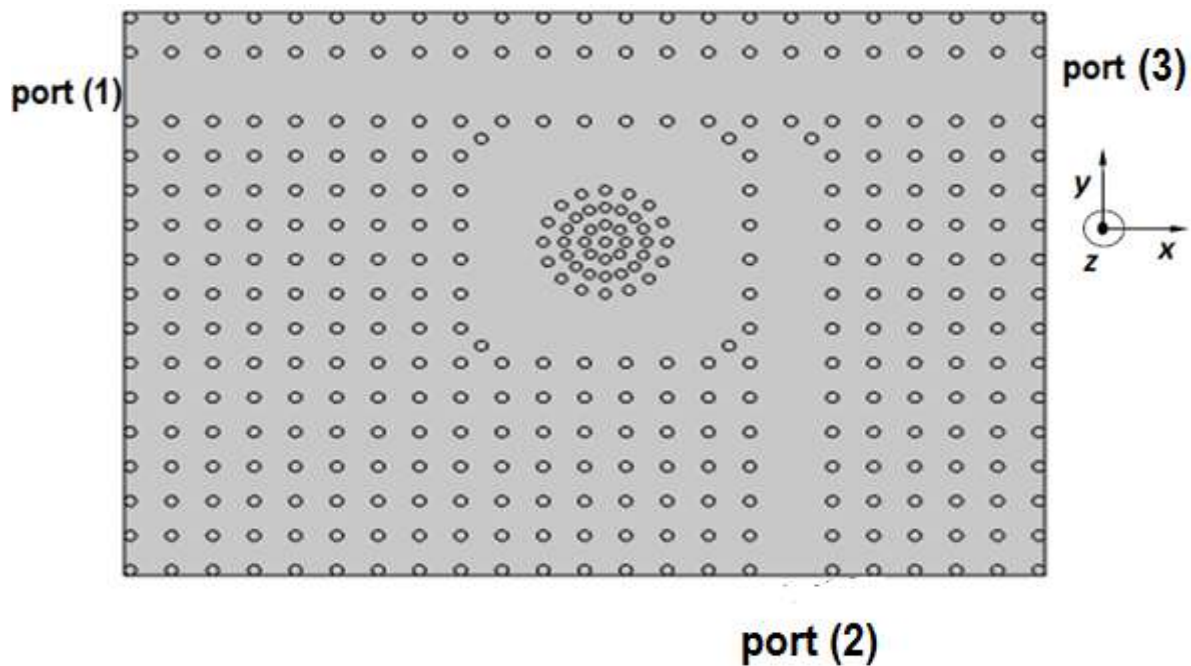


Figure III. 21: Structure proposé pour le démultiplexeur à 2 anneaux.

La figure III. 22 présente le spectre de transmission du filtre en longueur d'onde optimisé.

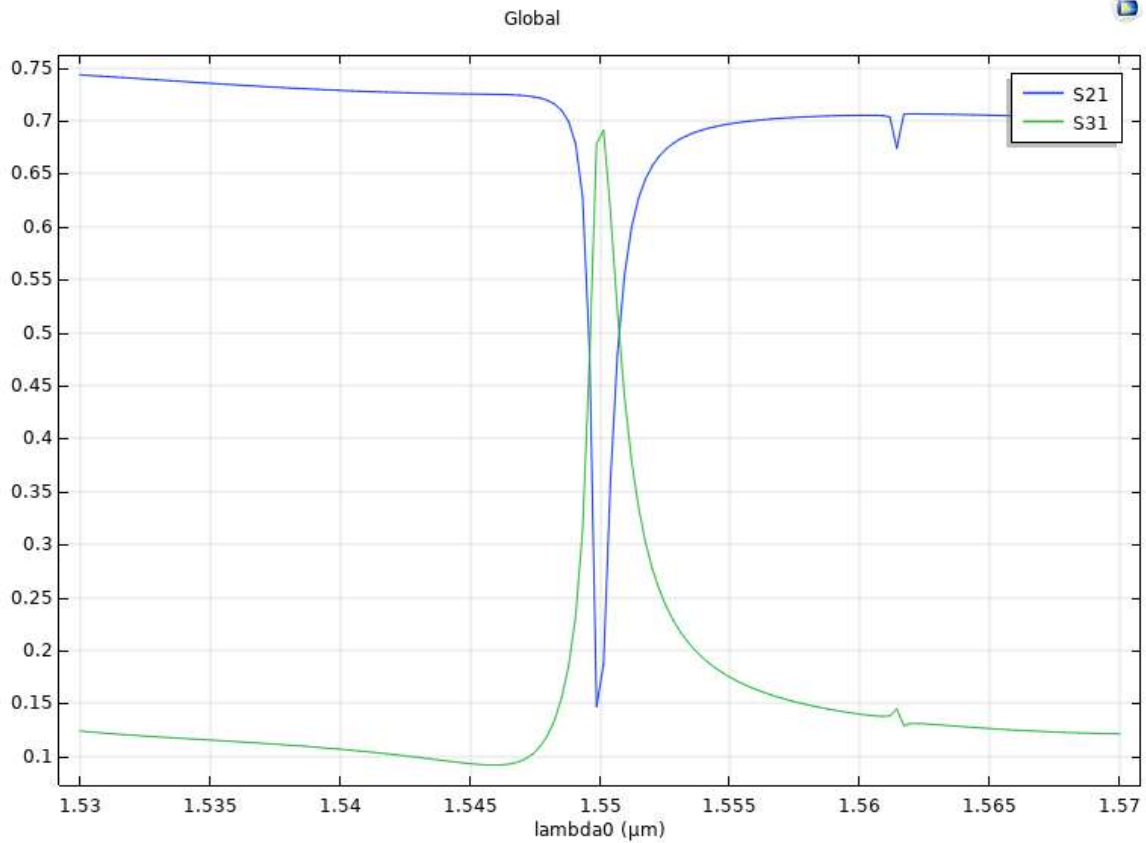


Figure III. 22 : Spectre de transmission du filtre en anneau avec $\lambda = 1.55\mu\text{m}$.

Selon cette figure, on démontre l'efficacité de notre structure en terme de sélectivité et de transmission qui est de l'onde de 70% pour le port 3 et 15% pour le port 2 à la longueur d'onde $1.55\mu\text{m}$.

La figure III. 23 illustre la répartition d'un champ électrique E_z à l'intérieur du filtre proposé.

Selon cette figure, on remarque que l'onde injectée à l'entrée de la structure a subi un transfert d'énergie vers le port de sortie 3, d'où l'apparition du phénomène appelé « dropping ».

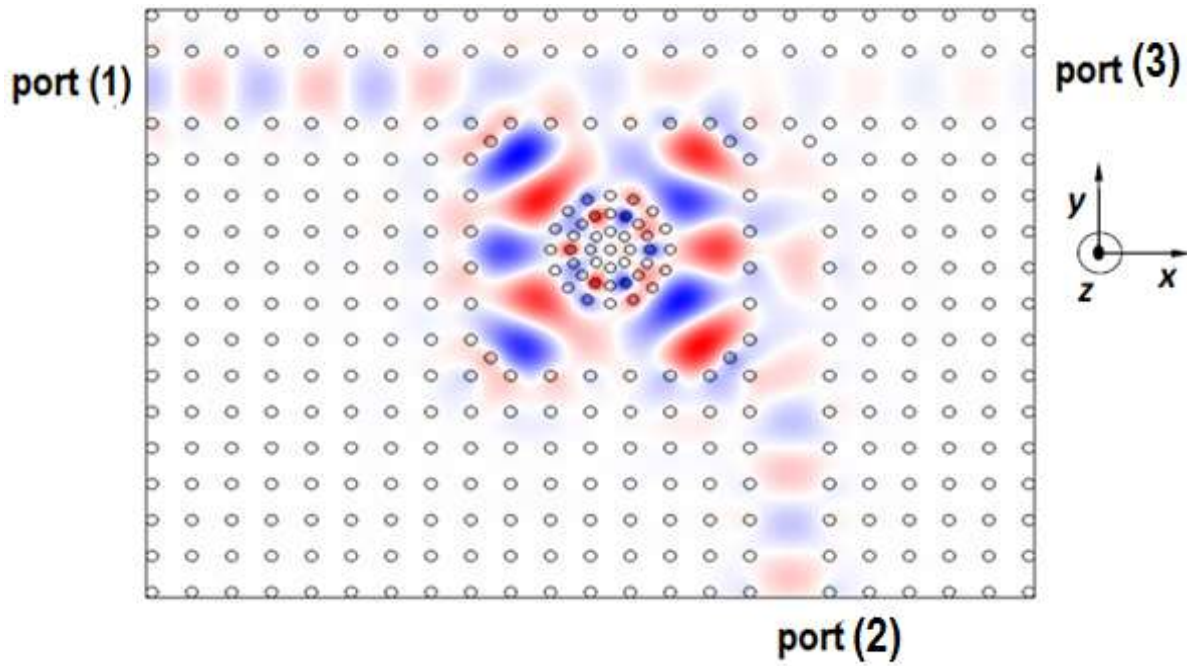


Figure III. 23 : Répartition de champ électrique E_z dans un filtre en anneau proposé.

En se basant sur les résultats obtenus précédemment, la figure III. 24 illustre la topologie finale optimisée d'un démultiplexeur optique à deux anneaux.

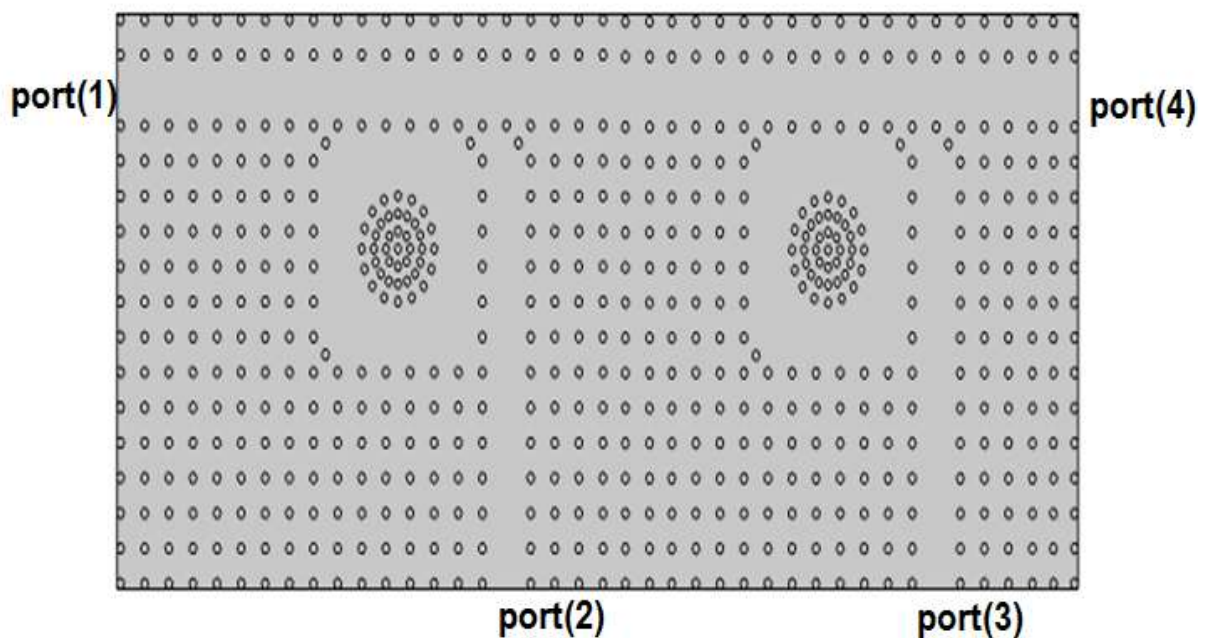


Figure III. 24 : Structure schématique du démultiplexeur à base de CP-2D.

La figure III. 25 illustre les réponse spectrale en terme de transmission de la structure présentée dans la figure III. 24.

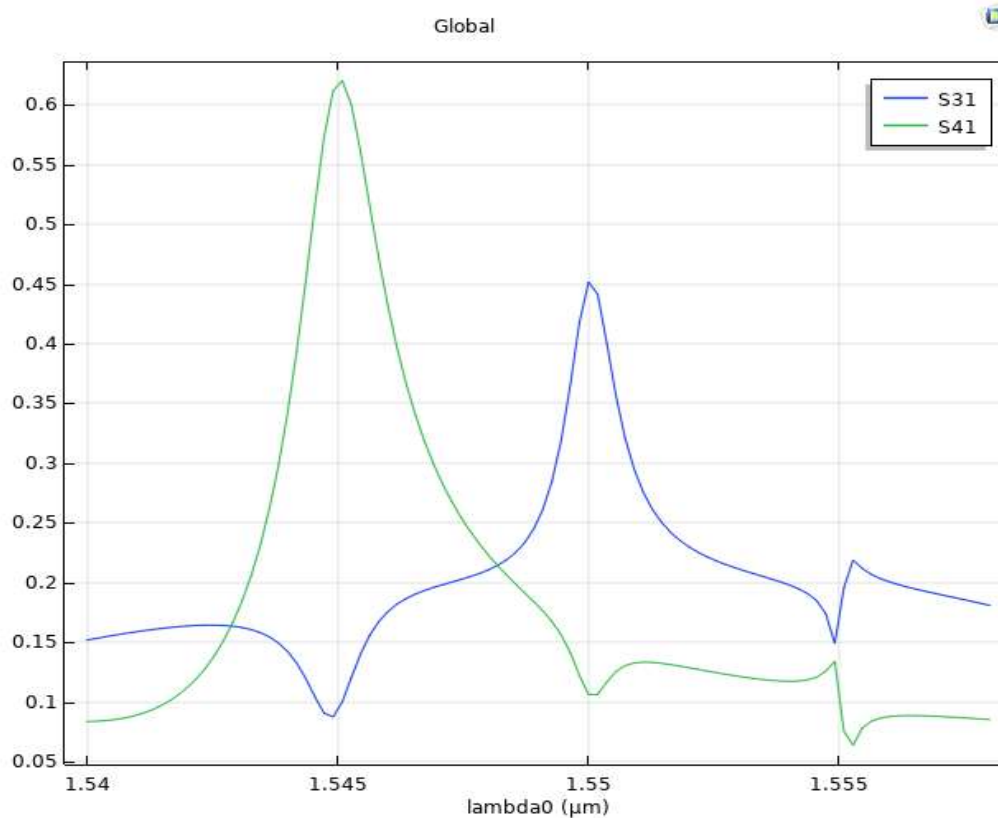
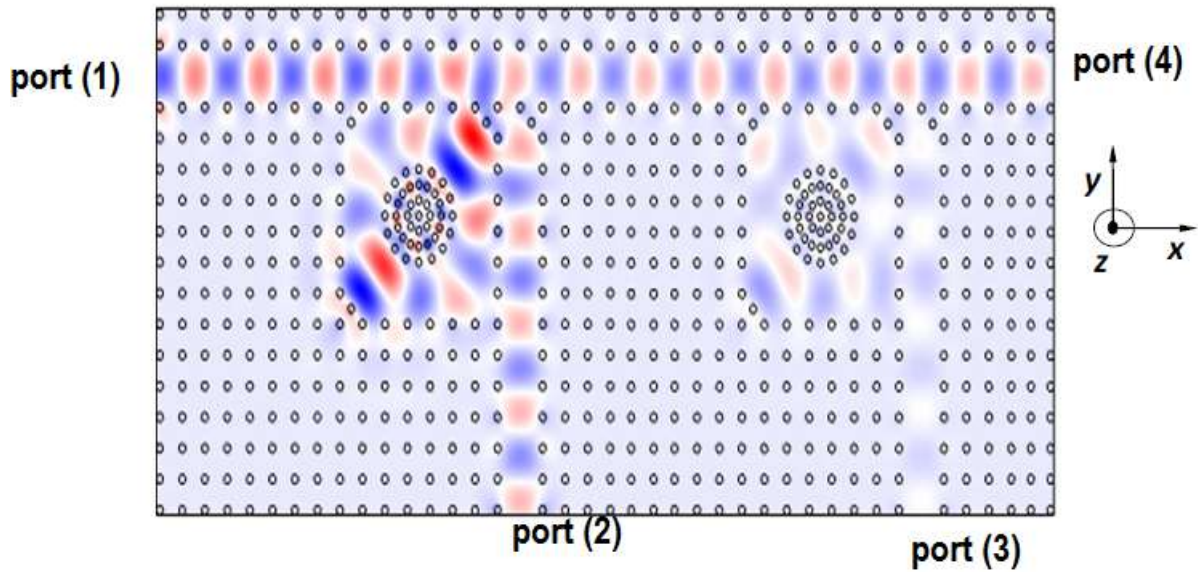
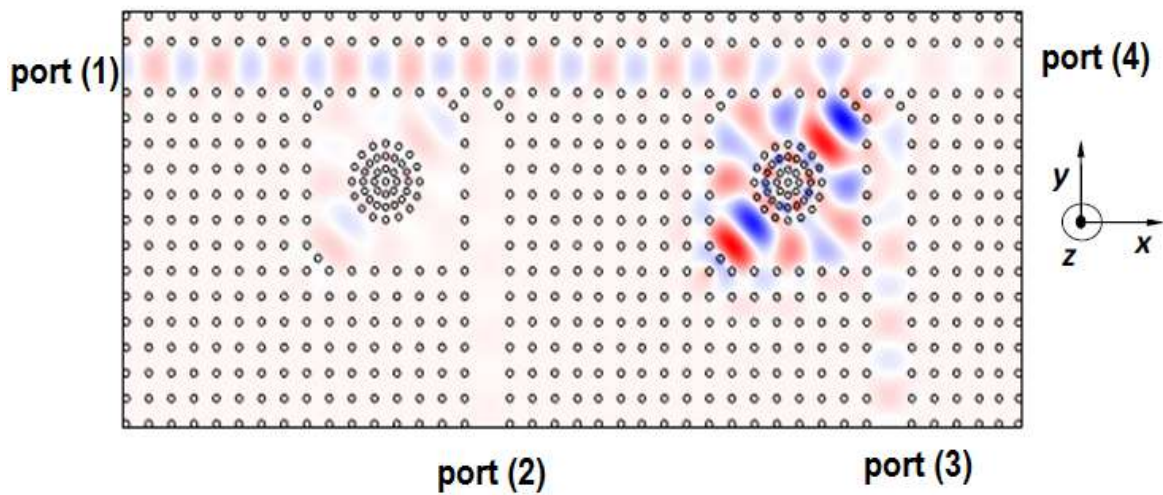


Figure III. 25 : Spectre de transmission du démultiplexeur proposé.

Selon cette figure, on remarque que l'objectif tracé au départ a été bien achevé étant donné que notre structure de démultiplexeur présente une transmission maximale de l'ordre de 62% à la longueur d'onde 1.545 μm pour le port 4 et une quantité de 45% à la longueur d'onde 1.5 μm pour le port 3. On conclut donc que notre démultiplexeur optique sépare nettement les ondes ultra-courtes aux longueurs d'onde 1.54 μm et 1.55 μm.



(a)



(b)

Figure III. 26 : Répartition de champ électrique E_z dans un démultiplexeur : (a) $\lambda_1 = 1.545 \mu\text{m}$, (b) $\lambda_2 = 1.55 \mu\text{m}$.

La figure III. 27 montre la structure proposée d'un démultiplexeur en longueur d'onde formé par quatre anneaux à base des CP-2D déconnecté à maille carrée.

III. 3. 3. 2. Un démultiplexeur à quatre anneaux à base des cristaux photoniques 2D:

La figure III. 27 illustre la topologie d'un démultiplexeur optique à base d'un CP-2D à maille carrée formé par quatre anneaux hexagonaux.

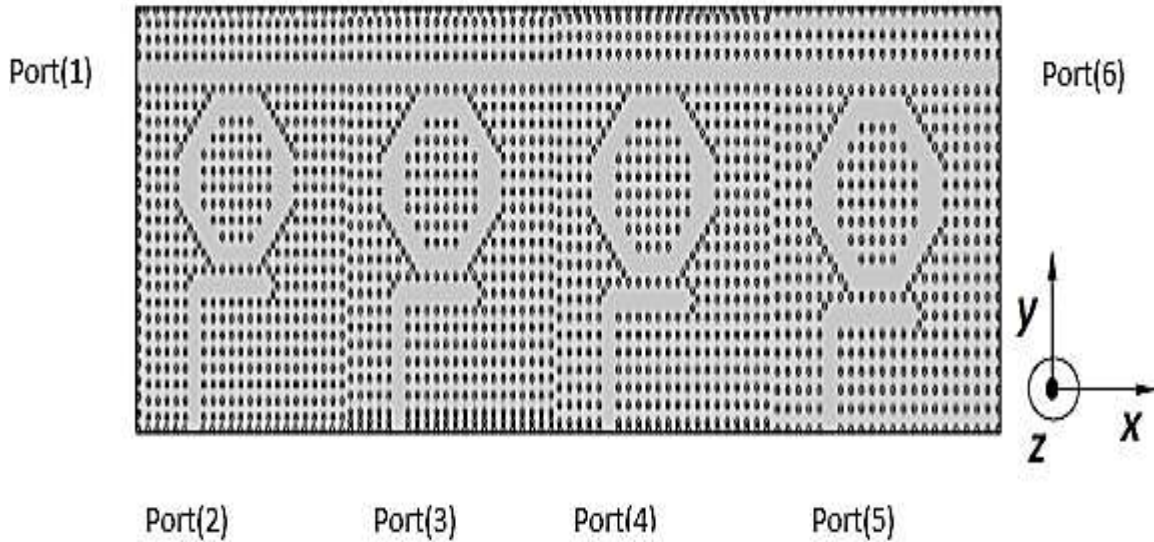


Figure III. 27 : Structure schématique du démultiplexeur à base de CPS.

La figure III. 28 illustre la réponse spectrale du démultiplexeur optique en fonction de la largeur d'onde s'étalant sur la gamme $[1.42, 1.68] \mu\text{m}$. Selon cette figure on remarque que notre structure proposée assure la séparation des ondes ultra-courtes pour des longueurs d'ondes bien particulières. Par exemple, à la longueur d'onde $1.45 \mu\text{m}$, la quantité de transmission enregistrée est de 75% pour port 2, 10% pour le port 6, 7% pour le port 4, 5% pour le port 3 et 0% pour le port 5.

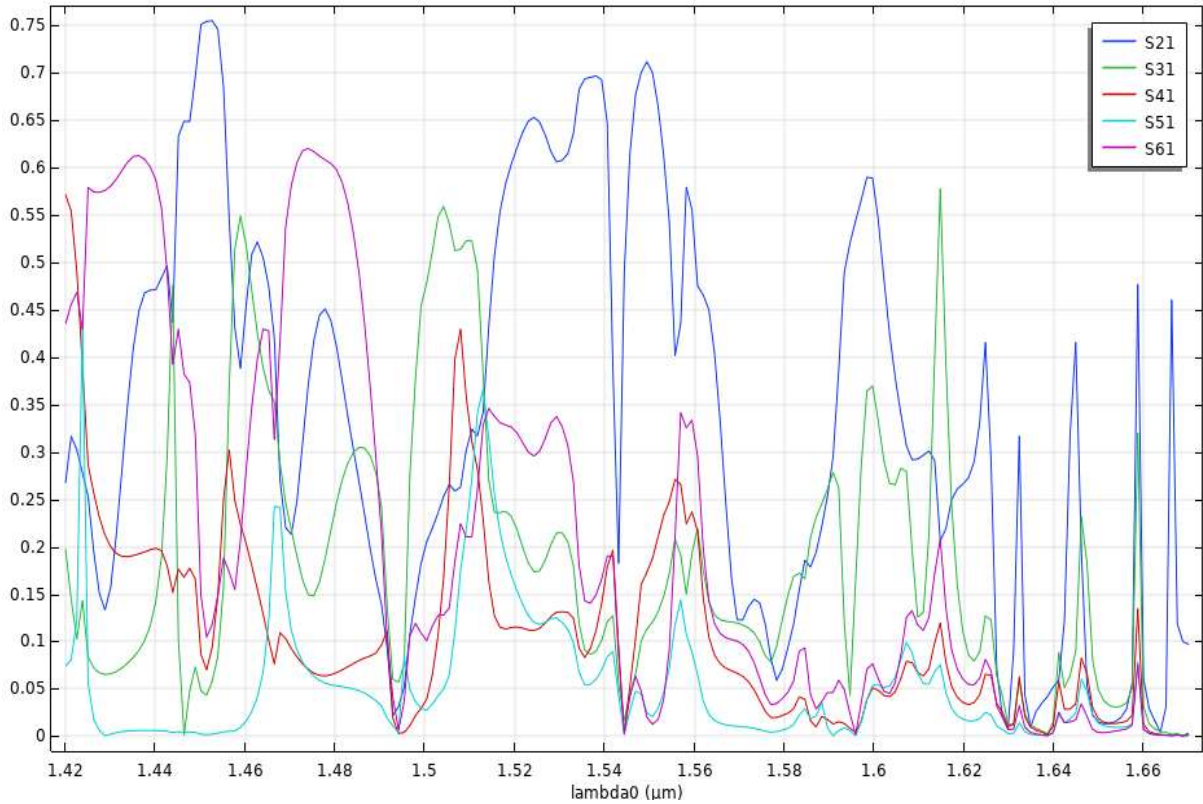
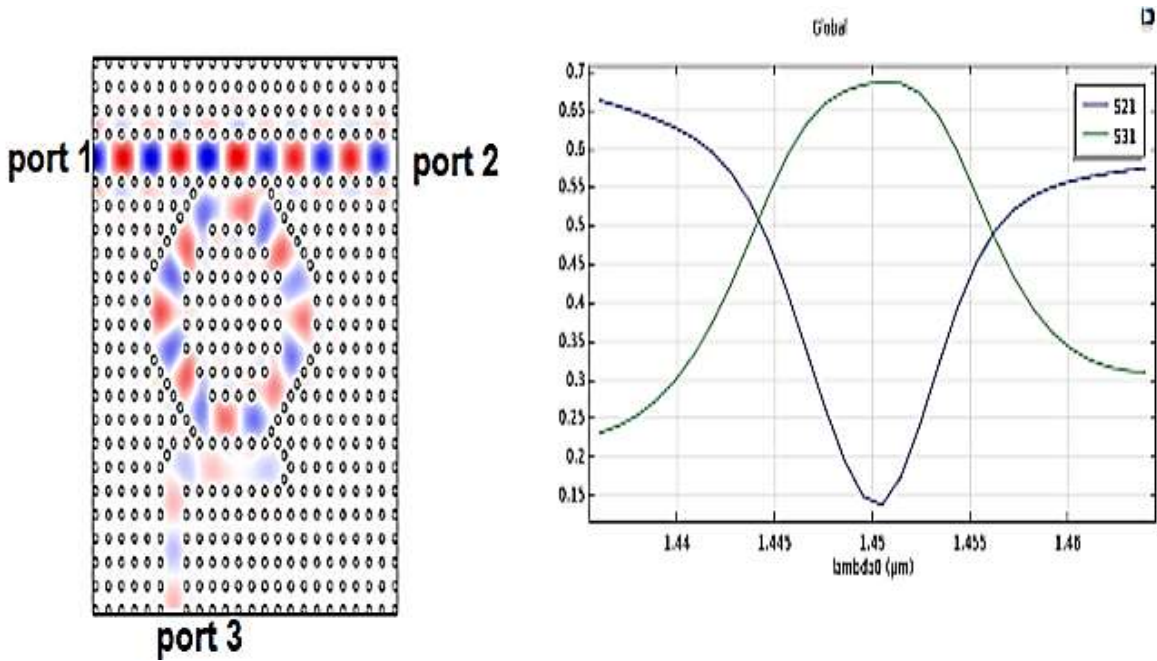
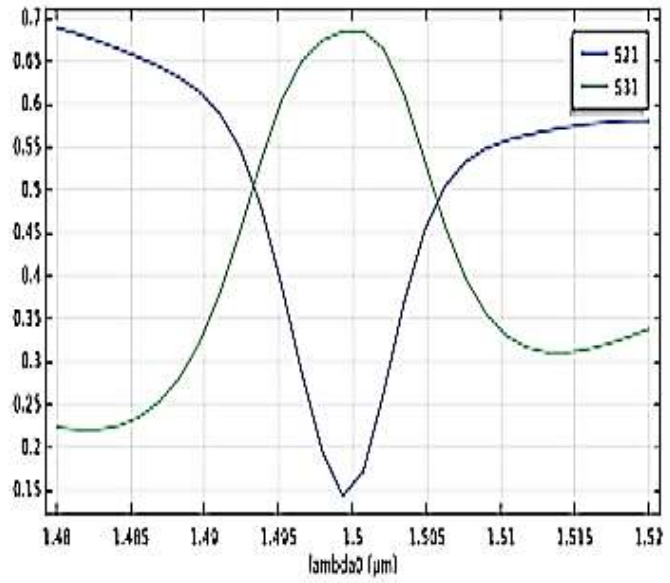
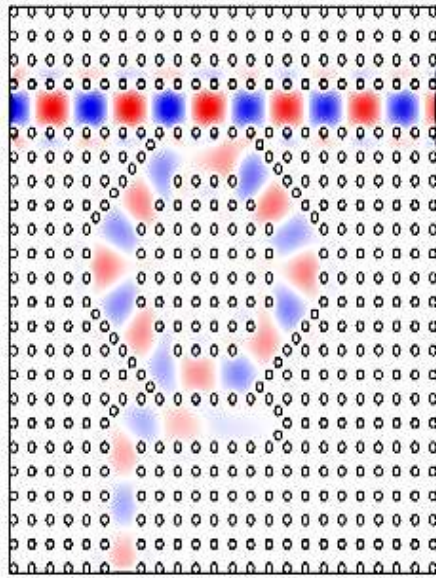


Figure III. 28: Spectre de transmission du démultiplexeur proposé.

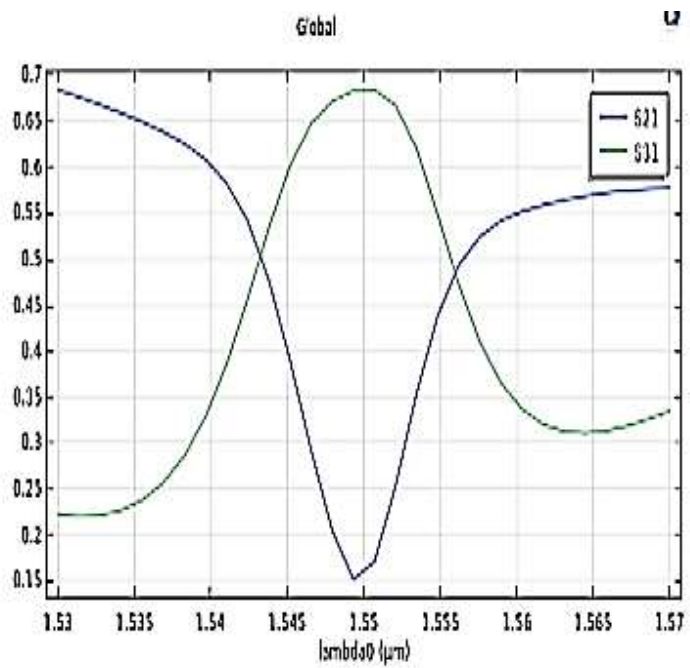
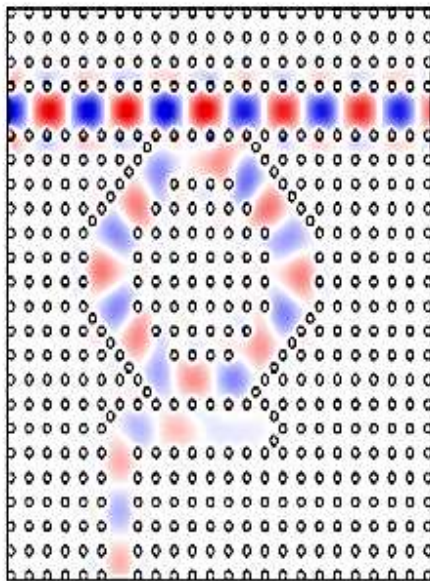
La figure III. 29 présente la répartition du champ électrique E_z à l'intérieur du démultiplexeur proposé pour la longueur d'onde $1.45 \mu\text{m}$, $1.50 \mu\text{m}$, $1.55 \mu\text{m}$, $1.65 \mu\text{m}$.



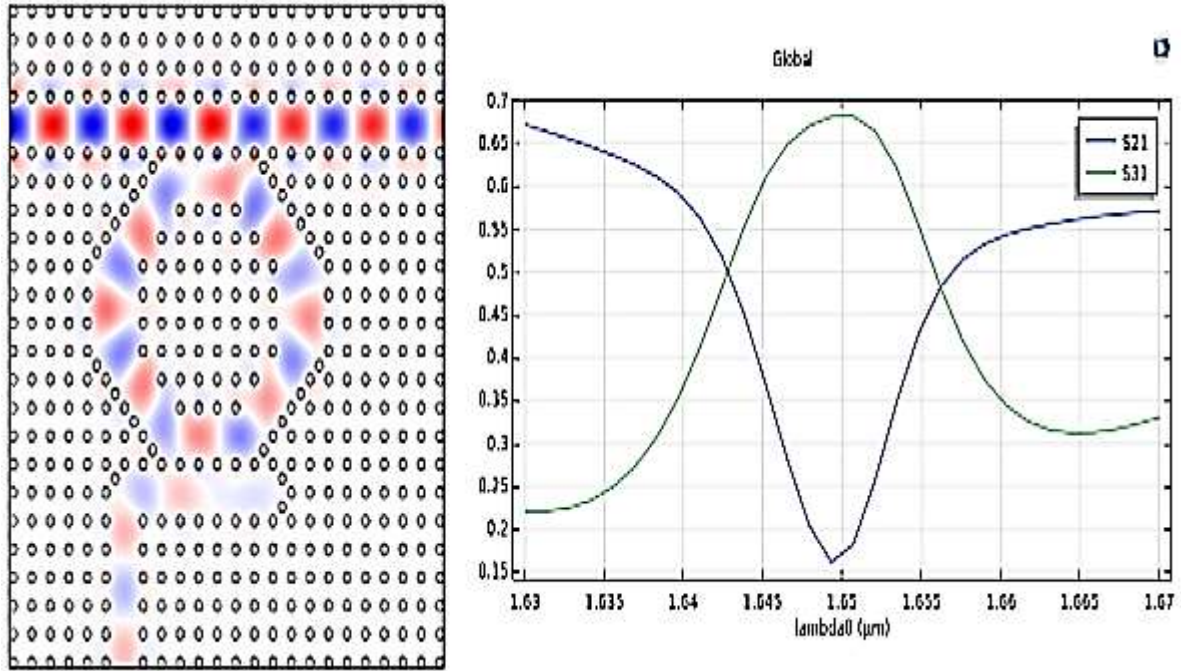
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure III. 29 : Représentation de la répartition du champ électrique dans le démultiplexeur à la longueur d'onde $\lambda_1=1.45\mu\text{m}$, $\lambda_2= 1.50 \mu\text{m}$, $\lambda_3=1.55 \mu\text{m}$, $\lambda_4=1.65 \mu\text{m}$.

III. 4. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats de simulation de plusieurs composants optiques à base des cristaux photoniques bidimensionnels avec une configuration déconnectée à savoir les guides d'onde de type $W_1^K A$ et $W_3^K A$ à maille carrée et triangulaire, les filtres en anneaux et les démultiplexeurs.

Ces derniers ont été obtenus en créant des défauts qui brisent la périodicité de la structure cristalline. Les résultats obtenus en terme de guidage, filtrage et démultiplexage montrent l'efficacité des différents composants optiques conçus.

Conclusion générale

Notre travail concerne la conception et l'étude d'un démultiplexeur optique à base d'un matériau à bande interdite photonique à deux dimensions, à l'aide du logiciel COMSOL.

Dans le premier chapitre, nous avons donné les principes de base du formalisme des cristaux photoniques afin de comprendre comment ces objets agissent sur la lumière. La structure périodique bidimensionnelle 2D considère comme la meilleure structure pour le guidage d'un signal donc les cristaux photoniques ouvrent la voie des plusieurs fonctions optiques telles que les filtres, les guides d'ondes, les diviseurs et les démultiplexeurs.

Dans le deuxième chapitre nous avons défini le principe multiplexage en cristaux photoniques suivi par la présentation succincte de quelques exemples d'application dans lesquels sont utilisés des différentes structures d'un démultiplexeur en cristaux photoniques.

Dans le dernier chapitre, nous avons conçu et simulé des différentes topologies des démultiplexeurs à base des cristaux photoniques bidimensionnels en utilisant logiciel Comsol Multiphysics. La structure du démultiplexeur proposé est basé essentiellement sur les guides d'onde mono-rangée et les cavités résonnantes afin de séparer le signal en longueurs d'ondes bien particulières très utilisées dans les systèmes de transmission optique.

Références Bibliographiques

- [1] H.MALACHE, A.Mahi, « Nouvelles structures des démultiplexeurs en cristaux photoniques 2D pour les systèmes très hauts débits », mémoire MASTER ,*Université de Tlemcen, juin 2018.*
- [2] M.BOUANATI, N.BELLAREDJ, « conception des filtres a base des cristaux photoniques bidimensionnels par l’analyse de la bip : modélisation par la FDTD-2D », *université de Tlemcen, juin 2013.*
- [3] H.MALACHE, A.Mahi, « Nouvelles structures des démultiplexeurs en cristaux photoniques 2D pour les systèmes très hauts débits », mémoire MASTER , *Université de Tlemcen, juin 2018.*
- [4] E. Yablonovitch. Physical Review Letters 58(20), 20592062 (1987).
- [5] S. John, Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices, Phys. Rev. Lett. 58, 2486 (1987). 2.
- [6] A.DAHMANI, « Optimisation des filtres selectifs à base des cristaux photoniques unidimensionnels par une approche hybride », mémoire MASTER, *Université de Tlemcen, juin 2017.*
- [7] F.LALLAM, « Conception de Nouvelles topologies des Démultiplexeurs Sèlectifs à plusieurs canaux el longueurs d’ondes à base de Cristaux Photoniques Bidimensionnels», Thèse de doctorat, *Université De Tlemcen, Avril 2019.*
- [8] M.FILALI, « Etude et Conception d'un démultiplexeur 8 canaux à cristaux photoniques bidimensionnels »,mémoire MASTER, *Université Mohamed Boudiaf - M’SILA, juin 2018.*
- [9] M.Grillet, « cristaux photoniques et intégration photonique ». Thèse de doctorat de l’université de Lyon (2003).
- [10] C.J.M. Smith t al, “Coupled guide and cavity in a two-dimensional photonic crystal”. Applied physics letters (2001).
- [11] H.BADAOUI Hadjira, “Etude et Conception des Micro - composants à Base des Cristaux Photonique Bidimensionnels”, Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen, Décembre 2012.
- [12] L.BOUKERZAZA, «Influence des paramètres physiques sur la bande interdite photonique d’un crisal photonique bidimensionnel à rëseau hexagoknal»,*Université Mentouri Constantine, 2007-2008,*

- [13] A.BELHASSOS , S.METREF, « Etude et simulation des cristaux photoniques », Mémoire de Master, *Université Kasdi Merbah Ouargla, 2016-2017.*
- [14] Bibli.ec-lyon.fr/exl-doc/these-grillet.pdf.
- [15] B.BOUHASSOUN, A.KADOUCI, « étude et simulation numérique des composants photoniques uni-dimensionnels », *memoire de Master , Université de Tlemcen, 2018.*
- [16] A.BENMERKHI, « Optimisation de confinement de la lumière dans des cavités à cristaux photoniques », Thèse de doctorat, *Université Mentouri Constantine, 2012.*
- [17] S.MASSAOUDI, « Etude théorique et expérimentale des matériaux à bandes interdites photoniques bidimensionnels (BIP 2D) en Micro-Ondes: Application à l'ultra réfraction », thèse doctorat, 2008. *Université Paris Xiur Scientific D'ORSAY.*
- [18] A.HARHOUZ, « Contribution à l'étude et la conception des capteurs à base de cristaux photoniques » , *Université Mohamed Boudiaf - M'sila Faculté de Technologie Département d'Electronique, thèse de doctorat , avril 2017.*
- [19] A.BENMERKHI, « Influence des Paramètres Géométriques sur la Cavité à Cristaux Photoniques Bidimensionnels », *Université Mentouri Constantine, 2008.*
- [20] F.GAUFILLET , « Cristaux photoniques à gradient : dispositifs et applications », Université Paris-sud École Doctorale 422 : Sciences et Technologie de l'Information, novembre 2014.
- [21] S.BRAHIMI, H.HAMMOUDI , « Conception de diviseur de faisceau à base des cristaux photoniques bidimensionnels » , mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf - M'sila ,2016/2017.
- [22] Kévin LENGLE, “ Traitement tout optique du signal à base de composants à cristaux photoniques en matériaux semi-conducteurs III-V”, thèse de doctorat, Université de Rennes le 19 Juin 2013.
- [23] F.BOUGRIOU , « étude des guides d'ondes à cristaux photoniques bidimensionnels », thèse de Master , *Université Mentouri Constantine, 2008.*
- [24] R .NAOUM, S .BOUAMAMI , F.SALAH BELKHODJA, «Etude d'un démultiplexeur à base des cristaux photoniques», *Université Djillali Liabes de sidi bel abbes , 2010.*

Résumé :

Les cristaux photoniques sont des nanostructures périodiques de matériaux qui ont les mêmes effets de la propagation des photons que ceux des électrons pour les cristaux usuels: certaines longueurs d'onde peuvent se propager tandis que d'autres non. Les matériaux à bande interdite photonique (BIP) ou cristaux photoniques sont des structures périodiques capables de contrôler la propagation des ondes électromagnétiques. Il en existe 3 formes qui sont caractérisées par le nombre de directions de la périodicité de l'indice optique (1D, 2D, 3D). Dans ce travail, nous avons abordé des nouvelles topologies de démultiplexeur en longueur d'onde à base de cristaux photoniques bidimensionnels dans le but de séparer les longueurs d'onde très utilisées dans les systèmes de transmission optique. Les performances du démultiplexeurs conçus en terme de transmission seront effectuées et analysées avec le logiciel COMSOL.

Mots clés : Cristaux photoniques, bande interdite photonique (BIP), $W_1^k A$, $W_3^k A$, guide d'onde, filtre en anneau, démultiplexeur, logiciel COMSOL.

Abstract :

Photonic crystals are periodic nanostructures of materials that have the same effects on photon propagation as conventional crystals have on electron propagation: some wavelengths can propagate while others cannot. Photonic band gap (BIP) materials or photonic crystals are structures that modify the propagation of electromagnetic waves. There are 3 forms that are characterized by the number of directions of the periodicity of the optical index (1D, 2D, 3D),

In this work, we have addressed new wavelength demultiplexer topologies based on two-dimensional photonic crystals in order to separate the wavelengths widely used in optical transmission systems. The performance of the demultiplexer designed in terms of transmission will be carried out and analysed using the COMSOL software.

Key words: Photonic crystals, photonic band gap, $W_1^k A$, $W_3^k A$, waveguide, filter in ring, demultiplexer, COMSOL software.

ملخص :

البلورات الضوئية هي هياكل دورية للمواد التي تحتوي على نفس التأثيرات لانتشار الفوتونات التي تحدثها البلورات المعتادة فيما يخص الالكترونات: بعد الاطوال الموجية يمكن ان تنتشر بينما البعض الاخر لا ينتشر. المواد ذات فجوة الحزمة الضوئية (BIPs) او البلورات الضوئية هي هياكل تعديل انتشار الموجات الكهرومغناطيسية. هناك 3 اشكال تتميز بعدد اتجاهات الفهرس البصري (D1 , D2, D3). في هذا العمل ناقشنا طوبولوجيا مزيل تعدد الارسال الجديدة في الطول الموجي على اساس بلورات فوتونية ثنائية الابعاد لغرض انفصال الاطوال الموجية المستخدمة على نطاق واسع في انظمة النقل البصري و العرض ضمن DEMUX المصممة من حيث الانتقال سيتم تنفيذها و تحليلها مع البرنامج COMSOL.

الكلمات المفتاحية : البلورات الضوئية، فجوة النطاق (BIPs)، مزيل تعدد الارسال ، $w_3^k A$, $w_1^k A$ ، البرنامج COMSOL، دليل موجي، مرشح.

