

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث 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 de Télécommunications

Par :

HAKOUM Bouhafs BENAMAR Oussama

Sujet

Conception des Nouvelles architectures des circulateurs magnéto-optique en cristaux photoniques bidimensionnels à très haut débit

Soutenu publiquement, le 30/09/2020, devant le jury composé de :

Mme. M. MELLIANI	Professeur	Univ. Tlemcen	Présidente
Mme. H. BADAOU	Maitre de conférences (A)	Univ. Tlemcen	Encadrante
MrM. ABRI	Professeur	Univ. Tlemcen	Examineur

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 chers parents 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 chers frères et à toute la famille et mes amis.

Bouhafs

Dédicace

Au nom du ALLAH le clément et le miséricordieux je dédie ce
modeste travail :

Mes chers parents qui ont toujours été dévoués pour que je puisse
réaliser ce travail de recherche dans les meilleures conditions.

A mes proches amis et toutes mes grandes familles.

Et toute la famille de Télécommunication bien sûr, mes professeurs et

A moi-même.

DUSSAMA

Remerciements

Tout d'abord, tous nos louanges à ALLAH, le clément et le miséricordieux de nous avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Nos chaleureux remerciements pour notre chère encadreur Madame ABRI Née BADAoui Hadjira Maitre de conférences classe A, à l'Université Abou-Bekr Belkaid pour son soutien, sa générosité, et qui n'a pas hésité à nous donner toutes les informations et conseils judicieux afin de nous orienter au cours de l'élaboration de ce travail.

Nos profonds respects et remerciements aux membres du jury pour avoir pris la peine d'examiner notre travail, à Mme. MELLIANI Maghnia Professeur à l'Université de Tlemcen d'avoir accepté de juger ce travail en présidant le jury, ainsi que Mr. ABRI Mehadji Professeur à l'Université de Tlemcen pour le temps qu'il a consacré afin d'examiner ce travail ; vous nous avez honoré d'accepter de siéger parmi notre jury de mémoire.

A la fin, nous exprimons également notre gratitude à tous les professeurs enseignants qui ont collaboré à notre formation depuis notre premier cycle d'étude jusqu'à la fin de notre cycle universitaire. Qu'ils trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude.

Résumé

Les cristaux photoniques sont des matériaux diélectriques ou métalliques artificiellement structurés dont la constante diélectrique varie périodiquement à l'échelle de la longueur d'onde selon plusieurs directions de l'espace. Ces structures sont désignées par l'appellation de cristaux photoniques à une, deux ou trois dimensions, influençant la propagation des ondes électromagnétiques à l'intérieur de la structure CP. Ces derniers possèdent une propriété optique intéressante qui est la bande interdite photonique (BIP), dont laquelle aucun mode électromagnétique ne peut se propager. C'est notamment cette propriété qui offre aux cristaux photoniques la possibilité de contrôler la propagation, sans absorption, des ondes électromagnétiques, ainsi de nouvelles perspectives dans la manipulation de la lumière.

Notre travail, consiste à concevoir de nouveaux circulateurs magnéto-optique en cristaux photoniques bidimensionnels à très haut débit à l'aide du logiciel COMSOL. Les performances du circulateurs magnéto-optique conçus en termes de transmission, seront effectuées et analysées.

Mots clés : cristaux photoniques, diagramme de dispersion,PWE,la carte des bandes,circulateur, COMSOL.

Abstract

Photonic crystals are artificially structured dielectric or metallic materials whose dielectric constant varies periodically on the wavelength scale in several directions in space. These structures are designated by the name of one, two or three dimensional photonic crystals, influencing the propagation of electromagnetic waves inside the CP structure. The latter have an interesting optical property which is the photonic band gap (BIP), which no electromagnetic mode can propagate. It is in particular this property which offers photonic crystals the possibility of controlling the propagation, without absorption, of electromagnetic waves, thus new perspectives in the manipulation of light.

Our job is to design consists in designing new magneto-optical circulators made of two-dimensional photonic crystals with very high throughput using the COMSOL software. The performance of the designed magneto-optical circulators in terms of transmission will be carried out and analyzed.

Keywords : photonic crystals, scatter diagram, PWE, band map, circulator, comsol.

ملخص

البلورات الضوئية عبارة عن مواد عازلة أو معدنية منظمة بشكل اصطناعي يختلف ثابت عزلها بشكل دوري على مقياس الطول الموجي في عدة اتجاهات في الفضاء. يتم تسمية هذه الهياكل باسم بلورات ضوئية أحادية أو ثنائية أو ثلاثية الأبعاد، مما يؤثر على انتشار الموجات الكهرومغناطيسية داخل بنية CP. يحتوي الأخير على خاصية بصرية مثيرة للاهتمام وهي فجوة النطاق الضوئي (BIP)، والتي لا يمكن لأي وضع كهرومغناطيسي نشرها. هذه الخاصية على وجه الخصوص هي التي توفر للبلورات الضوئية إمكانية التحكم في انتشار الموجات الكهرومغناطيسية دون امتصاص، وبالتالي منظورات جديدة في معالجة الضوء.

مهمتنا هي تصميم دوائر مغناطيسية ضوئية جديدة بلورات ضوئية ثنائية الأبعاد بسرعة عالية جداً باستخدام برنامج comsol سيتم تنفيذ وتحليل أداء الدوائر المغناطيسية الضوئية المصممة من حيث الإرسال.

الكلمات الرئيسية: بلورات ضوئية، مخطط مبعثر، PWE، خريطة نطاق الطول الموجي، الدوائر المغناطيسية، COMSOL.

Liste des Abréviations

BIP: Bande Interdite Photonique.

CP: Cristal photonique.

n : l'indice de réfraction.

TM : Transverse magnétique.

TE : Transverse électrique.

1D : structure à une dimension.

2D : structure à deux dimensions.

3D : structure à trois dimensions.

ϵ : Permittivité.

a_1 : l'épaisseur de la couche qui constitue le miroir de Bragg de permittivité ϵ_1 .

a_2 : l'épaisseur de la couche qui constitue le miroir de Bragg de permittivité ϵ_2 .

n_h : L'indice de réfraction du matériau de haut indice.

n_1 : L'indice de réfraction du matériau de bas indice.

v_i : volume occupé par ce matériau dans la cellule élémentaire du Cristal.

Λ : Volume de la cellule élémentaire du Cristal.

$w_1^k A$: Guide d'onde mono rangée.

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

f : facteur de remplissage.

r : rayon.

λ : Longueur d'onde.

a : Période du cristal photonique.

r : Rayon du cristal photonique.

f : Facteur de remplissage.

n : Indice de réfraction.

\vec{K} : Vecteur d'onde.

V_g : Vitesse de groupe.

g : le vecteur du réseau réciproque.

\vec{E} : le champ électrique

\vec{H} : le champ magnétique.

\vec{B} : Vecteur de l'induction magnétique.

ϵ : Permittivité diélectrique.

μ : Perméabilité magnétique.

CP : Cristal Photonique.

MEB : Microscope Electronique à Balayage.

PBG: Photonic Band Gap.

PhC: Photonic Crystal.

PML: Perfectly Matched Layer.

TE: Transverse Electric.

TM: Transverse Magnetic.

WDM: Wavelength division multiplexing.

PWE : Méthode des ondes planes

FDTD : Finite Difference Time Domain.

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1: Les Cristaux photoniques à une, deux et trois dimensions.....	6
Figure I.2: cristaux photoniques unidimensionnel (1D)	6
Figure I.3: (a) structure déconnectée, (b) structure connectée.....	7
Figure I.4: Décomposition du champ électromagnétique suivant ses deux polarisations TE et TM.....	8
Figure I.5: Structure 2D : (a) Réseau carré. (b) Le réseau triangulaire. (c) Le réseau hexagonal.....	8
Figure I.6: Représentation de structure yablonovite.....	9
Figure I.7: Différentes structures 3D: structure cubique (1), le tas de bois (2), la structure multicouches (3), les opales ou opales inversées (4) et la Yablonovite (5).....	10
Figure I.8: (a) Aile de papillon, (b) Coupe d'une aile de papillon observée au MEB.....	10
Figure I.9: Agrandissement d'une plume de paon au microscope montrant la structure des barbules. Chaque barbule est divisée en une série de cuvettes (flèche rouge).	11
Figure I.10: (a) Bracelet monté d'une opale naturelle quasi-périodiques bille de silice (b) Image au microscope électronique d'une opale naturelle.....	12
Figure I.11: Analogie entre les ondes d'électrons dans un potentiel périodique et les ondes lumineuses dans un environnement diélectrique variable périodiquement.....	12
Figure I.12: Les périodes d'un cristal photonique unidimensionnel.....	14
Figure I.13: Défauts ponctuels : (a) Défaut lacunaire, (b) et (c) Défauts de substitutions.....	15

Figure I.14: Exemple de guide W1 à cristal photonique hexagonal de trous d'air sur un substrat de silicium sur isolant.....	16
Figure I.15: Structure triangulaire d'un guide mono rangée $W_1^K A$	17
Figure I.16: La réponse spectrale en transmission et réflexion.....	18
Figure I.17: Représentation d'un filtre add / drop.....	19
Figure I.18: Principe de démultiplexeur spectrographe : 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.....	19
Figure I.19: 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.....	20
Figure I.20: structure d'un diviseur : (a) 1x2 avec une jonction Y, (b) 1x4 avec une jonction Y, (c) 1x2 avec une jonction T, (d) 1x4 avec une jonction T.....	20
Figure I.21: Cartes des bandes interdites d'un réseau de trous d'air dans une matrice diélectrique ($\epsilon=11.4$) : (a) Réseau carré ; (b) Réseau triangulaire.....	21
Figure I.22: Exemple de cristal photonique unidimensionnel (à gauche) et zone de Brillouin correspondante (à droite). L'intervalle $[-\pi/a ; +\pi/a]$ est la première zone de Brillouin et à $[0; +\pi/a]$ la zone de Brillouin.....	22

Chapitre II

Figure II.1: Symbole schématique standard ANSI et CEI pour un circulateur.....	25
Figure II.2: circulateur de guide d'ondes utilisé comme isolateur en plaçant une charge adaptée sur le port 3.....	26

Figure II.3: Amplificateur de réflexion à diode micro-ondes utilisant un circulateur	29
Figure II.4: Circulateur MPC à trois ports de type T	30
Figure II.6: Structure de bande de mode TE des SLPC	31
Figure II.7: Schéma de principe des SLPC 2D	32
Figure II.8: Perte d'insertion numérique et isolation du circulateur pour le signal lancé depuis le port A.....	34
Figure II.9: Perte d'insertion numérique et isolement du circulateur pour le signal lancé depuis le port B.....	35
Figure II.10: Perte d'insertion numérique et isolation du circulateur pour le signal lancé depuis le port C	35
Figure II.11: Structures du circulateur 2D-MPC	37
Figure II.12: Bande interdite pour les cristaux photoniques à réseau triangulaire.....	40
Figure II.13: Distribution de champ EZ pour les modes doublement dégénérés en micro-cavité formé par un défaut ponctuel.....	40
Figure II.14: Propagation électromagnétique dans un circulateur MPC 2D	41
Figure II.15: Caractéristiques externes du circulateur.....	42
Figure II.16: Perte d'insertion et isolement par rapport à ceux de la littérature.....	42
Figure II.17: Propagation électromagnétique dans un circulateur MPC 2D de 3 cm	44
Figure II.18: Perte d'insertion et isolation du circulateur MPC en Y de 3 cm	45

Chapitre III

Figure III. 1: Présentation du software COMSOL Version 5.4 utilisé pour la simulation.....	49
Figure III.2: Représentation schématique d'un CP-2D déconnecté sans défaut à motif carré.....	50
Figure III.3: Réponse spectrale de transmission d'un CP-2D déconnecté sans défaut à motif carré.....	50

Figure III.4: Illustration de la propagation du champ électrique E_z dans un cristal photonique 2D carré sans défaut.....	51
Figure III.5: Représentation schématique d'un CP-2D déconnecté sans défaut à motif triangulaire($a=0.6$, $k=0.2$).....	51
Figure III.6: Réponse spectrale de transmission d'un CP-2D déconnecté sans défaut structure à motif triangulaire..	52
Figure III.7: Répartition de champ électrique E_z dans un CP-2D sans défaut à motif triangulaire.....	52
Figure III.8: Réponse spectrale en terme de transmission d'un guide d'onde à base d'un CP-2D déconnecté.....	53
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.....	54
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 $1.31\mu\text{m}$	55
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 $1.55\mu\text{m}$	55
Figure III.12: Représentation schématique d'un guide d'onde W_3^kA à base d'un CP-2D déconnecté à maille triangulaire.....	56
Figure III.13: Réponse spectrale en terme de transmission un guide à base d'un CP-2D déconnecté à maille triangulaire.....	57
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.....	58
Figure III.15: Représentation schématique d'un circulateur trois ports en micro onde.....	59
Figure III.16: Répartition de champ électrique E_z de port 1 vers le port 3.....	59
Figure III.17: présentation de Paramètre S en fonction de la fréquence pour le port 1 vers le port 3.....	60

Figure III.18: Répartition de champ électrique E_z de port 3 vers le port 2.....	60
Figure III.19: présentation de Paramètre S en fonction de la fréquence pour le port 3 vers le port 2.....	61
Figure III.20: Répartition de champ électrique E_z de porte 2 vers le porte 1.....	61
Figure III.21: présentation de Paramètre S en fonction de la fréquence pour le port 2 vers le port1.....	62
Figure III.22:Représentation schématique d'un circulateur 4 ports en cristaux photoniques.....	62
Figure III.23: Répartition de champ électrique E_z de porte 1.....	63
Figure III.24: présentation de Paramètre S en fonction de la fréquence pour le port 1.....	63
Figure III.25: Répartition de champ électrique E_z de porte 2.....	64
Figure III.26: présentation de Paramètre S en fonction de la fréquence pour le port 2.....	64
Figure III.27: Répartition de champ électrique E_z de porte 3.....	65
Figure III.28: présentation de Paramètre S en fonction de la fréquence pour le port 3.....	65
Figure III.29: Répartition de champ électrique E_z de port 4.....	66
Figure III.30: présentation de Paramètre S en fonction de la fréquence pour le port 4.....	67

Table des matières

Dédicaces.....	i
Remerciements.....	iii
Résumés	iv
Abstract	v
Résumé en arabe	vi
Liste des abréviations	vii
Liste des figures.....	xiii
Introduction Générale.....	2
Chapitre I.....	4
I.1 Introduction :	5
I.2 Historique des premiers cristaux photoniques :.....	5
I.3 Définition des cristaux photoniques :.....	5
I.4 Différents types des cristaux photoniques :.....	6
I.4.1 Les cristaux photoniques unidimensionnels 1D (miroirs de Bragg) :.....	6
I.4.2 Les cristaux photoniques bidimensionnels 2D :.....	7
I.4.3 Les cristaux photoniques tridimensionnels 3D :.....	8
I.5 Cristaux photonique naturels :.....	10
I.5.1 Les papillons :	10
I.5.2 Les oiseaux :.....	11
I.5.3 Les opales :.....	11
I.6 Analogie entre l'électron et le photon :	12
I.7 Les méthodes d'analyse et de synthèse des cristaux photoniques :.....	13
I.7.1 La méthode des ondes planes (PWE) :.....	13
I.7.2 Méthode des matrices de transfert (TMM) :	13

I.7.3	La méthode différences finies dans le domaine temporel (FDTD) :.....	13
I.8	Les caractéristiques physiques et géométriques des cristaux photoniques :.....	13
I.8.1	Périodes :.....	14
I.8.2	Facteur de remplissage f :.....	14
I.8.3	Contraste d'indice Δn :.....	14
I.9	Les défauts dans un cristal photonique :.....	15
I.9.1	Les défauts ponctuels :.....	15
I.9.2	Les défauts linéaires :.....	15
I.10	Cartes des bandes interdites :.....	16
I.11	La zone de Brillouin :.....	17
I.12	Applications des cristaux photoniques :.....	18
I.12.1	Les guides d'ondes rectilignes :.....	18
I.12.2	Filtre add / drop :.....	19
I.12.3	DEMUX-coupler :.....	20
I.12.4	Le diviseur :.....	21
I.13	Conclusion :.....	22
Chapitre II	5
II.1	Theorie de fonctionnement du circulateur :.....	25
II.2	L'intérêt du fonctionnement d'un circulateur dans un circuit :.....	26
II.2.1	Les types des circulateurs :.....	26
II.3	Applications :.....	28
II.3.1	Isolateur :.....	28
II.3.2	Duplexeur :.....	28
II.3.3	Amplificateur de réflexion :.....	28
II.4	État de l'art sur Les circulateurs photoniques :.....	29
II.4.1	Circulateur à cristal photonique de type T avec réseau de tiges Al_2O_3 à réseau carré et bornes en ferrite NiZn :.....	29

II.4.2	Analyse théorique:.....	30
II.5	Circulateur à Cristaux Magnétophotoniques Bidimensionnel à jonction Y à faibles pertes utilisant un cylindre en ferrite:	36
II.5.1	Structures défectueuses dans MPCPS 2D:	36
II.5.2	Bande interdite photonique et analyse du champ de mode du défaut ponctuel :38	
II.6	Circulateur 2D-MPCS à jonction Y à faibles pertes:	39
II.7	Circulateur 2D-MPCS en forme de Y de 3 cm :.....	43
II.8	Conclusion:.....	45
Chapitre III	25
III.1	Introduction.....	48
III.2	Définition de logiciel COMSOL :	48
III.3	Présentation des résultats de simulation :	49
III.3.1	Les guides ondes :.....	49
III.3.2	Circulateur trois ports en micro onde :	58
III.3.3	Circulateur 4 port en cristaux photoniques :.....	62
III.4	Conclusion :	67
	Conclusion générale.....	69
	Références bibliographiques.....	72

Introduction générale

Introduction Générale

Ces dernières années, les matériaux à bande interdite photonique (BIP) ou cristaux photoniques ont attiré de nombreux chercheurs en science de la technologie, grâce à leurs propriétés optiques uniques qui ont suscité un intérêt important, offrant la possibilité de contrôler la propagation de la lumière. Le développement de ce nouveau type de matériau a ouvert la voie à un nouveau champ de recherche et à des possibilités d'applications très diverses.

Les cristaux photoniques sont des structures dont l'indice diélectrique varie périodiquement à l'échelle de la longueur d'onde dans une ou plusieurs directions de l'espace. La périodicité de l'indice diélectrique joue le même rôle pour les photons que la périodicité du potentiel ionique dans un cristal pour les électrons [1].

La périodicité du milieu produit sur la lumière qui se propage dans le cristal photonique, un effet d'analogie formelle qui existe entre les équations de Maxwell régissant la propagation des ondes électromagnétiques dans un milieu diélectrique et l'équation de Schrödinger pour les électrons.

De même qu'il existe des bandes permises et des bandes interdites pour les électrons, il apparaît des bandes interdites pour les photons dans les cristaux photoniques. A l'origine, ces derniers ont été proposés pour inhiber l'émission spontanée par annulation de la densité d'états dans la bande interdite photonique. L'absence de modes optiques disponibles dans cette dernière a rapidement été utilisée pour réaliser des miroirs parfaits capables de réfléchir l'intégralité de l'énergie d'une onde lumineuse quel que soit son angle d'incidence. Les progrès théoriques et expérimentaux ont été spectaculaires. Même si la fabrication de cristaux photoniques 3D pose encore de nombreuses difficultés, des résultats inimaginables ont été obtenus récemment sur des structures 2D. Citons par exemple un facteur de qualité supérieur à 600000 mesuré par Noda et al. sur une microcavité à cristaux photoniques. A l'heure actuelle, les cristaux photoniques constituent plus que jamais un matériau prometteur pour la réalisation de composants pour l'optique intégrée [1].

Si l'on introduit des défauts dans le cristal photonique, de nouveaux états permis apparaissent dans la bande interdite photonique. La lumière peut être confinée selon plusieurs dimensions selon le défaut et la dimensionnalité du cristal photonique. Par exemple, si l'on introduit un défaut unidimensionnel dans un cristal photonique bidimensionnel, la lumière est confinée en deux dimensions. Une cavité bidimensionnelle est créée, si l'on introduit un

défaut linéaire dans un cristal photonique bidimensionnel, la lumière est confinée dans une dimension et elle est libre de se propager dans l'autre dimension, ce qui constitue un guide d'onde. En utilisant ces concepts de base, il est alors possible de concevoir des dispositifs pour l'optique intégrée avec ces cavités et ces guides d'ondes. L'introduction d'éléments à base de cristaux photoniques permettrait de traiter toute l'information sous forme lumineuse et de miniaturiser les circuits actuels. C'est la raison pour laquelle de nombreuses propositions pour des dispositifs à base de cristaux photoniques ont été faites et parfois déjà réalisées, comme les guides d'ondes, les virages, les filtres sélectifs, et les multiplexeurs [2].

Notre mémoire s'articule sur trois chapitres, le premier chapitre est une introduction générale de l'étude des cristaux photoniques ou nous allons définir les concepts de base sur les cristaux photoniques ensuite nous allons énumérer les types de cristaux photoniques artificiels qui ont été inspirés par la nature. Nous citerons leurs propriétés physiques et également le principe d'ouverture de la bande interdite photoniques et la carte de dispersion. Nous aborderons par la suite les techniques de modélisation et les principes de défaut ponctuels qui existent aux niveaux des CPs, ainsi que les différentes applications optiques qui peuvent en découler de ces matériaux.

Le deuxième chapitre est consacré aux circulateur à cristaux photoniques, sa description, son principe de fonctionnement et plus principalement des exemples d'applications les plus récentes dans lesquelles sont utilisées les différentes structures d'un circulateur en cristaux photoniques.

Dans le dernier chapitre de ce mémoire, nous allons présenter brièvement notre outil de simulation le logiciel COMSOL, et étudier les différents résultats de simulation ainsi que la répartition du champ électrique pour plusieurs topologies de circulateur à base de cristaux photonique bidimensionnels. Ce document sera enfin clôturé par une conclusion générale, et une référencebibliographique.

Chapitre I

**Généralités sur les cristaux
photoniques**

I.1 Introduction :

L'objectif de ce premier chapitre est une présentation générale sur les cristaux photoniques. Dans un premier temps, nous allons présenter une historique des cristaux photoniques. Ensuite, nous allons décrire les Matériaux à bandes interdites photoniques naturels et Analogie entre l'électron et le photon. Enfin nous présenterons les principes des défauts qui existent aux niveaux des cristaux photoniques avec quelques applications des cristaux photoniques existantes dans la littérature.

I.2 Historique des premiers cristaux photoniques :

En 1887, La notion de cristaux photoniques (CPs) a été proposée pour la première fois par Lord Rayleigh. La première étude est portée sur un diélectrique à une structure périodique et montré que l'on pouvait ainsi produire un gap ou bande interdite. La plus simple forme de cristal photonique est une structure périodique à une dimension composée d'un entassement multicouche également appelée "miroir de Bragg".

à la fin des années quatre-vingt 1987, Eli Yablonovich de l'Université de Californie à Los Angeles développé la nouvelle structure pour créer un effet Purcell [1] et éliminer l'émission spontanée dans différents dispositifs comme les lasers à semi-conducteurs, les transistors bipolaires à hétérojonctions, les cellules solaires.

La possibilité d'étendre les bandes interdites aux structures bidimensionnelles et tridimensionnelles a été initiée par Eli Yablonovitch [2] et Sajeev John [3], le premier cristal photonique a été réalisé en 1991 [4], se réfère à une substance qui contient des motifs répétitifs sur une base régulière. Cette disposition peut être comparée à la structure diamant cristallin.

I.3 Définition des cristaux photoniques :

Les cristaux photoniques sont des structures périodiques est compose de matériaux diélectriques ou de matériaux magnétiques et cela on 3 formes qui sont caractérisées par le nombre de directions de la périodicité de l'indice optique (1D, 2D, 3D) (figure I.1), semi-conducteurs ou métallo-diélectriques modifiant la propagation des ondes électromagnétiques de la même manière qu'un potentiel périodique dans un cristal semi-conducteur influence le déplacement des électrons en créant des bandes d'énergie autorisées et interdites.

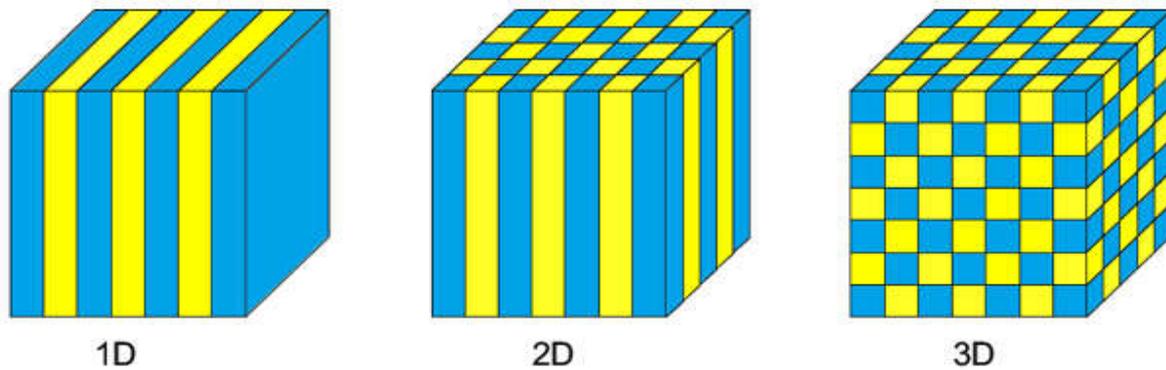


Figure I.1 : Les Cristaux photoniques à une, deux et trois dimensions

I.4 Différents types des cristaux photoniques :

Il existe différents types de cristaux photoniques qui sont classé selon leur

De nombre de directions de périodicité que possède le matériau :

I.4.1 Les cristaux photoniques unidimensionnels 1D (miroirs de Bragg) :

Les cristaux photoniques unidimensionnels sont de simples alternatives aux couches de permittivité différente, ils étaient vraiment Il est largement étudié et utilisé comme miroirs à cavité diélectrique ou filtres sélectifs, qui est un empilement de couches d'épaisseur optique $\lambda / 4$ (miroir de Bragg) où λ représente la longueur d'onde du rayonnement dirigé. Lord Rayleigh décrit le comportement des ondes de sorte que l'indice de réfraction alterne d'une couche à l'autre [5]. Dans le cas d'un miroir de Bragg, il faut que le nombre de couches doit être impair et débiter par la couche d'indice de réfraction le plus fort (Figure I.2).

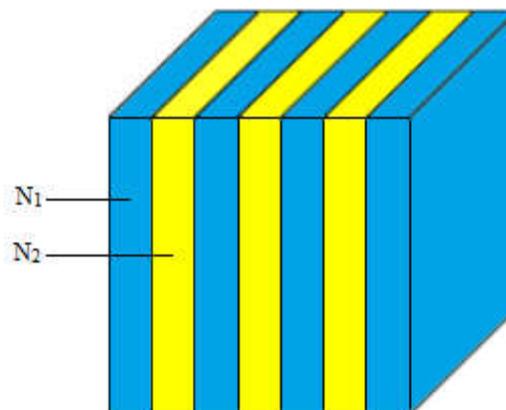


Figure I.2 : cristaux photoniques unidimensionnel(1D).

I.4.2 Les cristaux photoniques bidimensionnels 2D :

Un cristal photonique bidimensionnel est une structure qui présente une modulation périodique de la permittivité diélectrique suivant deux directions de l'espace, et homogène dans la troisième. Dans les propriétés optiques, les structures bidimensionnelles dépendent fortement de la polarisation des ondes électromagnétiques. Il existe deux types de structure :

* Structure connectée : le motif élémentaire a un indice n_1 inférieur à l'indice n_2 de la matrice diélectrique.

* Structure déconnectée : le motif élémentaire a un indice n_1 supérieur à l'indice n_2 de l'espace inter motifs. Elles sont constituées de tiges diélectriques alignées périodiquement dans l'air.

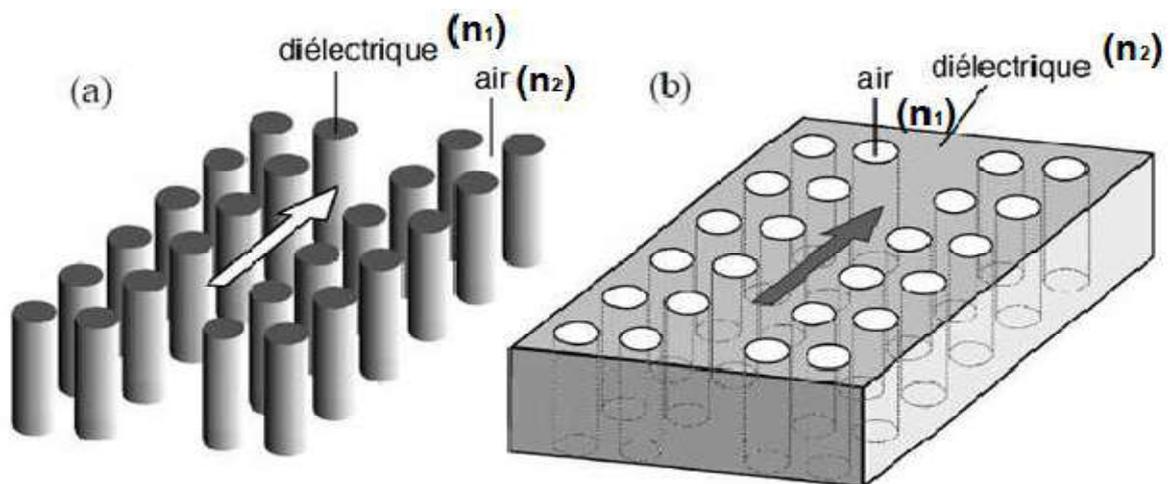


Figure I.3:(a) structure déconnectée, (b) structure connectée [6].

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 Electrique (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 I.4). 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 [6].

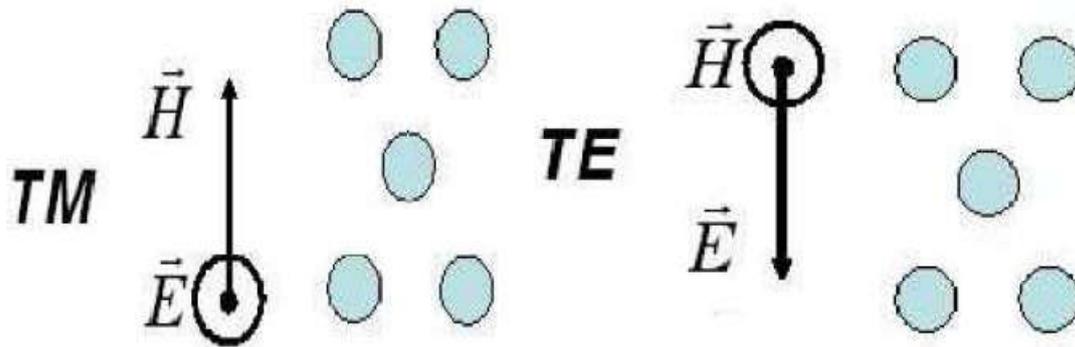


Figure I. 4 : Décomposition du champ électromagnétique suivant ses deux polarisations TE et TM [6].

Il existe trois familles des cristaux photoniques bidimensionnels: Les trois réseaux les plus courants pour l'organisation des piliers (ou des trous), qui sont le réseau carré, triangulaire et hexagonal (Figure I.5) [7].

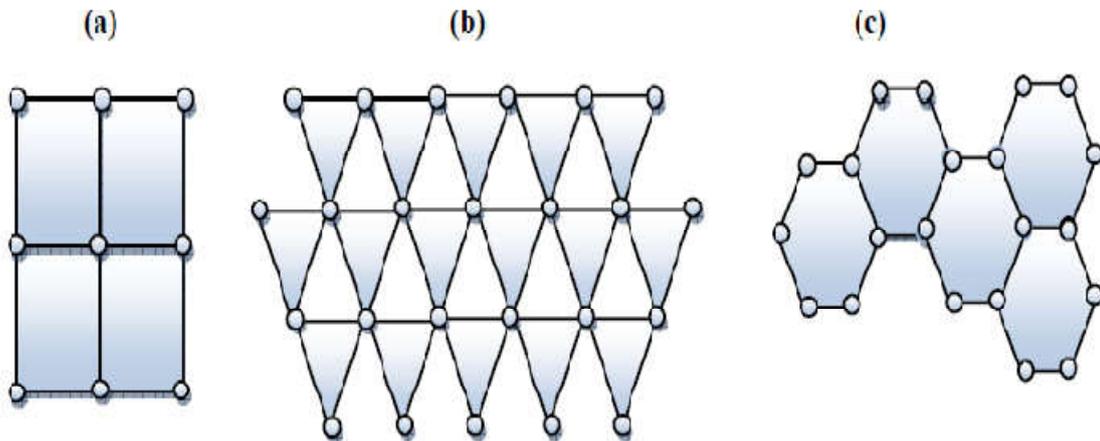


Figure I.5: Structure 2D : (a) Réseau carré. (b) Le réseau triangulaire. (c) Le réseau hexagonal. [7]

I.4.3 Les cristaux photoniques tridimensionnels 3D :

Les cristaux photoniques 3D sont des structures dont la constante diélectrique est structurée périodiquement dans les trois directions. Elles ont été les deuxièmes à être réalisées par Yablonovitch après les structures 1D. Les structures 3D sont les premières structures étudiées avec les structures 1D ou 2D. L'objectif était d'obtenir des structures 3D fonctionnant sur les mêmes principes que les structures 1D mais possédant une bande interdite photonique complète c'est-à-dire dans toutes les directions de l'espace. En 1991 E. Yablonovitch fabriquait un cristal photonique 3D en perceant des trous dans un bloc de plexiglas selon trois angles azimutaux. Ce cristal photonique s'appelle d'après son inventeur (la Yablonovite) [4].

Chapitre I Généralités sur les cristaux photoniques

Avec ce cristal photonique, le concept de la bande interdite photonique a été démontré expérimentalement pour la première fois.

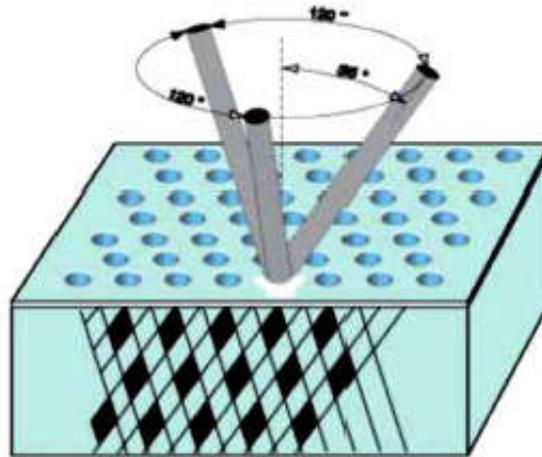


Figure I.6 : Représentation de structure yablonovite.

Il existe une infinité de géométries possibles pour des structures tridimensionnelles. Mais seulement quelques-unes présentent une bande photonique interdite complète. La plupart des structures tridimensionnelles sont inspirées de la géométrie de la structure du diamant (face cubique centrée). La symétrie cubique à face centrée (CFC) possède deux atomes par maille et permet l'ouverture d'une bande interdite complète. Elle est représentée pour une structure d'un réseau diamant de sphères d'air dans un diélectrique à haute permittivité ($\epsilon = 13$), elle est réalisée dans le domaine des micro-ondes pour des raisons évidentes de contraintes technologiques plus faibles que dans le domaine de l'optique. En plus de la Yablonovite, elle existe une autre structure 3D appelée tas de bois, cette dernière est un empilement de tiges diélectriques rectangulaires ou circulaires. Les deux niveaux consécutifs sont perpendiculaires et les deux plans consécutifs de tiges parallèles sont décalés d'une demi-période. Quelques structures de type tas de bois ont été réalisées dans le domaine des microondes soit avec des tiges d'aluminium, soit avec du silicium grâce à l'empilement des grilles gravées les unes sur les autres avec un pivotement de 90° à chaque étage et en respectant l'alignement de l'ensemble [9].

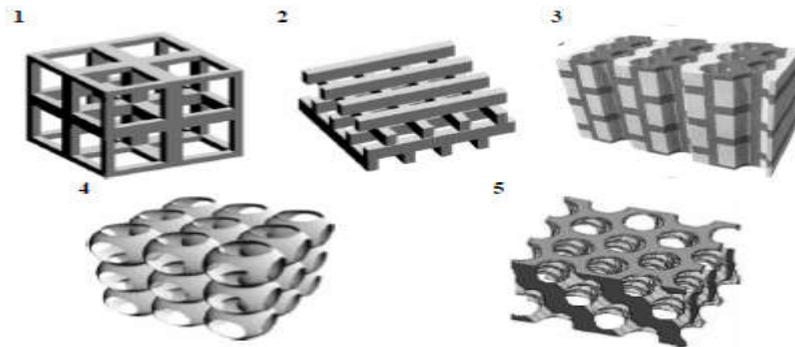


Figure I.7 : Différentes structures 3D [10] : structure cubique (1), le tas de bois (2), la structure multicouches (3), les opales ou opales inversées (4) et la Yablonovite (5).

I.5 Cristaux photonique naturels :

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

I.5.1 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 [7]. Si on effectue une analyse microscopique des ailes on trouve que celles-ci sont constituées par des écailles qui ont des structures géométriques dans lesquelles un des paramètres varie en continu. Sur la figure I.8 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 apparaît une structure qui a un comportement de matériau à bande photonique interdite. C'est 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.

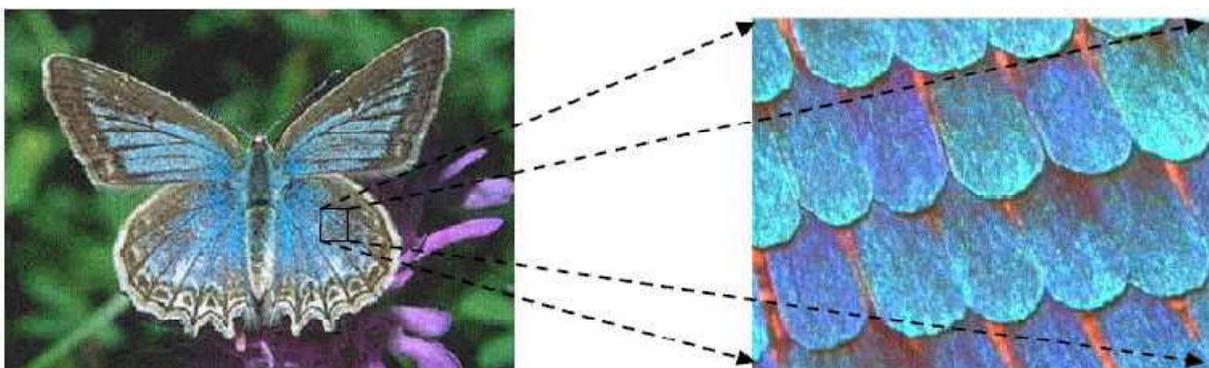


Figure I.8: (a) Aile de papillon, (b) Coupe d'une aile de papillon observée au MEB [11].

I.5.2 Les oiseaux :

Une des caractéristiques les plus admirables des oiseaux est leurs couleurs. Elles leur permettent d'affirmer leur identité. Pour produire une telle couleur, ils emploient la technologie structurale des plumes et leurs pigments dans leurs pièces de corps [12].

En effet, les pigments absorbent une partie de la lumière solaire et renvoient d'autres couleurs structurales, qui naissent de la diffraction du rayonnement lumineux par des microstructures des plumes. Alors que les couleurs pigmentaires sont stables, les couleurs structurales varient souvent selon l'incidence de la lumière. En effet quand on observe une plume de paon au microscope, on voit que toutes les couleurs naissent dans les barbules des plumes. Les barbules sont des lames étroites faites d'une succession de petites cuvettes séparées par un seuil transversal.

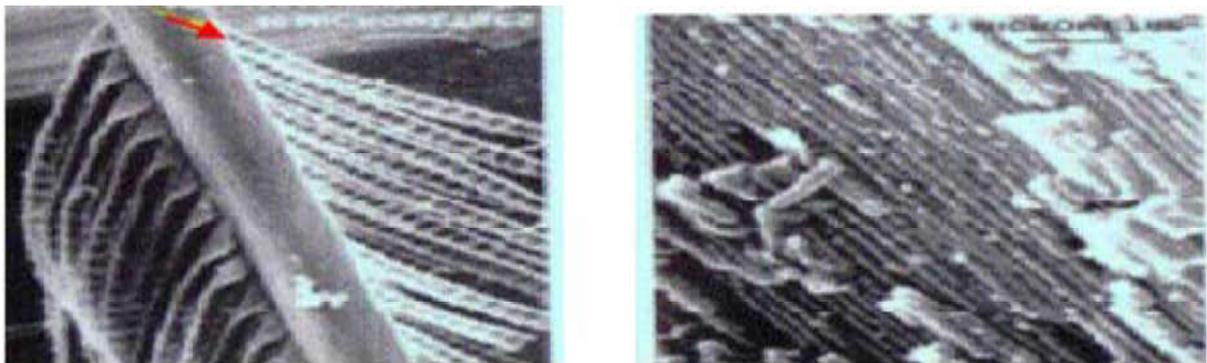


Figure I.9: Agrandissement d'une plume de paon au microscope montrant la structure des barbules. Chaque barbule est divisée en une série de cuvettes (flèche rouge). [7].

I.5.3 Les opales :

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.10)

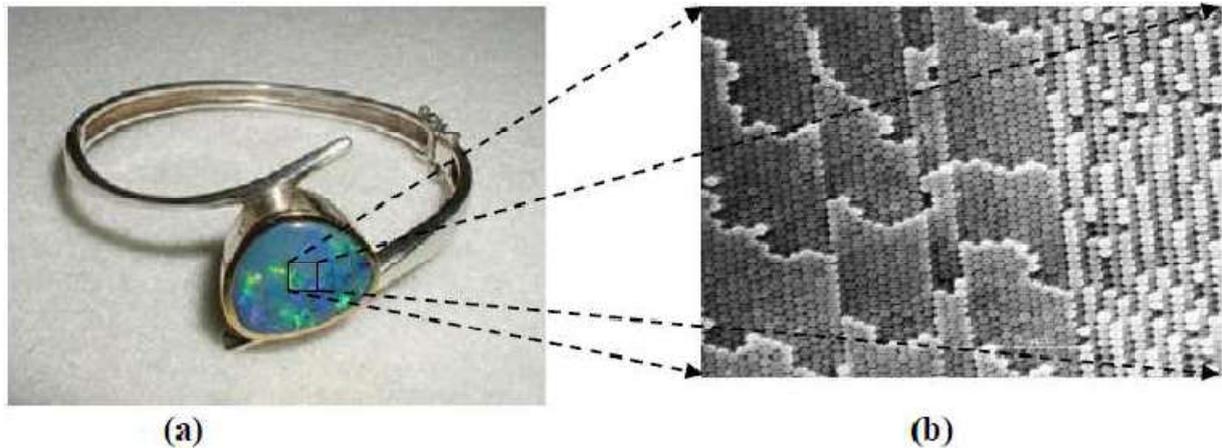


Figure I.10: (a) Bracelet monté d'une opale naturelle quasi-périodiques bille de silice (b) Image aumicroscope électronique d'une opale naturelle [11].

I.6 Analogie entre l'électron et le photon :

Des opales sont obtenues chimiquement par auto-organisation. La première opale a été obtenue. L'analogie entre les équations de propagation de l'électromagnétisme et l'équation fondamentale de la mécanique quantique [13] rend aisée son étude dans le domaine optique ou dans celui des ondes millimétriques [14]. Cette analogie permet de comprendre les diverses propriétés optiques des matériaux et notamment les cristaux photoniques des différentes dimensions. L'analogie optique est le cristal photonique, dans lequel on a une alternance périodique de matériaux diélectriques macroscopiques qui conduit à une variation périodique de l'indice optique. Si les constantes diélectriques des matériaux sont suffisamment différentes, et si l'absorption de la lumière y est faible, on assiste alors aux mêmes phénomènes pour les photons que pour les électrons dans un réseau cristallin [15], la lumière ne pouvant pas se propager pour certaines longueurs d'onde. On parle alors de Bande Interdite Photonique (BIP) [16].

Une opale est obtenue par sédimentation de sphères de silice en solution: par sédimentation. Ces sphères s'arrangent selon un réseau cubique à faces centrées (Figure I.10)

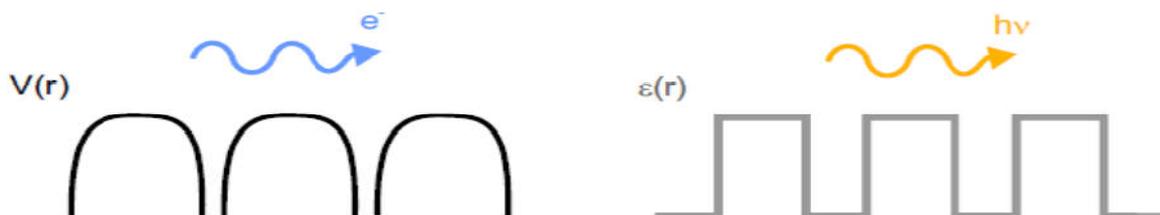


Figure I.11 : Analogie entre les ondes d'électrons dans un potentiel périodique et les ondes lumineuses dans un environnement diélectrique variable périodiquement [17].

I.7 Les méthodes d'analyse et de synthèse des cristaux photoniques :

Il existe plusieurs méthodes de résolution du problème sont développées pour la simulation des cristaux photoniques. Les principales méthodes utilisées sont la méthode des ondes planes (PWE), la méthode des matrices de transfert (TMM) . La méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD). Parmi toutes ces méthodes, les plus généralisée pour la modélisation des cristaux photoniques sont la méthode des ondes planes et la méthode(FDTD).

I.7.1 La méthode des ondes planes (PWE) :

La méthode des ondes planes PWE (Plane Wave Expansion) est la plus couramment utilisée pour calculer les bandes de fréquences interdites des ondes électromagnétiques susceptibles de se propager dans le matériau considéré comme milieu propageant non borné et ceci pour n'importe quelle direction. Cette méthode est très efficace et bien adaptée pour calculer les diagrammes de bandes de cristaux infinis parfaitement périodiques. Elle permet de déterminer la fréquence, la polarisation, et la distribution du champ pour les modes d'une structure photonique.

I.7.2 Méthode des matrices de transfert (TMM) :

C'est la méthode la plus appropriée pour étudier les structures multicouches unidimensionnelle. La structure est divisée en une succession de couches, et une matrice de transfert permet de relier les champs dans une couche à ceux de la couche précédente [18].

I.7.3 La méthode différences finies dans le domaine temporel (FDTD) :

La méthode des différences finies dans le domaine temporel FDTD (Finite Difference Time Domain) est une méthode très utilisée actuellement dans les simulations des structures à cristaux photoniques. Elle a été initialement proposée par Yee en 1966 [19]. Cette méthode de calcul effectuée dans le domaine temporel permet de visualiser la propagation de l'onde dans des milieux structurés tels que les cristaux photoniques.

I.8 Les caractéristiques physiques et géométriques des cristaux photoniques :

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 :

I.8.1 Périodes :

Ces paramètres géométriques, choisis selon le domaine de fréquence étudié, influencent les caractéristiques de la bande interdite photonique, la période « a » d'un cristal photonique unidimensionnel est donnée par : $a = (a_1 + a_2)$ Avec : a_1 l'épaisseur de la couche de permittivité ϵ_1 et a_2 l'épaisseur de la couche de permittivité ϵ_2 .



Figure I.12 : Les périodes d'un cristal photonique unidimensionnel.

I.8.2 Facteur de remplissage f :

Peut être comparé au largeur du potentiel périodique. 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 de l'arrangement des atomes dans un semi-conducteur.

I.8.3 Contraste d'indice Δn :

Rapport entre les indices des deux matériaux, qui peut être comparé à la hauteur de la barrière de potentiel de la physique du solide.

$$\Delta n = n_h - n_l \quad (I.1)$$

Avec :

n_h : L'indice de réfraction du matériau de haut indice.

n_l : L'indice de réfraction du matériau de base indice.

I.9 Les défauts dans un cristal photonique :

Les cristaux photoniques ne permettront de réaliser de véritables fonctions optiques et de contrôler les flux de lumière que si l'on y introduit des défauts.

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 [20].

I.9.1 Les défauts ponctuels :

Il existe de multiples manières de créer des défauts ponctuels dans les cristaux photoniques. On peut aussi procéder au retrait, à l'ajout ou à la modification d'un ou plusieurs motifs du cristal. Pour reprendre la terminologie de la physique du solide, on réalise alors des défauts lacunaires ou de substitution (Figure I.13). Dans tous les cas de cette figure, on crée des cavités optiques dont les modes de résonances vont venir se positionner en énergie au sein des bandes interdites du cristal [21].

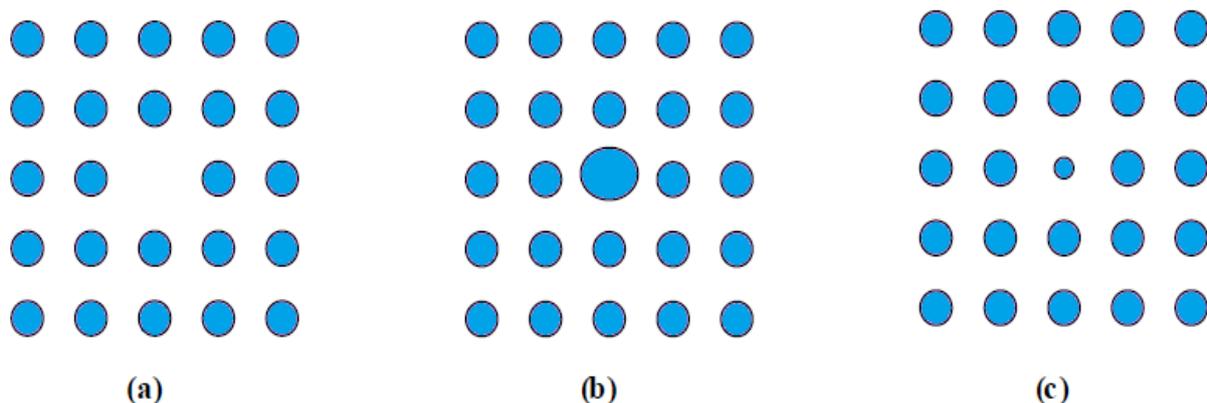


Figure I.13: Défauts ponctuels : (a) Défaut lacunaire, (b) et (c) Défauts de substitutions.

I.9.2 Les défauts linéaires :

Les défauts étendus, 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) (Figure I-14), 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.

Chapitre I Généralités sur les cristaux photoniques

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 [7].

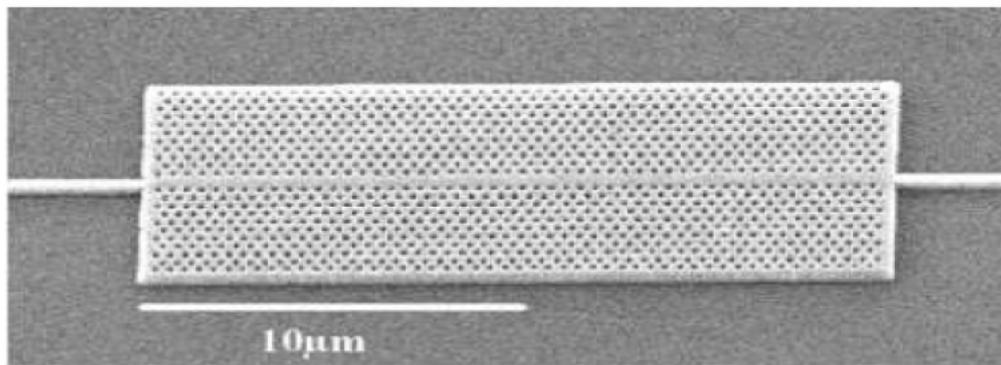


Figure I.14 : Exemple de guide W1 à cristal photonique hexagonal de trous d'air sur un substrat de silicium sur isolant [22].

I.10 Cartes des bandes interdites :

Une carte des bandes interdites montre la position de la bande interdite en fonction du facteur de remplissage f (Figure I.21). Pour le réseau carré, les bandes interdites en polarisation TE et TM s'ouvrent respectivement pour $f = 35\%$ et $f = 50\%$. Pour le réseau triangulaire, elles s'ouvrent respectivement pour $f = 11\%$ et $f = 63\%$. La région de bande interdite complète correspond à l'intersection des bandes interdites TE et TM et se situe dans la fenêtre d'énergie $u = 0.37-0.56$. Le réseau triangulaire est généralement préféré au réseau carré : les bandes interdites TE sont plus larges et s'ouvrent pour des facteurs de remplissage plus faibles [28].

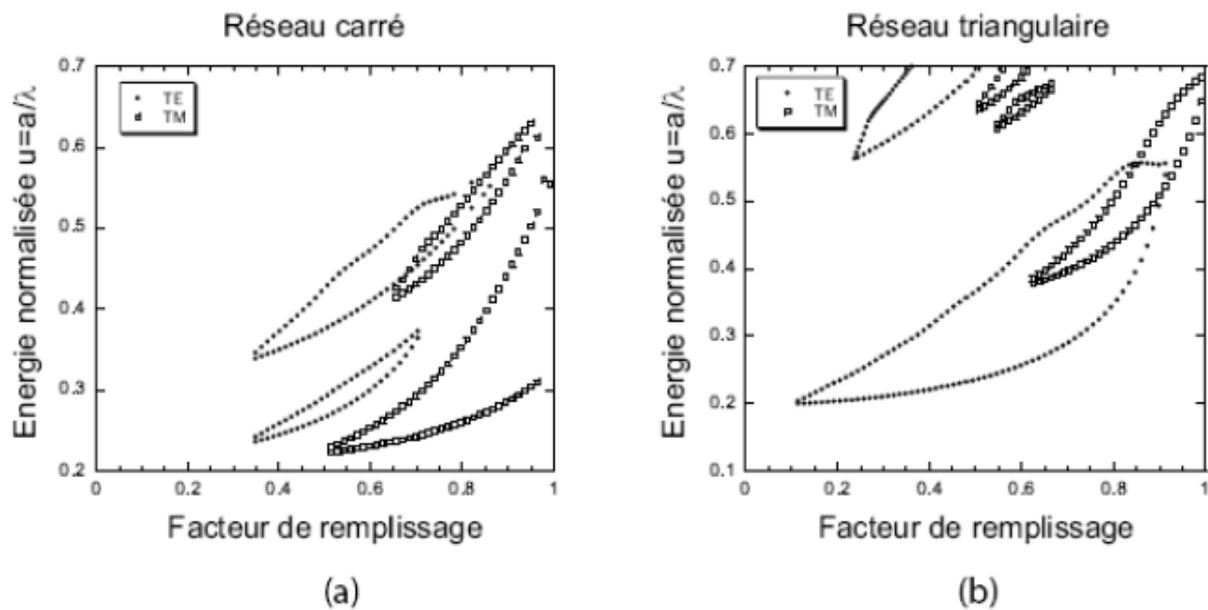


Figure I.15 : Cartes des bandes interdites d'un réseau de trous d'air dans une matrice diélectrique ($\epsilon=11.4$) : (a) Réseau carré ; (b) Réseau triangulaire [28].

I.11 La zone de Brillouin :

La première zone de Brillouin est la cellule élémentaire de l'espace réciproque où les points sont plus proches de l'origine que de tous les autres nœuds du réseau périodique. La (Figure 1.9) montre un exemple de cristaux photoniques ainsi que la zone de Brillouin Correspondante. Dans les cas 1D et 2D, la première zone de Brillouin s'obtient en traçant les médiatrices des segments joignant l'origine aux nœuds les plus proches du réseau réciproque. À partir du domaine ainsi délimité, on peut couvrir tout l'espace réciproque grâce aux translations de vecteurs $\mathbf{G} \in G$. Autrement dit, il suffit de faire évoluer \mathbf{k} dans ce domaine pour représenter l'ensemble des courbes de dispersion du cristal. Ce domaine d'évolution de \mathbf{k} peut encore être réduit en mettant à profit les symétries du cristal. Dans le cas 1D, la symétrie du cristal par rapport à l'origine a pour conséquence que, si une onde de vecteur \mathbf{k} et de fréquence ω est solution du problème, alors l'onde se propageant en sens opposé, de vecteur \mathbf{k} et de même fréquence, l'est aussi. On peut ainsi restreindre l'intervalle d'étude à $[0 ; +\pi/a]$ au lieu de $[-\pi/a ; +\pi/a]$ où a est le pas du réseau[29].

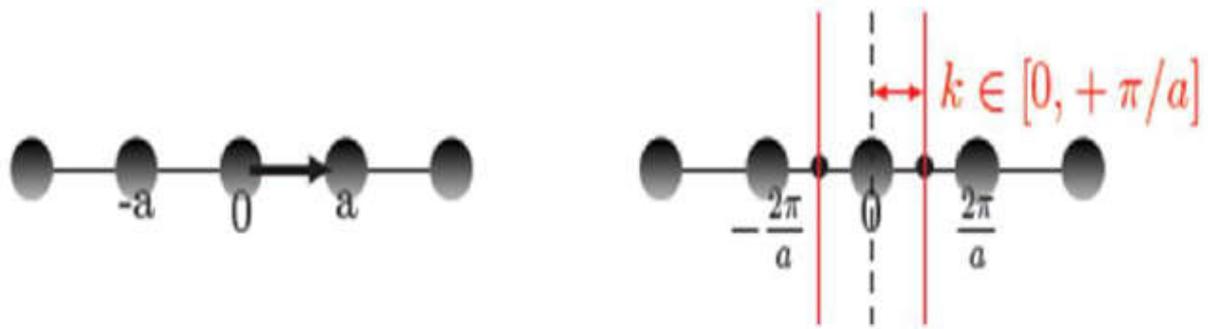


Figure 16 : Exemple de cristal photonique unidimensionnel (à gauche) et zone de Brillouin correspondante (à droite). L'intervalle $[-\pi/a ; +\pi/a]$ est la première zone de Brillouin et à $[0; +\pi/a]$ la zone de Brillouin[29].

I.12 Applications des cristaux photoniques :

Les cristaux photoniques permettent de réaliser des dispositifs optiques ou électromagnétiques capables de stocker, filtrer ou guider la lumière à l'échelle de la longueur d'onde. La plupart de ces applications sont en domaine optique, informatique, microonde et télécommunications. Nous allons décrire quelques exemples d'applications principales des cristaux photoniques comme : guides d'ondes, filtres, démultiplexeurs, fibres optiques et diviseurs.

I.12.1 Les guides d'ondes rectilignes :

I.12.1.1 Guide W_1KA en structure triangulaire :

Dans un cristal photonique bidimensionnel, la création d'un défaut est provoquée par la rupture de la périodicité diélectrique. Cette rupture provoquera l'ouverture d'une bande de fréquence autorisée dans la bande interdite photonique. La largeur et la position de cette bande permise est générée par les propriétés du défaut. Les guides d'ondes, qui sont obtenus en enlevant une ou plusieurs rangées de trous d'air d'un réseau qui peut être triangulaire ou carré, sont dans 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 μm . Une constante de réseau est de 0,48 μm 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 $\Delta x = \Delta y = 0.04 \mu\text{m}$ [23]. La structure à maille triangulaire à simuler est représentée sur la figure (I.15).

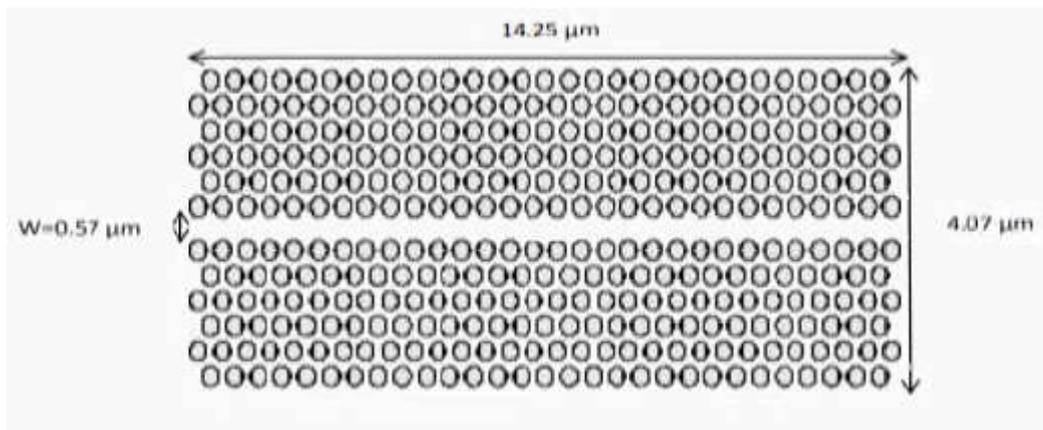


Figure I.17: Structure triangulaire d'un guide mono rangée $W_1^k A$.

En utilisant FDTD-2D la méthode des différences finies dans le domaine temporel à deux dimensions. La réponse spectrale en transmission et en réflexion du guide monorangée $W_1^k A$ est rapportée sur la figure (I.16).

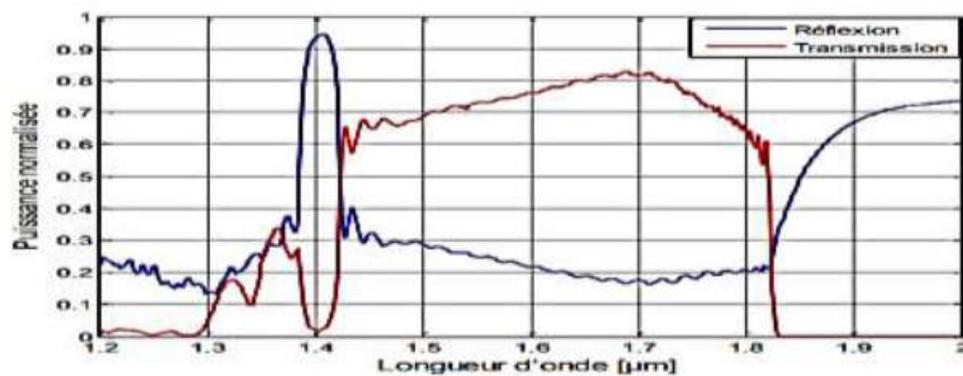


Figure I.18 : La réponse spectrale en transmission et réflexion.

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 μm . La puissance transmise en voisinage de la longueur d'onde 1,55 μm 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 [23].

I.12.2 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.18, 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 ». [24] (figure I.17).

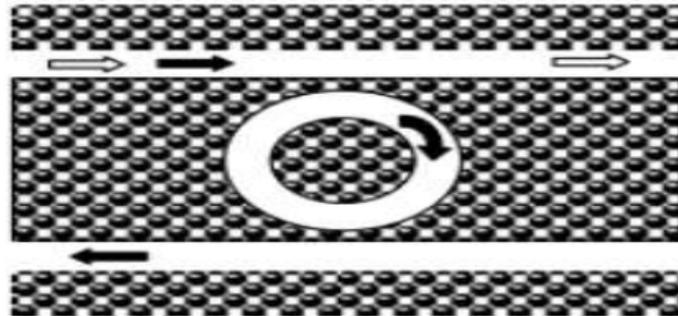


Figure I.19: Représentation d'un filtre add / drop [24].

I.12.3 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 [26].

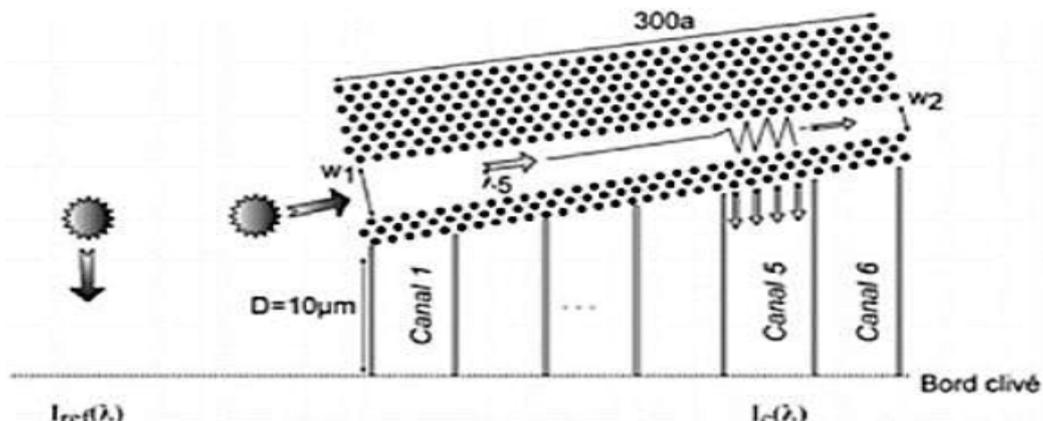


Figure I.20 : Principe de démultiplexeur spectrographe : le guide PC de largeur proche de «W3 » couple le mode fondamental au mode d'ordre supérieur uniquement dans la section où la diffraction de Bragg entre les deux modes est autorisée. Ce mode est ensuite extrait latéralement à travers les trois rangées de trous [26].

Comme le montre la figure I.20, 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.21, 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-stops band bien séparées [26].

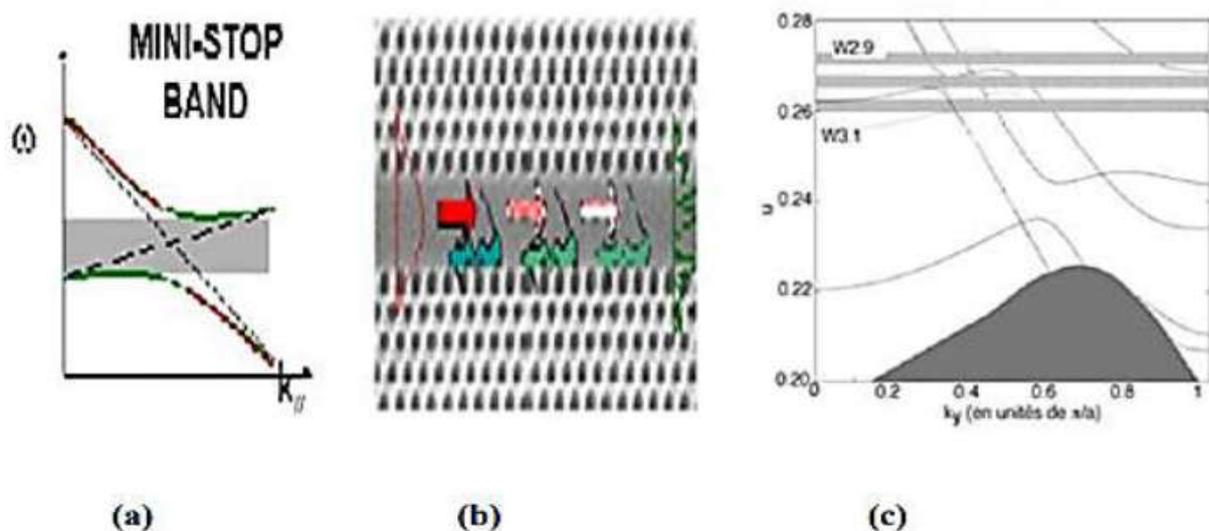


Figure I.21 : illustration de l'utilisation de la mini-stopband : (a) relation de dispersion locale, le mode fondamental étant le plus raide, le mode d'ordre supérieur le moins raide ; (b) schéma du couplage de mode dans le guide W3, (c) superposition des relations de dispersion pour des guides dont la largeur est modifiée de 0.1 rangée en plus ou moins comparé à W3 [26].

I.12.4 Le diviseur :

Le diviseur à cristaux photonique séparer et distribuer la lumière dans les différentes parties du circuit optique.

Chapitre I Généralités sur les cristaux photoniques

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

*le diviseur de type jonction T : ce type contient en un guide d'entrée juxtaposé à une portion de guide plus large et multimode. Se propage avec différente vitesse de phase conduisant à des interférences lors de la propagation avec des zones de forte et de faible intensité. Il montre l'avantage d'avoir de plus faible pertes de l'ordre de 1 à 2 dB pour des diviseurs de 1 vers 2 jusqu'à 1 vers 8.

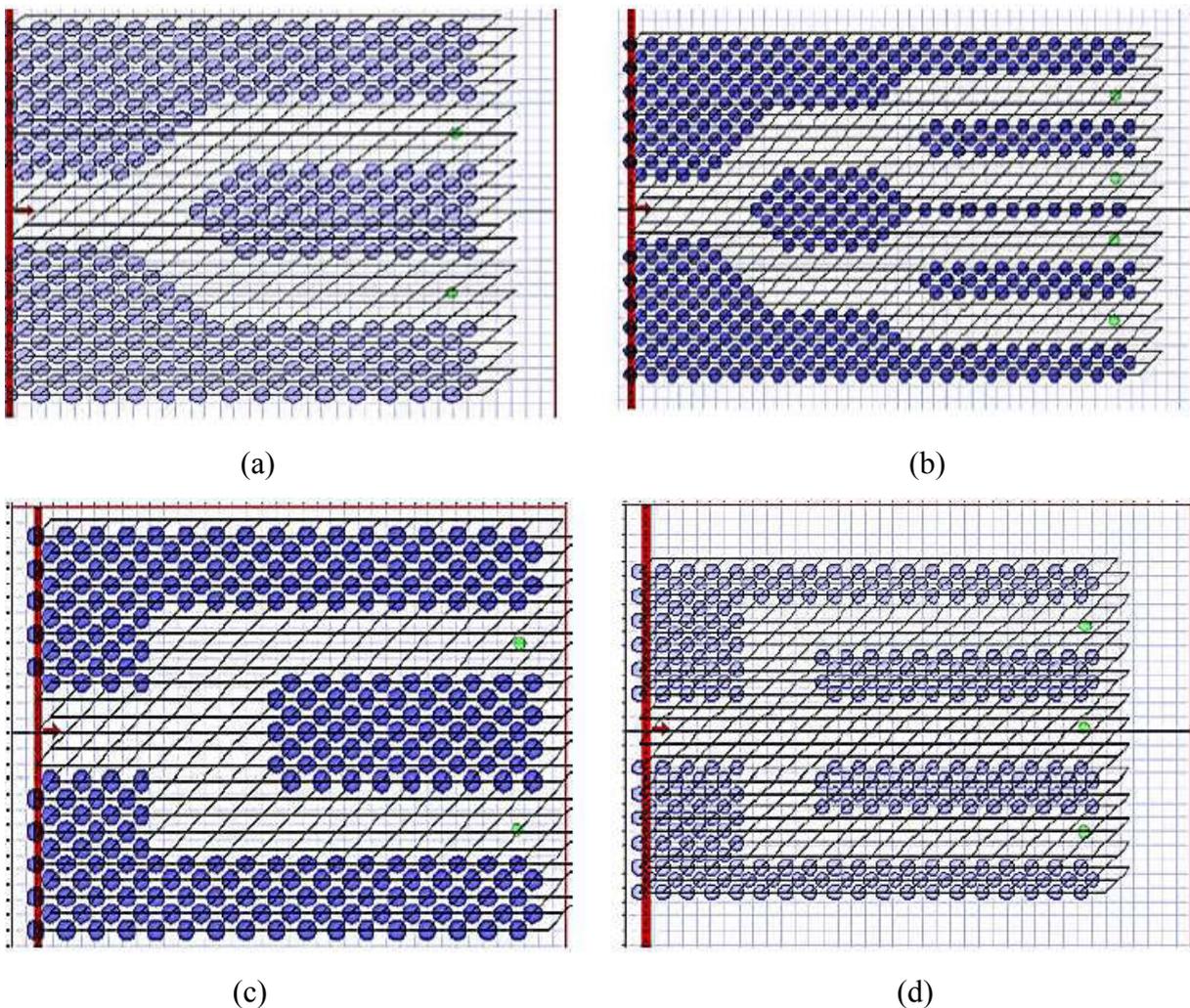


Figure I.22 : structure d'un diviseur : **(a)** 1x2 avec une jonction Y, **(b)** 1x4 avec une jonction Y, **(c)** 1x2 avec une jonction T, **(d)** 1x4 avec une jonction T [27].

I.13 Conclusion :

Les cristaux photoniques sont des structures dont l'indice de réfraction varie périodiquement dans une, deux ou trois directions.

Chapitre I Généralités sur les cristaux photoniques

Une bande interdite photonique correspond à un intervalle d'énergie où la propagation de la lumière est interdite dans certaines directions du cristal photonique.

Dans ce chapitre, nous avons étudié théoriquement les concepts généraux sur les cristaux photoniques. Nous avons commencé par l'historique et la définition des cristaux photoniques avec les différents types. Ensuite, nous avons décrit les Matériaux à bandes interdites photoniques naturels et Analogie entre l'électron et le photon. Enfin nous avons présentés les principes des défauts qui existent aux niveaux des cristaux photoniques avec quelques applications des cristaux photoniques dans les domaines.

Chapitre II

**Les circulateurs en cristaux
photoniques**

II.1 Théorie de fonctionnement du circulateur :

Un circulateur est un composant passif non réciproque, composé de 3 jusqu'à 4 ports dans lequel un signal micro-ondes ou fréquence radio entrant dans n'importe quelle porte est transmis seulement en rotation.

Dans ce cas une porte veut dire un point externe guide d'onde ou une ligne de transmission {comme un câble coaxial ou microstrip } connecter a le dispositif.

Pour un circulateur à 3 ports, un signal appliqué à la port 1 sorte seulement à la port 2, un signal appliqué à la port 2 sorte seulement à la port 3, un signal appliqué à la porte 3 sort seulement dans la port 1, comme illustrée dans la figure II.1. donc jusqu'à un facteur de phase, la matrice de diffusion pour un circulateur à trois ports idéal est :

$$S = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

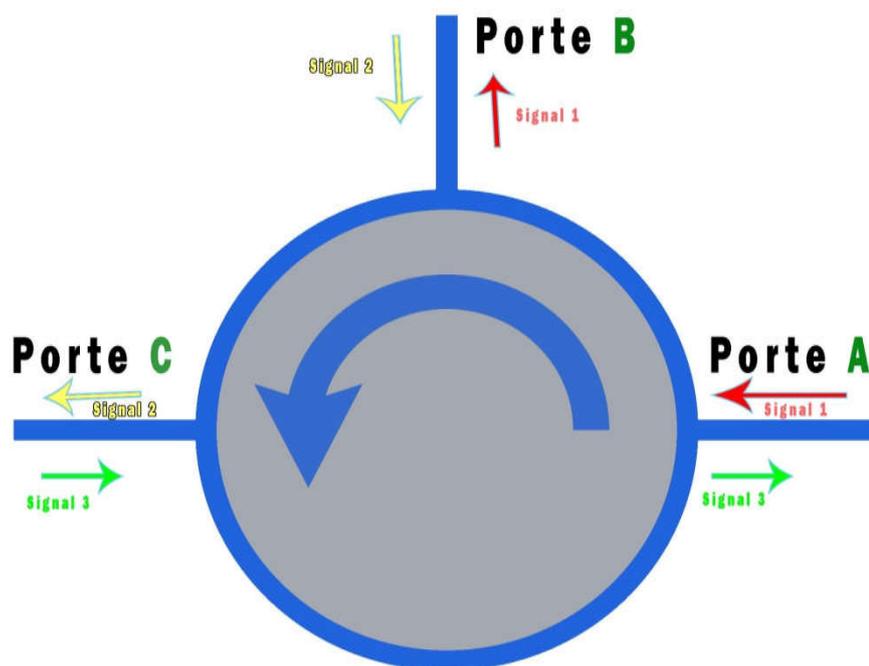


Figure II.1 : Symbole schématique standard ANSI et CEI pour un circulateur (avec chaque guide d'ondes ou port de ligne de transmission tracé comme une seule ligne, plutôt que comme une paire de conducteurs).

II.2 L'intérêt du fonctionnement d'un circulateur dans un circuit :

Avant de parler sur des domaines d'application des circulateur, on doit avant spécifier les types de ce dernier.

II.2.1 Les types des circulateurs :

On distingue deux types de circulateurs :

II.2.1.1 Ferrite :

Les circulateurs à ferrite sont des circulateurs à radiofréquence qui sont composés de matériaux de ferrite magnétisés. On peut les diviser à deux classes principales;

- Circulateurs à guide d'onde à 4 ports basés sur la rotation de Faraday des ondes se propageant dans un matériau magnétisé [31] [32].
- Circulateurs à "jonction Y" à 3 ports basés sur l'annulation d'ondes se propageant sur deux chemins différents à proximité d'un matériau magnétisé

Bien que les circulateurs en ferrite puissent fournir une bonne circulation du signal "direct" tout en supprimant considérablement la circulation "inverse", leurs défauts majeurs, en particulier aux basses fréquences, sont les tailles volumineuses et les bandes passantes étroites.

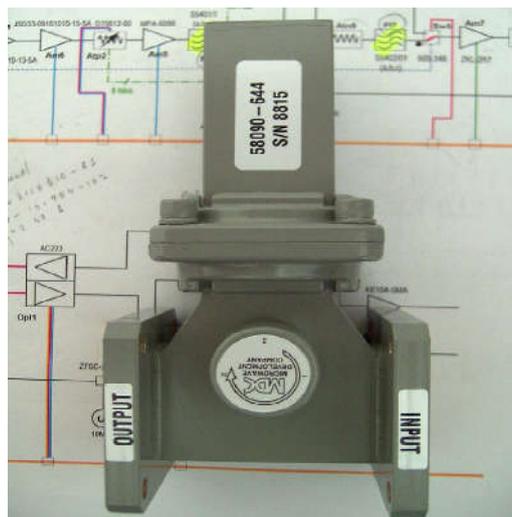
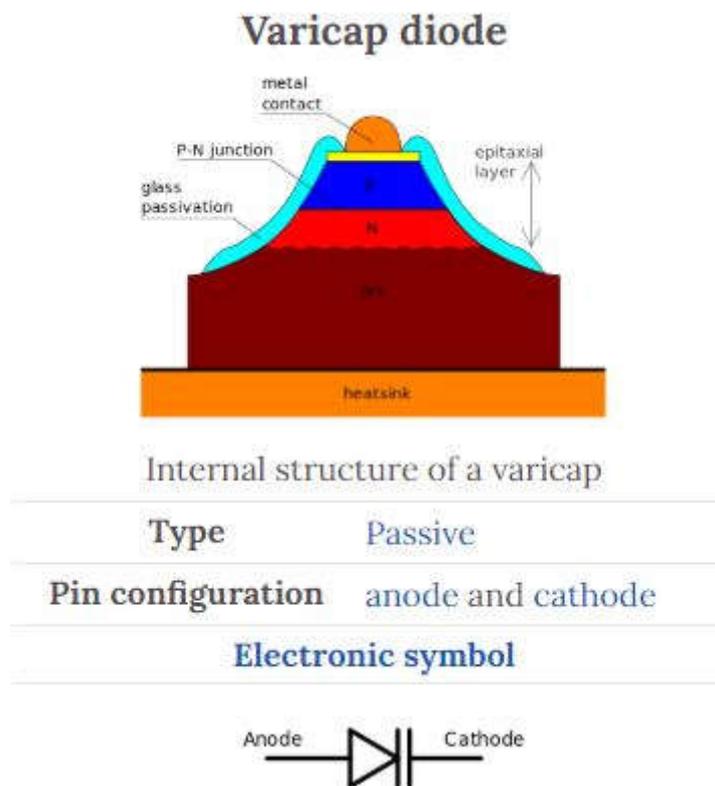


Figure II. 2 : circulateur de guide d'ondes utilisé comme isolateur en plaçant une charge adaptée sur le port 3.

II.2.1.2 Non Ferrite :

Contrairement aux circulateurs en ferrite qui sont des dispositifs passifs, les circulateurs actifs nécessitent de l'énergie. Les problèmes majeurs associés aux circulateurs actifs à transistors sont la limitation de puissance et la dégradation du signal au bruit, [33] qui sont critiques lorsqu'il est utilisé comme duplexeur pour maintenir la forte puissance d'émission et la réception nette du signal de l'antenne.

Les varactors offrent une solution. Une étude a utilisé une structure similaire à une ligne de transmission variant dans le temps avec la non-réciprocité effective déclenchée par une pompe porteuse à propagation unidirectionnelle [34] La recherche a prétendu être en mesure d'obtenir un gain positif et un faible bruit pour le chemin de réception et la non-réciprocité à large bande.



En 1964, Mohr a présenté et démontré expérimentalement un circulateur basé sur des lignes de transmission et des interrupteurs [35], En avril 2016, une équipe de recherche a considérablement étendu ce concept en présentant un circulateur à circuit intégré basé sur des concepts de filtre à N voies. [36][37] Il offre un potentiel de communication en duplex intégral (émettant et recevant en même temps avec une seule antenne partagée sur une seule

Chapitre II Les circulateurs en cristaux photoniques

fréquence). L'appareil utilise des condensateurs et une horloge et est beaucoup plus petit que les appareils conventionnels.

II.3 Applications :

II.3.1 Isolateur :

Lorsqu'un port d'un circulateur à trois ports se termine par une charge adaptée, il peut être utilisé comme isolateur, car un signal ne peut se déplacer que dans une direction entre les ports restants. Un isolateur est utilisé pour protéger l'équipement sur son côté d'entrée des effets des conditions sur son côté de sortie; par exemple, pour éviter qu'une source de micro-ondes ne soit désaccordée par une charge non adaptée.

II.3.2 Duplexeur :

Dans le radar, les circulateurs sont utilisés comme un type de duplexeur, pour acheminer les signaux de l'émetteur à l'antenne et de l'antenne au récepteur, sans permettre aux signaux de passer directement de l'émetteur au récepteur. L'autre type de duplexeur est un commutateur d'émission-réception (commutateur TR) qui alterne entre la connexion de l'antenne à l'émetteur et au récepteur. L'utilisation d'impulsions pulsées et une plage dynamique élevée peut conduire à un chevauchement temporel des impulsions émises et reçues, cependant, nécessitant un circulateur pour cette fonction.

II.3.3 Amplificateur de réflexion :

Un amplificateur de réflexion est un type de circuit amplificateur hyperfréquence utilisant des diodes à résistance différentielle négative telles que des diodes tunnel et des diodes Gunn. Les diodes à résistance différentielle négative peuvent amplifier les signaux et fonctionnent souvent mieux aux fréquences micro-ondes que les appareils à deux ports. Cependant, puisque la diode est un dispositif à un port (deux terminaux), un composant non réciproque est nécessaire pour séparer le signal amplifié sortant du signal d'entrée entrant. En utilisant un circulateur à 3 ports avec l'entrée de signal connectée à un port, la diode polarisée connectée à un second et la charge de sortie connectée au troisième, la sortie et l'entrée peuvent être découplées.

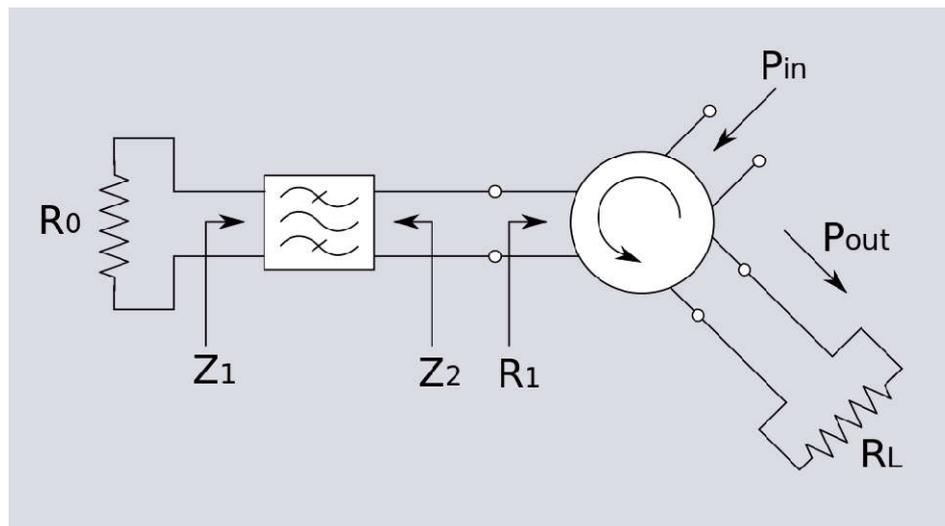


Figure II.3: Amplificateur de réflexion à diode micro-ondes utilisant un circulateur.

II.4 État de l'art sur Les circulateurs photoniques :

II.4.1 Circulateur à cristal photonique de type T avec réseau de tiges Al_2O_3 à réseau carré et bornes en ferrite $NiZn$:

Les circulateurs sont des dispositifs non réciproques utilisés généralement dans les systèmes communications.

Ils travaillent pour isoler les réflexions multiples entre les éléments ou les modules, améliorant ainsi la tolérance aux défauts de fabrication et aux fluctuations environnementales, en particulier, dans les systèmes de communication à micro-ondes et à ondes millimétriques [38-39].

Les cristaux photoniques (PC) ont attiré une attention considérable depuis leurs capacités à contrôler les mouvements photoniques.

Leur forte intégration en fait l'un des candidats prometteurs pour les futures communications optiques. En raison de leur bande interdite photonique (PBG) et de leur localisation photonique uniques, les PC peuvent être utilisés pour développer des circulateurs pour une intégration optique haute densité [40-41].

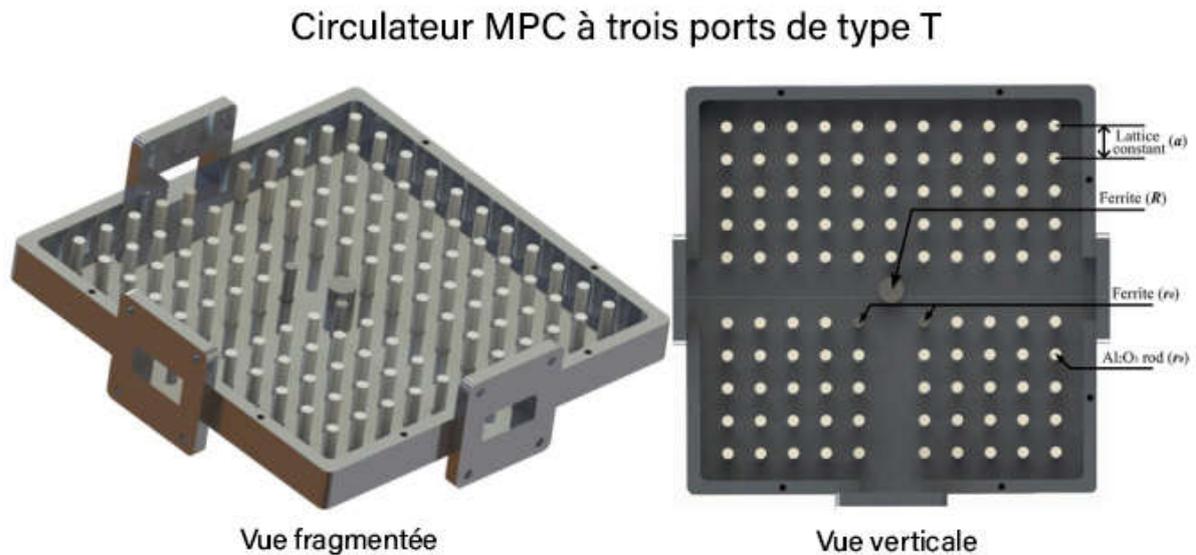


Figure II.4: Circulateur MPC à trois ports de type T.

II.4.2 Analyse théorique:

II.4.2.1 Conception du circulateur MPC :

Comme le montre la Figure II.4, notre circulateur MPC repose sur des cristaux photoniques guide d'ondes (PCW) (bleu), qui comprend une paire de guide d'ondes en métal pour fixer le réseau carré 2 dimensions (2-D) (11×11) cristaux photoniques (SLPC) (rouge). Il y a trois ports au centre des trois côtés du PCW, qui se connectent aux trois extrémités d'un passage Tshaped. Le réseau de barres diélectriques positionné avec une grande précision permet aux SLPC 2D de garantir la caractéristique PBG.

Il y a 3 poteaux en ferrite Ni-Zn dans notre circulateur MPC. L'un d'eux avec un plus grand rayon est situé à la position centrale du passage en forme de T. Le plus gros poteau de ferrite entraîné par un champ magnétique externe non agit uniquement comme une cavité résonnante, mais fournit également le degré de rotation de Faraday nécessaire. Les deux autres poteaux en ferrite de plus petit rayon sont utilisés pour remplacer deux tiges rouges les plus proches des plus gros poteaux de ferrite mais distribuées symétriquement à l'intersection du passage, qui fonctionnent pour la rotation auxiliaire.

II.4.2.2 Structure de bande de mode TE pour PCs:

Théoriquement, le PBG des PC détermine la fréquence de l'onde électromagnétique pouvant être transmises dans le PCW. Nous confirmons le PBG en analysant la structure de bande des

Chapitre II Les circulateurs en cristaux photoniques

SLPC 11×11 sans tout défaut comme indiqué sur la Figure II.6. Les matériaux SLPC sont formés par Al_2O_3 tiges en céramique marquées en rouge sur la Figure II 6. La constante de réseau des SLPC tableau est $a = 12$ mm. Le rayon des tiges en céramique Al_2O_3 est $r_0 = 2$ mm avec permittivité relative $\epsilon_a = 9.2$. La hauteur des tiges Al_2O_3 est de 10,16 mm. Avec les paramètres ci-dessus des SLPC, sa structure de bande est simulée par la méthode d'expansion des ondes planes. Sur la Figure II7, le PBG large est simulé uniquement pour les modes TE avec sa fréquence normalisée de 0,3525 ($2\pi c / a$) à 0,4687 ($2\pi c / a$), où c est la vitesse de la lumière. Quand $a = 12$ mm, le la région de fréquence normalisée correspond à une plage de 8,81 à 11,72 GHz, centré à 10,03 GHz ($a / \lambda = 0,4016$).

Sur la Figure II7, la zone bleu clair est le PBG des PC. L'autre zone hors de la PBG est une bande de conduction, dans laquelle des ondes électromagnétiques de certaines fréquences peuvent se diffuser dans les PC. En principe, les ondes électromagnétiques la plage de fréquences PBG ne peut pas traverser et reflétait la structure des PJ. Si des défauts de ligne sont introduits dans le d'abord proposé en utilisant une cavité à cristaux magnéto-photoniques (MPC), qui est conçu en introduisant un réseau de trous d'air en grenat de fer bismuth (GRAND) .

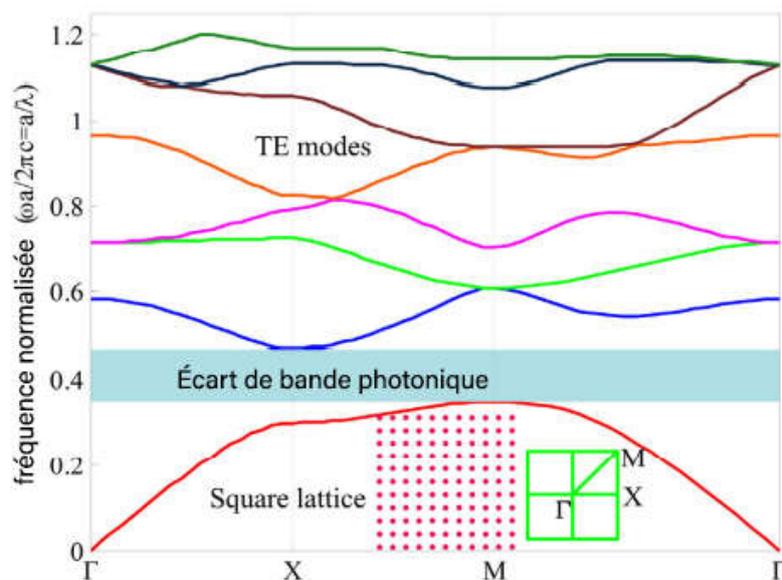


Figure II.6 :Structure de bande de mode TE des SLPC.

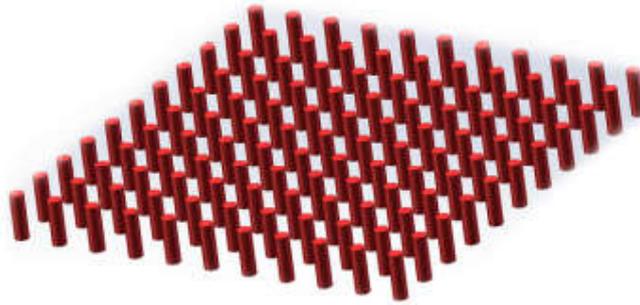


Figure II.7 : Schéma de principe des SLPC 2D.

II.4.2.3 Propriétés gyromagnétique de la ferrite :

La direction de propagation des ondes électromagnétiques est déviée dans le circulateur conçu, qui a principalement attribué au gyromagnétique propriétés du poteau central en ferrite. Dans la bande X, le gyromagnétique la propriété du poteau de ferrite magnétisé dans la direction z peut être représentée avec le tenseur de perméabilité [42].

$$[\mu_r] = \mu_0 \begin{bmatrix} \mu - jk & 0 \\ jk & \mu \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.1})$$

Les éléments μ et k peut être exprimé comme :

$$\mu = 1 + \frac{\omega_0 \omega_m}{\omega_0^2 - \omega^2}$$

(II.2)

$$k = \frac{\omega \omega_m}{\omega_0^2 - \omega^2}$$

(II.3)

Ici $\omega_0 = \mu_0 \gamma H_0$ et $\omega_m = \mu_0 \gamma M_s$. H_0 est le champ magnétique de polarisation, tandis que $\gamma = 1,759 \times 10^{11}$ C / kg et $M_s = 2,39 \times 10^5$ A / m, représentent respectivement le rapport gyromagnétique et l'aimantation à saturation.

Chapitre II Les circulateurs en cristaux photoniques

Habituellement, la fréquence centrale et la bande passante d'un circulateur de ferrite peut être conçu par une formule simple [43].

$$R = x / \{ (2\pi f_0 \sqrt{\epsilon_r} / 299.793)^2 - [(\pi / l_f) x 1.5]^2 \}^{1/2} \quad (II.4)$$

Qui décrit la relation approximative entre la taille, la permittivité relative et la fréquence d'un résonateur cylindrique en ferrite. Où R est le rayon de la ferrite centrale de hauteur l_f , tandis que $\epsilon_r = 13,5$ est la permittivité relative de la ferrite Ni-Zn. x , environ 2,4 ici, est une valeur de compromis dans [43], pour assurer une taille appropriée de la centrale Poteau en ferrite pour le passage en forme de T du circulateur conçu. En cette manière, la taille du poteau central de ferrite peut être conçue selon une fréquence centrale donnée. La fréquence de fonctionnement de notre circulateur est préférentiellement conçu pour être 10,03 GHz qui est conforme à la fréquence centrale du PBG dans la section B. Selon Eq. (4), la ferrite le rayon R du poteau est calculé à 4,7 mm avec une hauteur $l_f = 8,13$ mm.

II.4.2.4 Fonction du circulateur MPC:

Les caractéristiques de transmission et la fonction du circulateur MPC sont calculés par la méthode des éléments finis (FEM). La zone de calcul comprend environ 1,06 million de cellules de grille, qui sont entourées de conditions aux limites de diffusion (SBC). Sur la Figure II 8, les trois ports de la circulateur sont exprimés en ports A, B et C. Lorsque le port A agit comme port d'entrée, l'isolation et la perte d'insertion pour le circulateur conçu sont calculés dans la région de fréquence de 9 à 10,85 GHz. La perte d'insertion numérique du circulateur est faible à -0,081 dB à 10,03 GHz tandis que l'isolement est de -24,37 dB. Les propriétés externes de ce circulateur s'aggravent lorsque la fréquence s'écarte de 10,03 GHz. La situation de distribution de la puissance des ondes électromagnétiques dans le circulateur est simulé également à 10,03 GHz, comme indiqué au centre de la Figure II 8. Il est évident que la direction de propagation du signal se produit une rotation de 90° au niveau de la ferrite région sous l'action du champ magnétique de polarisation $H_0 = 3,5 \times 10^5$ A / m. Alors la fonction du circulateur de type T est parfaitement réalisée et le signal est transmis du port A au port B et le port C est isolé.

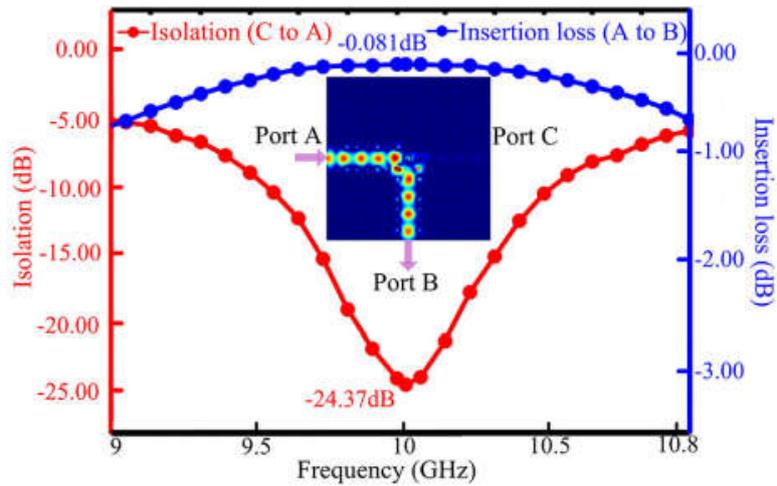


Figure II.8 : Perte d'insertion numérique et isolation du circulateur pour le signal lancé depuis le port A.

De même, lorsque les ondes électromagnétiques sont lancées depuis le port B ou C, les ondes électromagnétiques sont transmises circulairement au port C ou Port A, comme indiqué au centre de la Figure II 9 et de la Figure II 10. Les isolations numériques du circulateur atteignent respectivement -25,18 dB et -25,92 dB à 10,03 GHz tandis que les pertes d'insertion sont de -0,075 dB et -0,064 dB. Les paramètres caractéristiques externes du circulateur dans les trois cas ont la même tendance changeante avec la fréquence. La largeur de bande numérique est d'environ 350 MHz (α b -20 dB) sur la Figure II 8, ce qui est le plus étroit en les trois cas. Les résultats numériques montrent que les signaux se propagent circulairement et de manière stable dans le circulateur conçu qui présente d'excellentes performances externes.

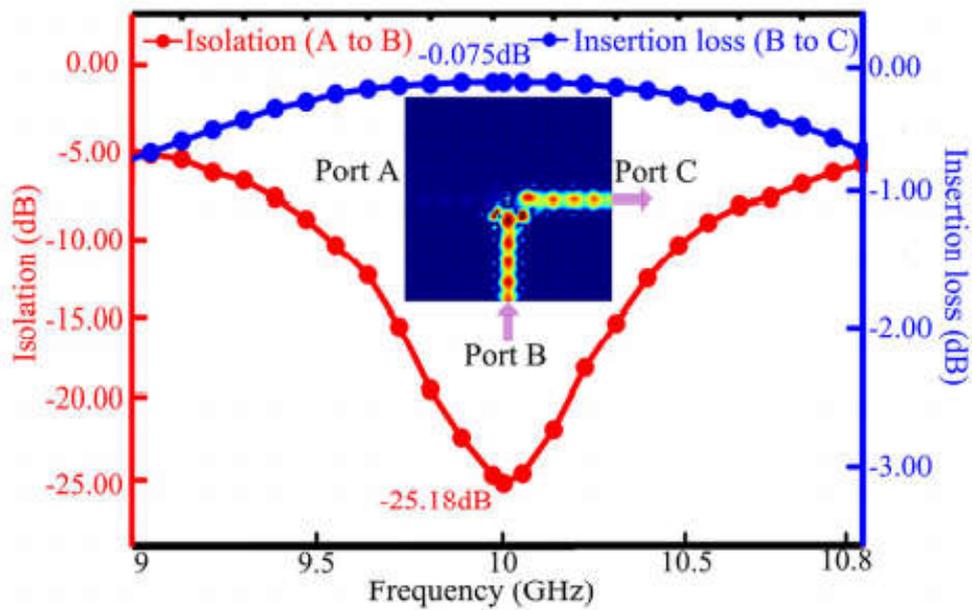


Figure II.9 : Perte d'insertion numérique et isolement du circulateur pour le signal lancé depuis le port B.

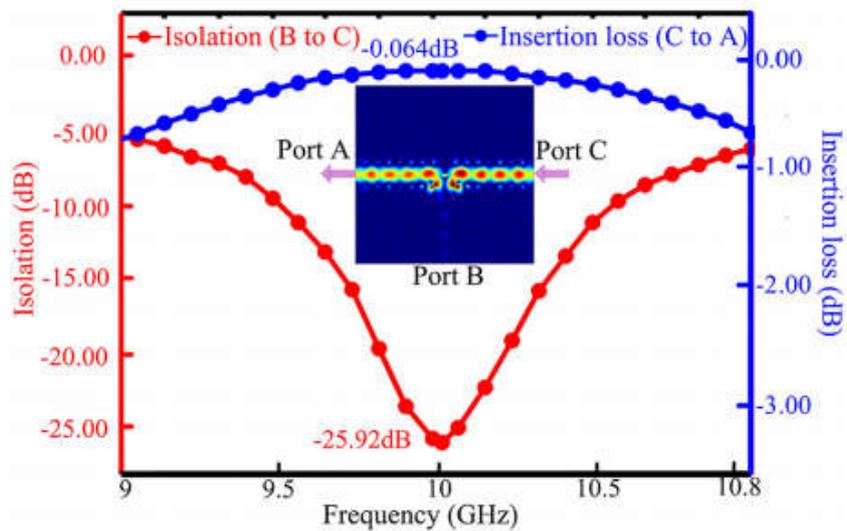


Figure II.10 : Perte d'insertion numérique et isolation du circulateur pour le signal lancé depuis le port C.

II.5 Circulateur à Cristaux Magnétophotoniques Bidimensionnel à jonction Y à faibles pertes utilisant un cylindre en ferrite:

Les cristaux photoniques, une nouvelle classe de structures artificielles constituées de matériaux diélectriques périodiques proposés pour la première fois en 1987, ont été étudiés de manière intensive [31,32]. Avec les caractéristiques spéciales de la bande interdite photonique et de la localisation photonique, les cristaux photoniques ont trouvé une large application dans les résonateurs de haute qualité, les lasers à seuil zéro, les filtres photoniques, la fibre de cristal photonique, etc. Les cristaux photoniques présentent des caractéristiques notables dans sa capacité à contrôler le mouvement de la photonique, est considéré comme le cœur du développement futur des dispositifs photoniques [33–40]. La recherche et le développement de dispositifs photoniques affectent directement le processus du domaine de la communication optique, de sorte que l'étude des cristaux photoniques a une importance importante.

Le cristal magnétophotonique est l'un des dispositifs importants dans les dispositifs intégrés photoniques. En 1997, Inoue et al. ont découvert que les films multicouches composés de magnéto-optique et de diélectrique présentent un grand effet de rotation de Faraday [40]. Par la suite, M. Inoue et al. a étudié la structure «sandwich», que le milieu est le film magnéto-optique (Bi: YIG) et des deux côtés sont des films diélectriques ordinaires. De telles structures peuvent améliorer l'effet de rotation de Faraday, mais le rapport de transmission a considérablement diminué [39–41].

Les cristaux magnéto-photoniques bidimensionnels (MPC 2D) proposés pour la première fois par Wang et Fan en 2005, sont utilisés pour concevoir un nouveau circulateur MPC 2D en utilisant la méthode FDTD et la méthode de perturbation [42]. Ensuite, Wang et al. réalisent un circulateur optique en forme de T sur la base de l'insertion de quatre cylindres de ferrite dans des MPC 2D formés par un réseau de treillis carrés de tiges diélectriques dans l'air et un circulateur en forme de Y à trois ports avec un réseau de trous d'air [18, 19].

II.5.1 Structures défectueuses dans MPCs 2D:

Plusieurs types de structures de défaut de cristal photonique magnétique bidimensionnel ont été proposés pour réaliser des circulateurs optiques à trois ports [17–19]. La figure 1 (a) montre un circulateur en forme de moulin à vent à trous d'air, et les figures 1 (b) et (c) sont un circulateur à jonction en Y à trous d'air et un circulateur en forme de T à cylindre diélectrique respectivement.

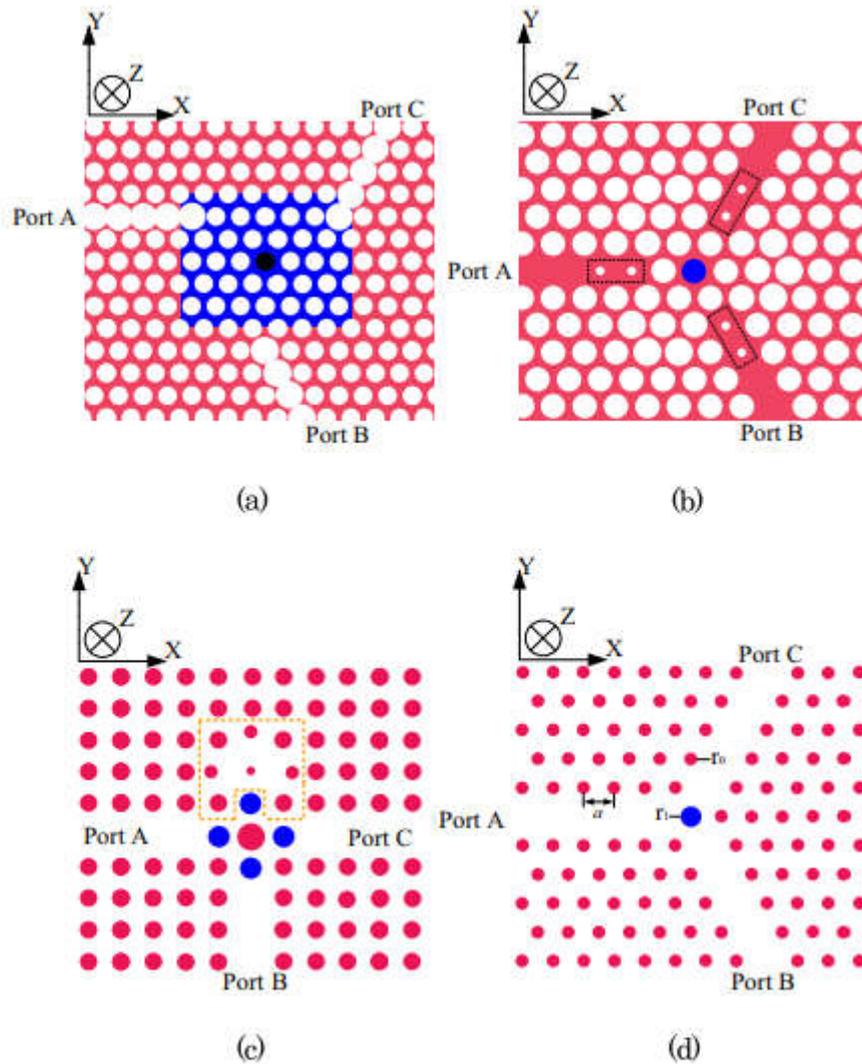


Figure II.11: Structures du circulateur 2D-MPC: (a) trous d'air en forme d'éolienne; (b) des trous d'air en forme de Y; (c) cylindre diélectrique en forme de T; (d) cylindre diélectrique en forme de Y.

Comme le montre la figure 1 (a), une structure de défaut de cristaux magnétophotoniques bidimensionnelle est formée par un réseau de trous d'air 2D en treillis triangulaire distribué dans des matériaux magnéto-optiques (BIG) [17], où les cercles blancs désignent des trous d'air et les trois rangées de trous d'air de plus grand rayon constituent trois guides d'ondes étiquetés port A, B et C. Un défaut ponctuel a été introduit dans la position centrale des MPC 2D et une micro-cavité a été formée par les six trous adjacents autour du centre. Lorsque la zone rectangulaire marquée en bleu a subi un champ magnétique CC polarisé, la structure en forme d'éolienne avec un réseau de trous d'air présente d'excellentes performances en tant que circulateur unique.

Chapitre II Les circulateurs en cristaux photoniques

Sur la base d'un réseau de tiges en treillis carré étiqueté en rouge, représenté sur la figure 1 (c), la structure est formée en introduisant un défaut de pointe plus léger au centre et en implantant quatre tiges de ferrite autour du défaut de point central. Dans la boîte en pointillés de la figure 1 (c), une cavité réfléchissante entourée par plusieurs tailles différentes de barres de rayon peut réfléchir la lumière incidente le long du trajet d'origine. En utilisant cette conception ci-dessus, un circulateur cruciforme à quatre orifices ou en forme de T à trois orifices peut être obtenu [19]. Les résultats numériques montrent qu'il y a une plus grande amélioration pour l'isolation (au-dessus de 25 dB) et la perte d'insertion de ce circulateur, mais la bande passante est encore étroite.

II.5.2 Bande interdite photonique et analyse du champ de mode du défaut ponctuel :

Afin d'obtenir des résultats numériques plus précis et plus fiables, les paramètres de structure détaillés du circulateur de la Figure II.11(d) [19]. Le rayon du cylindre diélectrique est $r_0 = 0.18a$ avec $a = 11.25$ mm étant la constante de réseau et le fond est de l'air. Le cylindre diélectrique a choisi un matériau céramique à plus faible perte [20] et l'indice de réfraction est $n_0 = 3.4$.

Sans champ magnétique CC externe, la bande interdite du mode TE pour les cristaux photoniques à réseau triangulaire 2D est calculée par la méthode d'expansion d'onde plane et est exprimé comme la gamme de fréquences normalisée $0.2385 (2\pi c/a) \sim 0.4216 (2\pi c/a)$, représenté sur Figure II.12, où c est la vitesse de la lumière. Par rapport au réseau de tiges de réseau carré de la figure 1 (c), il existe une bande interdite plus élémentaire dans le réseau de tiges de réseau triangulaire. Dans cette gamme de fréquences, les ondes électromagnétiques seront limitées à une propagation stable dans le guide d'ondes de défaut de ligne. Pendant ce temps, les modes du résonateur à cylindre sont calculés par la méthode des éléments finis sans aucun champ magnétique CC, illustré à la figure 3, où le rayon du cylindre de ferrite central est $r_{r1} = 1.60$. Dans ce calcul, les conditions aux limites utilisent les conditions aux limites de diffusion (SBC) et l'air autour du cylindre de ferrite peuvent être considérés comme infinis. Les résultats numériques ont montré que le résonateur à cylindre peut supporter une paire de modes dégénérés dipolaires avec la même fréquence centrée normalisée $0.4216 (2\pi c/a)$ dans la littérature [19], comme mode impair $|o\rangle$ et mode pair $|e\rangle$, illustré à la Figure II.13(a) et (b), respectivement. La direction de polarisation des deux modes est mutuellement

Chapitre II Les circulateurs en cristaux photoniques

perpendiculaire avec des lignes imaginaires orange représentant les directions de polarisation, représentées sur la Figure II.13, respectivement. Lorsqu'un champ magnétique continu le long de la direction de l'axe z est appliqué sur le matériau magnéto-optique, un couplage entre les modes $|e\rangle$ et $|o\rangle$ a lieu.

II.6 Circulateur 2D-MPCS à jonction Y à faibles pertes:

Sur la base de la même fréquence de résonance et des mêmes modes avec la littérature [19], la fonction et les caractéristiques externes du circulateur seront simulées et calculées par la méthode des éléments finis ici.

Il est nécessaire de revenir sur les propriétés de base des matériaux magnéto-optiques avant le calcul. En bande hyperfréquence, la caractéristique gyromagnétique du matériau magnéto-optique magnétisé dans la direction de l'axe z peut être exprimée en perméabilité tenseur:

$$\vec{\mu} = \begin{bmatrix} \mu_r & i\kappa & 0 \\ -i\kappa & \mu_r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

où μ_r et κ sont au pluriel en raison de la discussion du matériel avec perte dans ce court article. Le symbole de l'élément hors diagonale κ est déterminé par la direction du champ magnétique CC externe et la force de l'effet gyromagnétique de Faraday est mesurée par le facteur de qualité $Q = \kappa / \mu_r$.

Les éléments de perméabilité tenseur utilisant le type de Hilbert sont exprimés comme suit [19]:

$$\mu_r = 1 + \omega_m (\omega_0 + i\alpha\omega) / [(\omega_0 + i\alpha\omega)^2 - \omega^2] \quad (II.6)$$

$$\kappa = \omega_m \omega / \left[(\omega_0 + i\alpha\omega)^2 - \omega^2 \right] \quad (3)$$

$$\omega_0 = \mu_0 \gamma H_0 \quad (4)$$

$$\omega_m = \mu_0 \gamma M_s \quad (5)$$

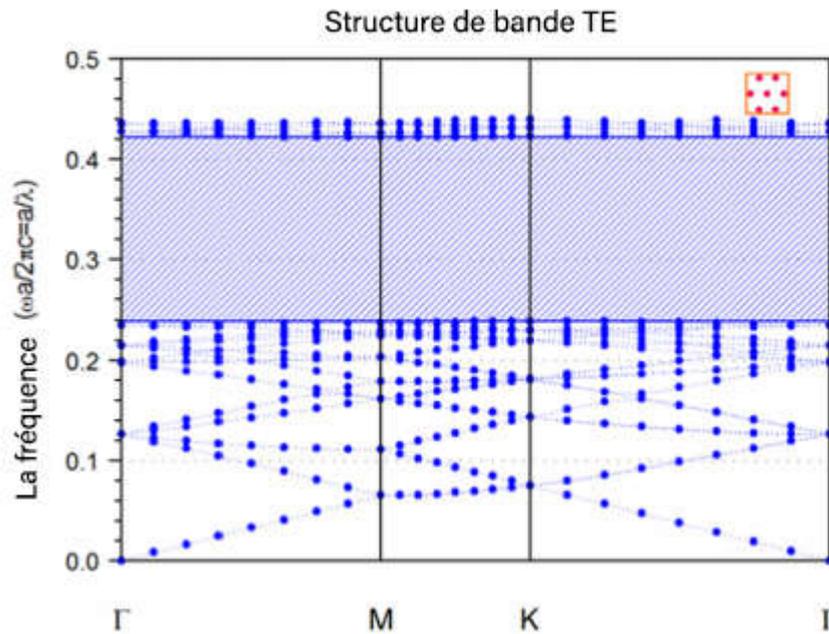


Figure II.12: Bande interdite pour les cristaux photoniques à réseau triangulaire

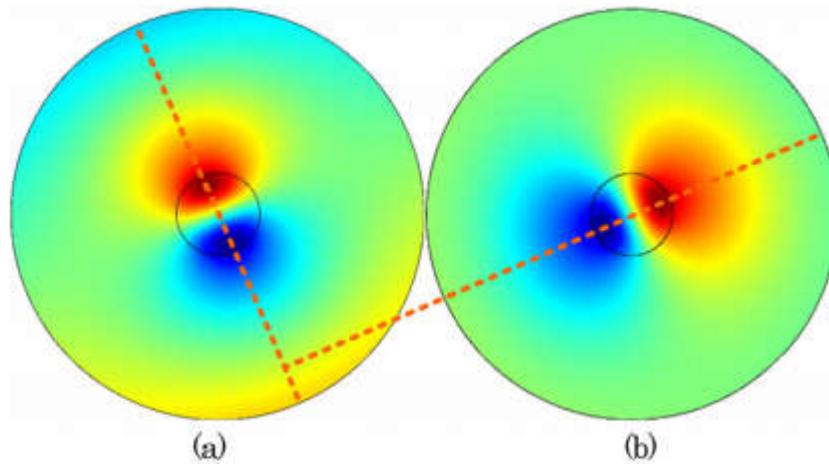


Figure II.13: Distribution de champ EZ pour les modes doublement dégénérés en micro-cavité formée par un défaut ponctuel: (a) mode impair; (b) mode pair.

où le rapport gyromagnétique est $\gamma = |e/m| = 1.759 \times 10^{11} \text{ c/Kg}$ et la magnétisation à saturation est $M_s = 2.39 \times 10^5 \text{ A/m}$ et le coefficient de perte est $\alpha = 3 \times 10^{-5}$

Chapitre II Les circulateurs en cristaux photoniques

Lorsque le coefficient de perte est $\alpha = 0$, les formules (2) - (5) sont présentées dans la littérature [21] et lorsqu'elles fonctionnent en ondes millimétriques et en bande térahertz, des cylindres de ferrite gyromagnétiques Al – Ni – Zn sont envisagés [21].

Sous champ magnétique externe $H_0 = 2.905 \times 10^5$ A / m appliqué le long de la direction z dans la zone centrale, la région calculée est divisée en environ 100000 cellules de grille et est entourée de couches parfaitement appariées (PML) avec une double épaisseur de constantes de réseau. Comme le montre la Figure II.14, la fonction du circulateur et la propagation du champ électromagnétique sont simulées à la fréquence de fonctionnement de $0.4132(2\pi c/a)$ par la méthode des éléments finis. la Figure II.14(a) montre que l'onde électromagnétique lancée depuis le port A est presque moyennée et totalement transmise au port B (le port de sortie) et isolant le port C (le port isolé) sans DC externe.

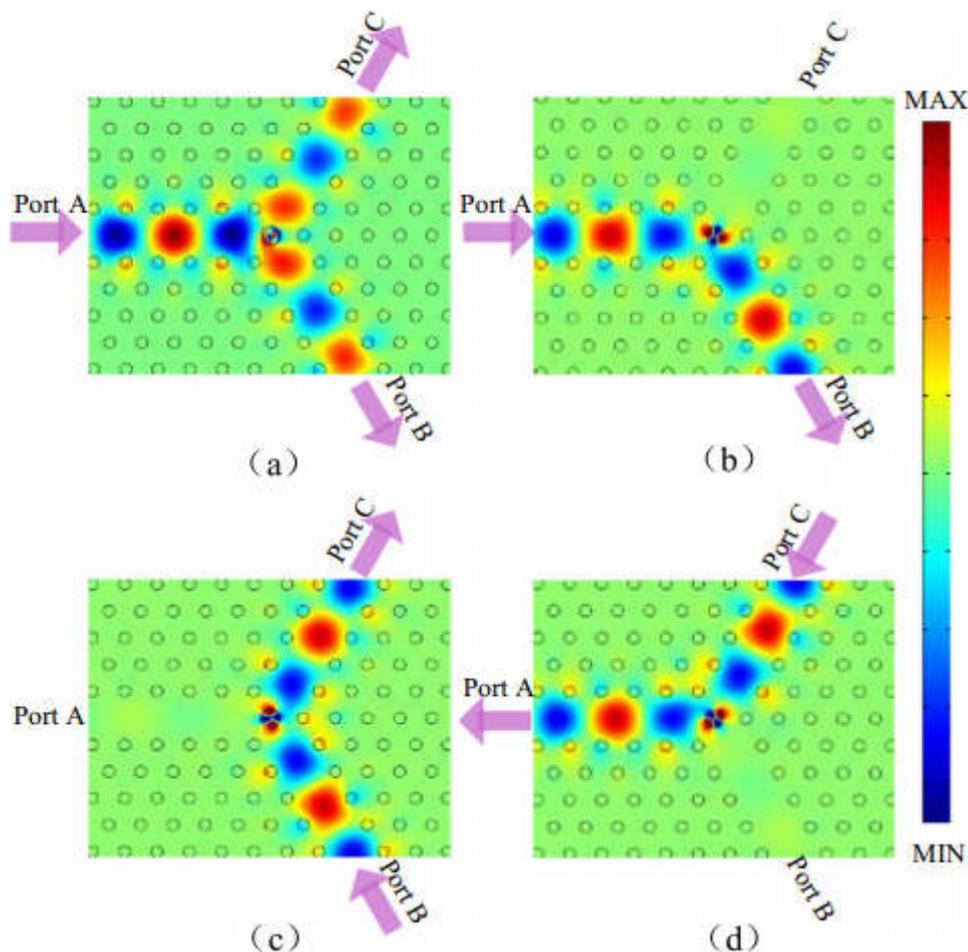


Figure II.14 : Propagation électromagnétique dans un circulateur MPC 2D: (a) propagation électromagnétique sans champ magnétique externe; (b – d) propagation électromagnétique avec champ magnétique externe.

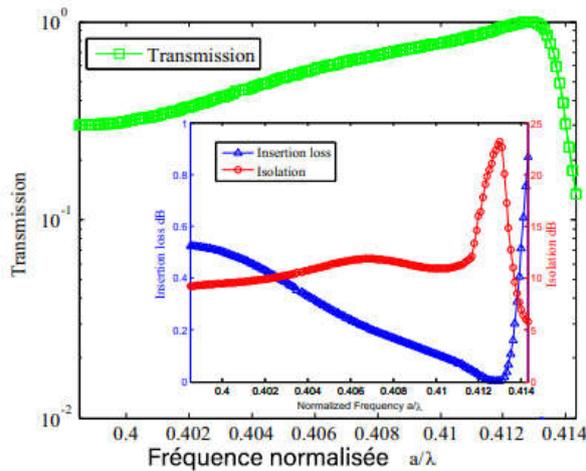


Figure II.15: Caractéristiques externes du circulateur. rapport à ceux de la littérature [19].

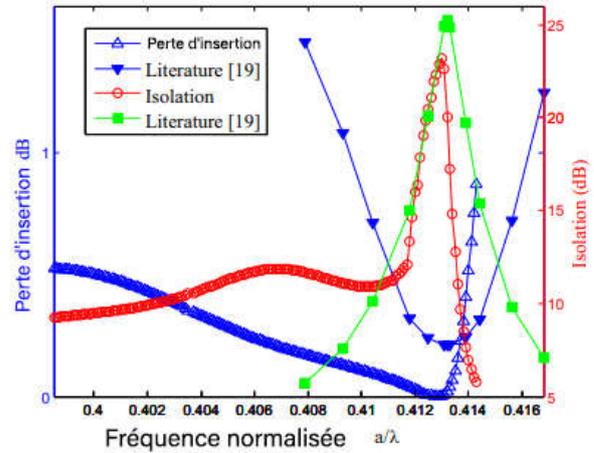


Figure II.16: Perte d'insertion et isolement par rapport à ceux de la littérature [19].

Et la Figure II.14(b) montre que les modes doublement dégénérés ont lieu par couplage dans la zone de ferrite et que le front d'onde génère un angle de déviation de Faraday de 120° , de sorte que l'onde électromagnétique lancée depuis le port A est transmise au port B et isolant le port C, de manière analogue sur la Figure II.14(c) et (d).

Ensuite, les paramètres caractéristiques externes du circulateur sont étudiés en modifiant la fréquence de l'onde électromagnétique incidente. Lorsque le signal est lancé à partir de l'un des trois ports (Port A, B, C), nous recueillons l'énergie du signal aux deux autres ports et calculons la perte de transmission, d'isolation et d'insertion du circulateur, illustrée à la Figure II.15.

Les résultats numériques montrent que la transmission du circulateur atteint max et qu'il n'y a pratiquement aucune perte d'énergie entre le port de sortie et le port d'entrée à la fréquence centrale de $a/\lambda = 0.4132$. Pendant ce temps, l'isolation et la perte d'insertion atteignent 23,2 dB et 0,0037 dB, respectivement. Lorsque la fréquence s'écarte de la fréquence centrale, l'efficacité de la transmission diminue progressivement avec l'augmentation du décalage de fréquence. On le voit sur la Figure II.15, la tendance de variation des paramètres caractéristiques pour chaque côté de la fréquence centrale est significativement différente: au-dessus de la fréquence centrale, les performances du circulateur se détériorent fortement parce que la fréquence se rapproche extrêmement de la limite supérieure de la bande interdite de $0.2385(2\pi c/a) \sim 0.4216(2\pi c/a)$; sous la fréquence centrale, les paramètres caractéristiques changent lentement avec une fréquence décroissante progressivement en raison de la large bande interdite. Ainsi, il existe une large bande passante de fonctionnement à gauche de la

Chapitre II Les circulateurs en cristaux photoniques

fréquence centrale dans la bande interdite, dans laquelle une isolation supérieure à 10 dB et une perte d'insertion inférieure à 0,5 dB.

Les tendances globales de variation de l'isolement et de la perte d'insertion avec la fréquence dans cet article ont un accord favorable avec les résultats numériques illustrés à la Figure II.16. Où, le trait plein du triangle inversé et le carré représentent la perte d'insertion et l'isolement dans le troisième cas, respectivement. Une légère différence est que: lorsque la fréquence de l'onde électromagnétique incidente augmente à partir de la fréquence centrale, l'isolement et la perte d'insertion se détériorent fortement ici; mais les paramètres correspondants changent avec la fréquence de manière homoplastique de chaque côté de la fréquence centrale. En raison de la structure de réseau différente: la bande interdite du réseau triangulaire est différente du résultat correspondant du réseau carré; lorsque la fréquence se rapproche de la limite supérieure de la bande interdite, l'effet de localisation de la lumière détruit entraîne une forte détérioration des performances du circulateur; les deux côtés de la fréquence centrale ont une large bande [19].

En comparant la valeur de crête de l'isolement et de la perte d'insertion entre nos résultats numériques, une faible perte d'insertion de 0,0037 dB est obtenue dans notre Figure II.11(d), il y a quatre tiges de ferrite et le centre un défaut de la Figure II.11(c) peut entraîner une perte d'énergie supplémentaire. Le maximum d'isolement dans cet article est de 23,2 dB, soit moins que le résultat optimal du troisième, mais supérieur à 23 dB dans le premier chemin de transmission [19]. En utilisant la structure similaire, l'isolation maximale de 65,2 dB a été obtenue dans la littérature [22].

II.7 Circulateur 2D-MPCS en forme de Y de 3 cm :

Afin de vérifier nos résultats numériques du circulateur, un circulateur 2D-MPC en forme de Y de 3 cm est développé en mettant à l'échelle le rayon du cylindre de ferrite central.

Dans la section précédente, le circulateur fonctionne à la fréquence normalisée $a/\lambda = 0.4132$, la longueur d'onde correspondante est d'environ 27,23 mm. Théoriquement, il est nécessaire d'agrandir légèrement le rayon r_1 du cylindre de ferrite central pour réaliser une longueur d'onde de fonctionnement de 3 cm. Le résultat numérique montre que lorsque r_1 est augmenté à $1.644r_0$, le circulateur est obtenu sur la Figure II.17, et la fréquence centrale correspondante est $a/\lambda = 0.375$. La propagation du champ électromagnétique dans le circulateur MPC 2D est déjà discutée dans la section 4 et ne sera pas répétée. On voit

Chapitre II Les circulateurs en cristaux photoniques

évidemment que la longueur d'onde de la Figure II.17 est sensiblement croissante par rapport à celles de Figure II.14.

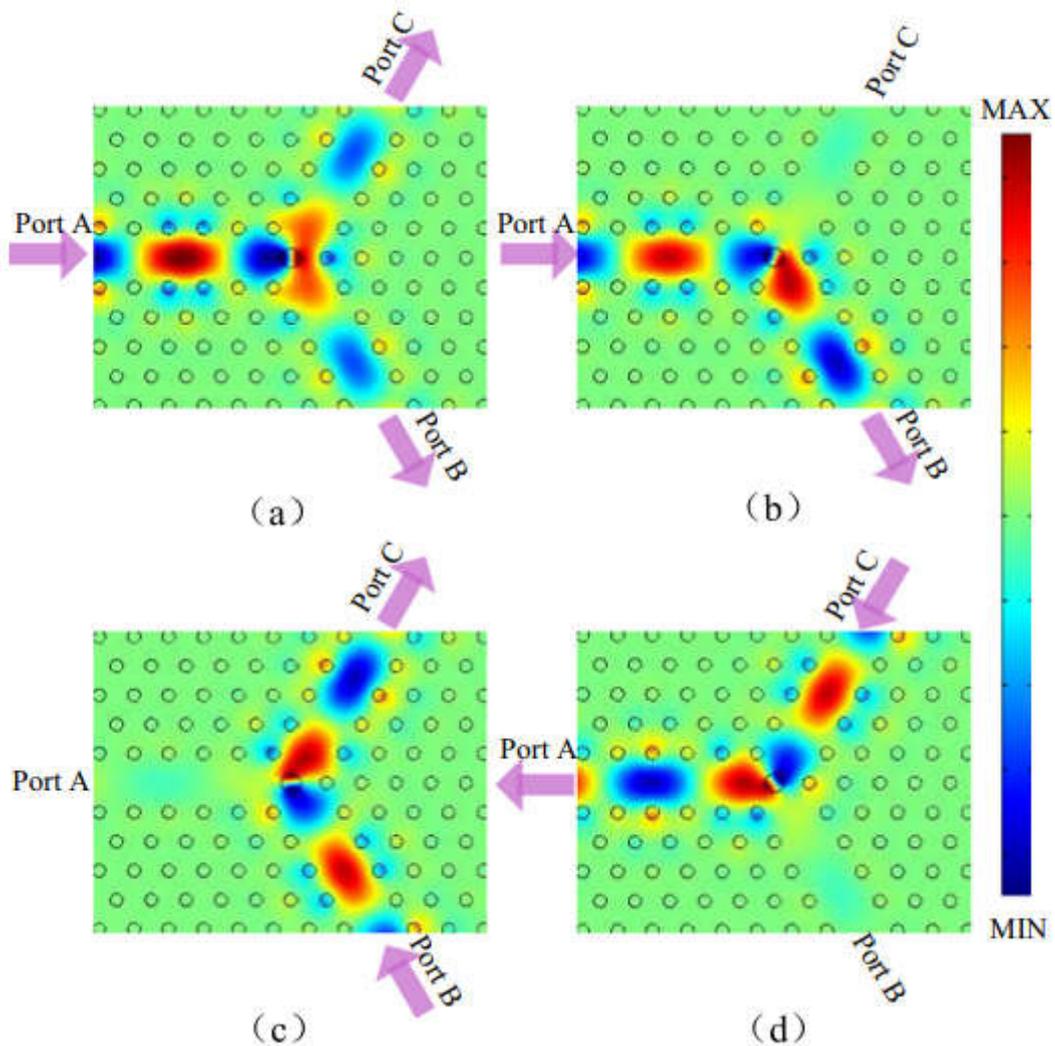


Figure II.17: Propagation électromagnétique dans un circulateur MPC 2D de 3 cm: (a) propagation électromagnétique sans champ magnétique externe; (b – d) propagation électromagnétique avec champ magnétique externe.

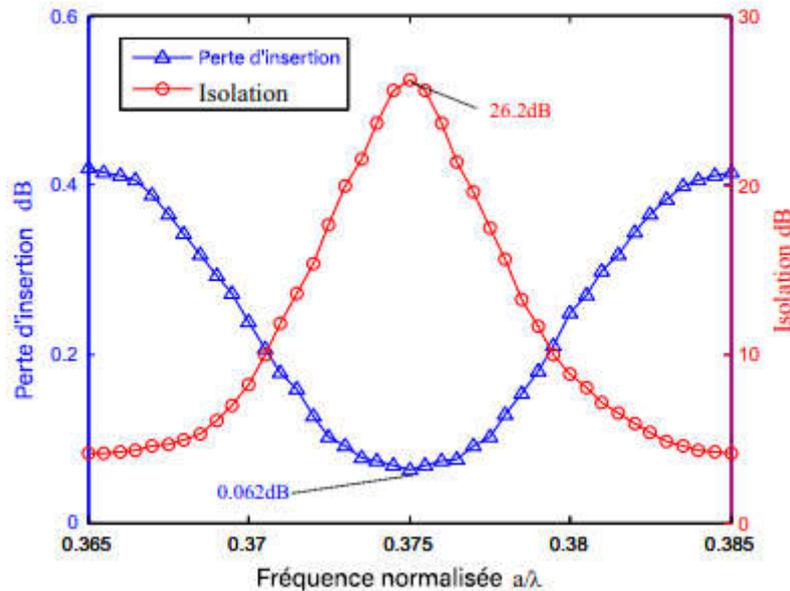


Figure II.18: Perte d'insertion et isolation du circulateur MPC en Y de 3 cm.

Lorsque le champ magnétique CC externe est $H_0 = \times 2.85 \cdot 10^5$ A/m, l'isolation optimale et la perte d'insertion sont illustrées sur la Figure II.18, où, l'isolation est jusqu'à 26,2 dB et la perte d'insertion est de 0,062 dB.

Pendant ce temps, l'isolement et la perte d'insertion ont des tendances de variation similaires avec la fréquence de chaque côté de la fréquence centrale $a/\lambda = 0.375$, puisque la grande bande interdite existe des deux côtés de 0,375. Les résultats légèrement différents entre la section 4 et la Figure II.16 [19] sont expliqués de manière appropriée.

II.8 Conclusion:

Une nouvelle structure de défaut de cristal magnéto-photonique bidimensionnel est donnée et un nouveau circulateur à jonction Y à trois ports utilisant un cylindre de ferrite est envisagé dans ce Chapitre. Sur la base des accords entre la fréquence de résonance de la micro-cavité construite par un défaut ponctuel dans le cristal photonique à réseau triangulaire 2D et les résultats numériques des littératures correspondantes, les caractéristiques externes du circulateur ont été calculées par la méthode d'expansion des ondes planes et la méthode des éléments finis. De plus, un circulateur MPC en forme de Y de 3 cm est développé avec l'isolation la plus élevée de 26,2 dB. Les résultats montrent qu'il existe une amélioration significative de la perte d'insertion et de l'isolement par rapport à ceux des littératures.

Les résultats numériques ont montré que la structure conçue du circulateur non seulement surmonte le faible isolement du déficit de la structure du trou d'air[14,18], mais résout

Chapitre II Les circulateurs en cristaux photoniques

également le problème de la faible perte d'insertion élevée de plusieurs cylindres dans la littérature [19]. En ce qui concerne le circulateur, il faut noter que la structure est relativement simple et que le procédé est facile à mettre en œuvre. Pendant ce temps, un seul cylindre de ferrite au centre agit comme une cavité résonnante et fournit une rotation de Faraday suffisante, ce qui permet de réduire considérablement la perte d'insertion, faible jusqu'à 0,0037 dB. Le circulateur est à large bande dans toute une gamme de fréquences, l'isolation est supérieure à 10 dB et la perte d'insertion est inférieure à 0,5 dB. Enfin, mais non des moindres, le circulateur peut être obtenu à différentes fréquences de fonctionnement en modifiant de manière flexible le rayon du cylindre de ferrite central dans la bande interdite photonique.

Chapitre III

**Présentation des résultats de
simulation**

III.1 Introduction

La complexité de la fabrication et de la caractérisation des cristaux photoniques aux fréquences optiques rend coûteuses en temps et argent les études expérimentales systématiques sur des dispositifs des cristaux photoniques. Le développement des méthodes de modélisation optiques précises et rapides reste donc primordial pour l'étude de ces structures. Plusieurs méthodes ont été envisagées, comme la méthode FDTD, des ondes planes, la matrice de transfert, pour la modélisation des CPs.

Un circulateur est un dispositif passif et non réciproque à trois ou quatre ports, dans lequel un signal micro-ondes ou radiofréquence entrant dans un port est transmis au port suivant en rotation (uniquement).

Ce chapitre est réservé à la présentation des résultats de simulation de circulateur, Nous allons effectuer la simulation 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 Multi-physiques 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.

Le logiciel COMSOL version 5.4 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.

Chapitre III Présentation des résultats de simulation

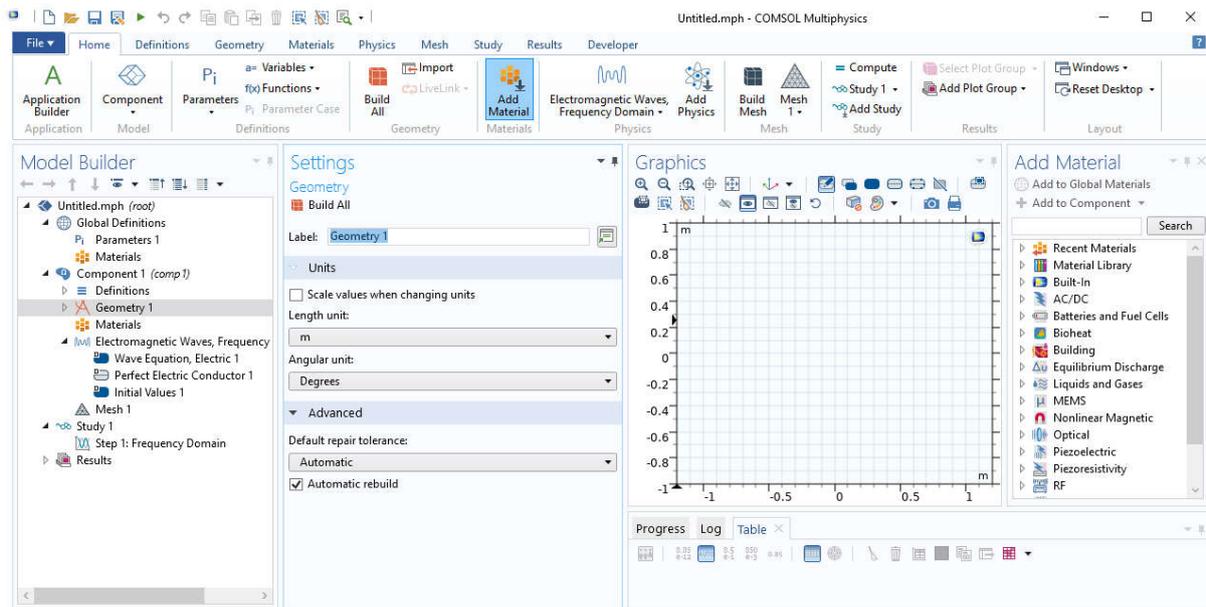


Figure III. 1 : Présentation du software COMSOL Version 5.4 utilisé pour la simulation.

III.3 Présentation des résultats de simulation :

L'objectif de ce chapitre consiste à déterminer les caractéristiques de transmission d'une structure d'un circulateur avec certain cahier de charge. Pour la réalisation des circulateurs en cristaux photoniques nous sommes intéressés par les guides pour la fabrication de virages aigus à fort taux de transmission ou de fonctions de circulateur. Pour notre projet, l'étude est portée sur une structure photonique à 2D 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 ($a=0.6 \mu\text{m}$).

K : le rayon normalisé de la tige (0.2) avec $k=r/$.

r : le rayon de tiges

III.3.1 Les guides ondes :

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 :

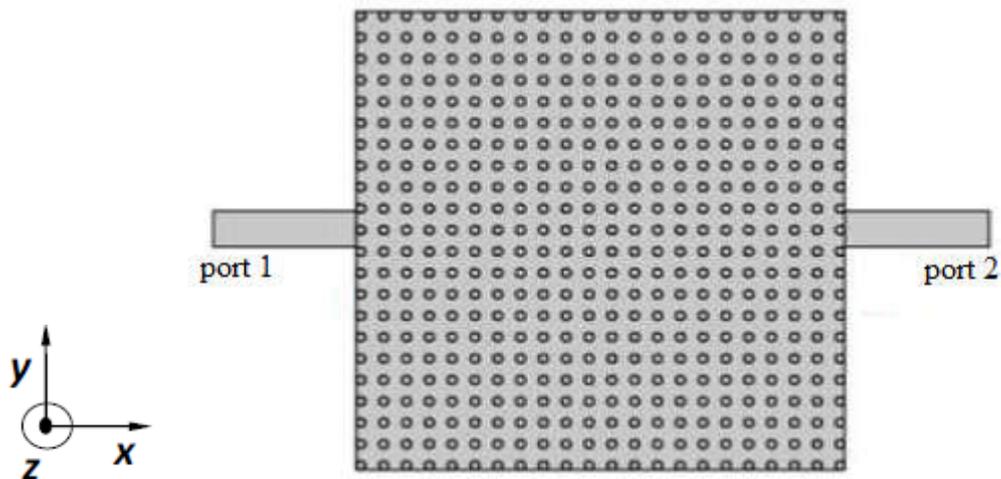


Figure III. 2: Représentation schématique d'un CP-2D déconnecté sans défaut à motif carré.

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.

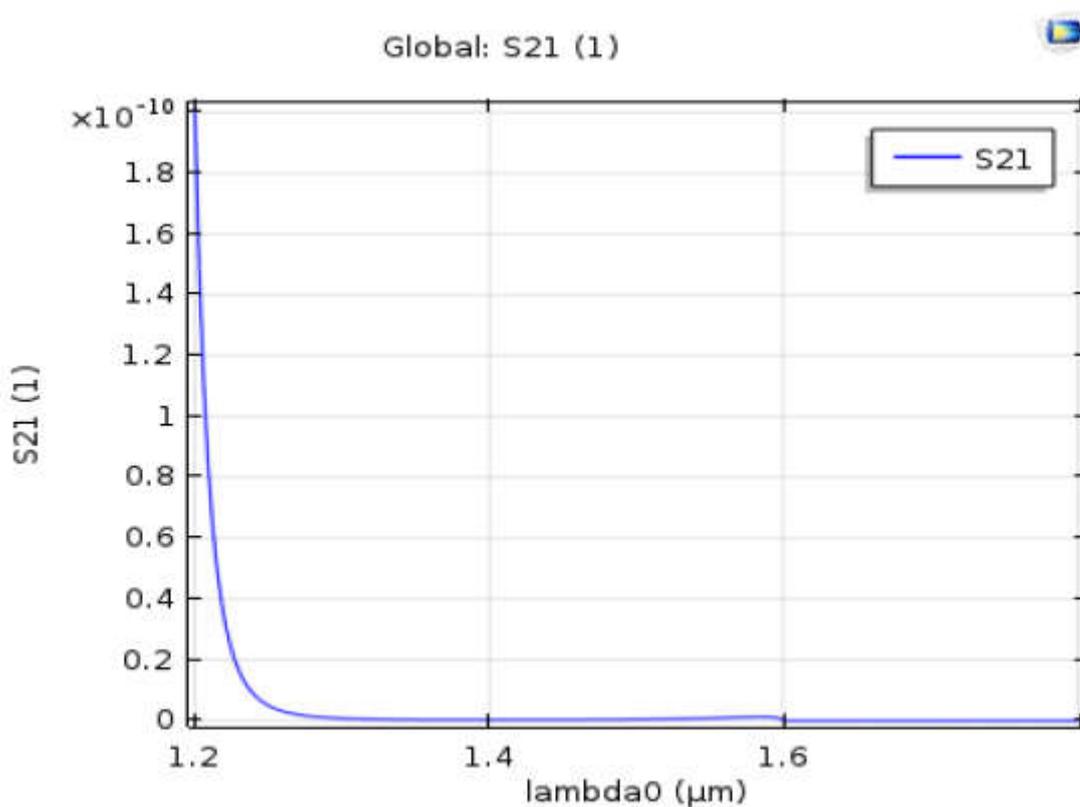


Figure III.3: Réponse spectrale de transmission d'un CP-2D déconnecté sans défaut à motif carré.

La figure III. 4 illustre la cartographie du champ électrique E_z le long de la structure.

Chapitre III Présentation des résultats de simulation

On remarque nettement l'absence du phénomène de guidage de l'onde électromagnétique.

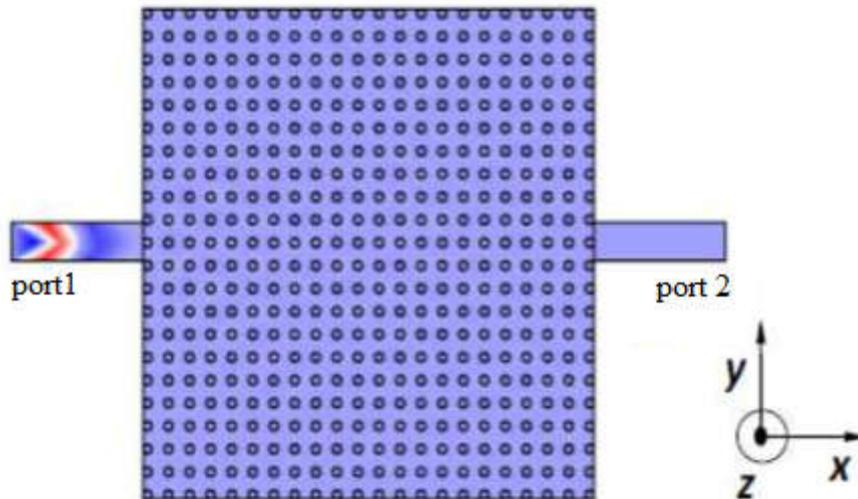


Figure III. 4 : Illustration de la propagation du champ électrique E_z dans un cristal photonique 2D carré sans défaut.

b- Maille triangulaire :

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

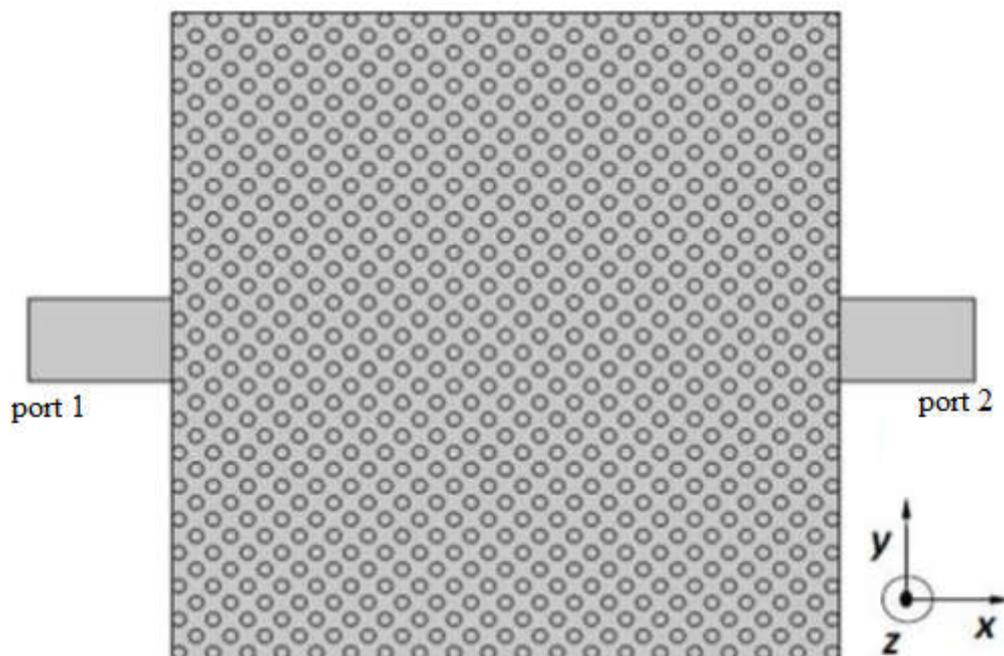


Figure III. 5: Représentation schématique d'un CP-2D déconnecté sans défaut à motif triangulaire ($a=0.6$, $k=0.2$).

Chapitre III Présentation des résultats de simulation

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.

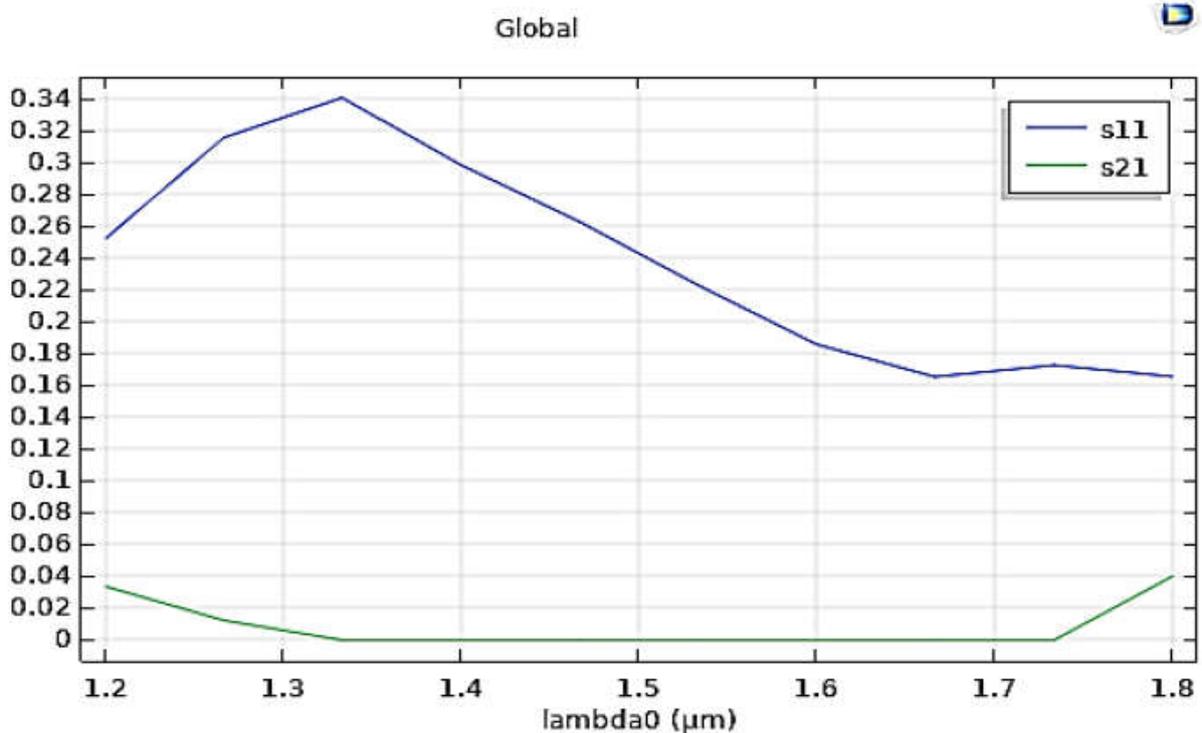


Figure III. 6: Réponse spectrale de transmission d'un CP-2D déconnecté sans défaut structure à motif triangulaire.

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. Le phénomène de guidage est bien assuré dans ce cas-là[44].

c- 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.

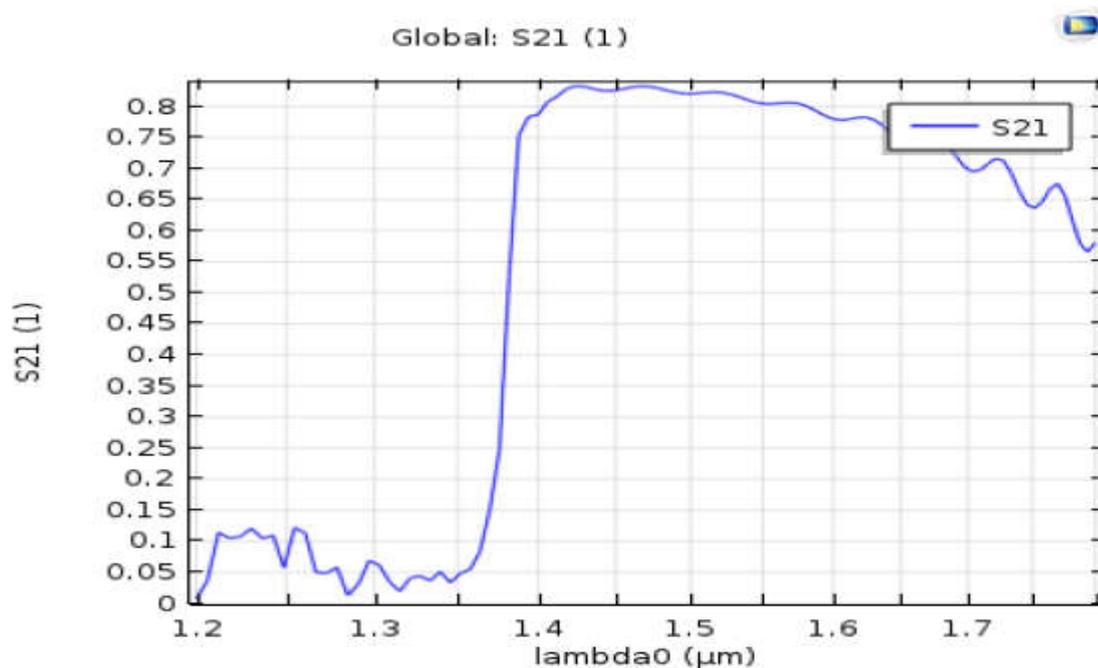


Figure III. 8: Réponse spectrale en terme de transmission d'un guide d'onde à base d'un CP-2D déconnecté.

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

Chapitre III Présentation des résultats de simulation

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.

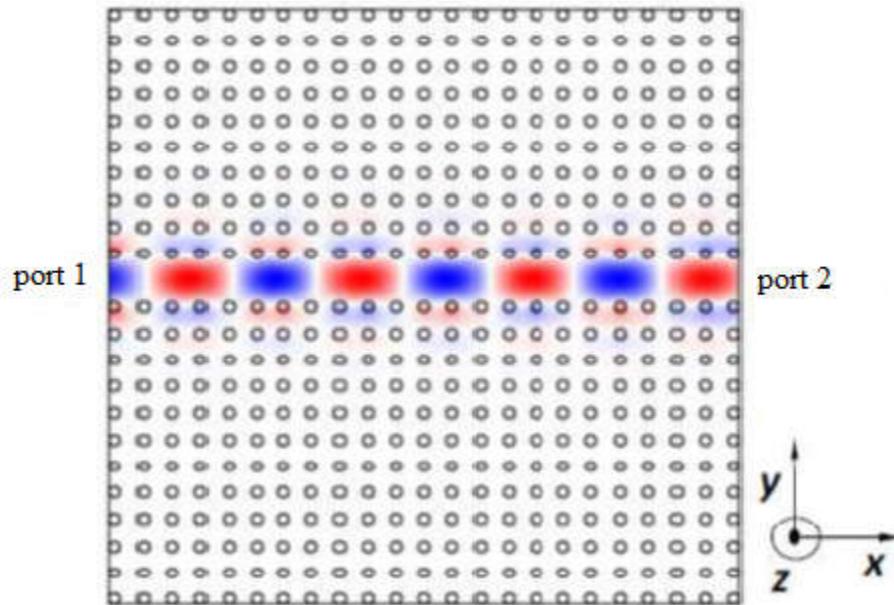


Figure III. 9: Répartition de champ électrique E_z d'un guide d'onde mono rangée à base d'un CP-2D déconnecté à maille carré.

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 $1.31 \mu\text{m}$.

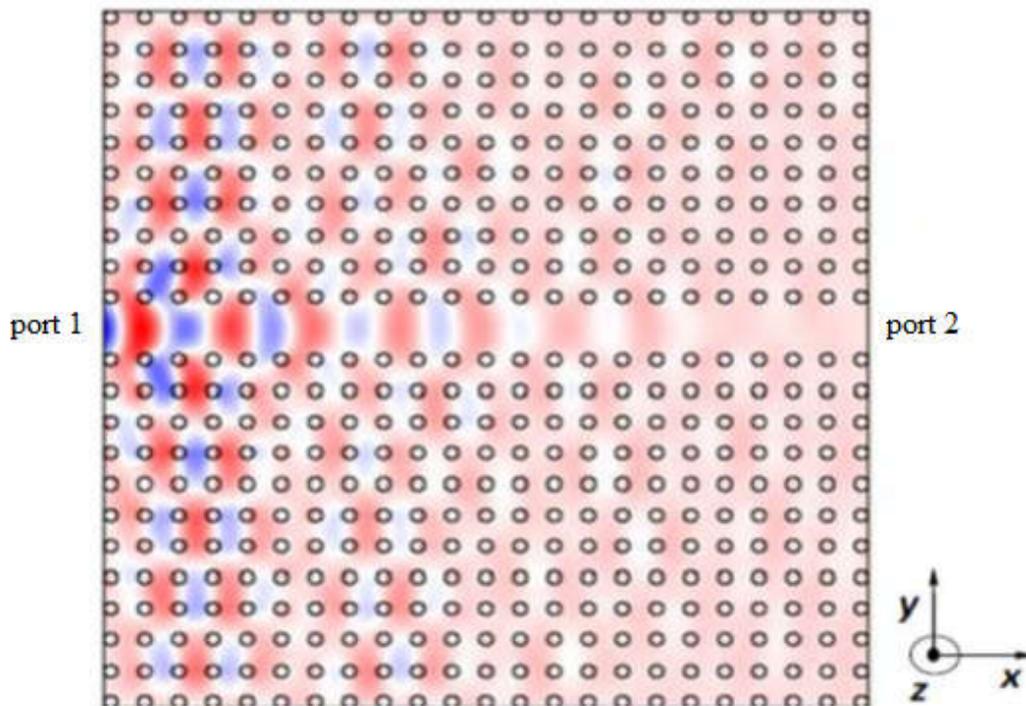


Figure III. 10 : Répartition de champ électrique E_z d'un guide d'onde à base d'un CP-2D déconnecté à maille carrée à $1.31\mu\text{m}$.

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 $1.55\mu\text{m}$.

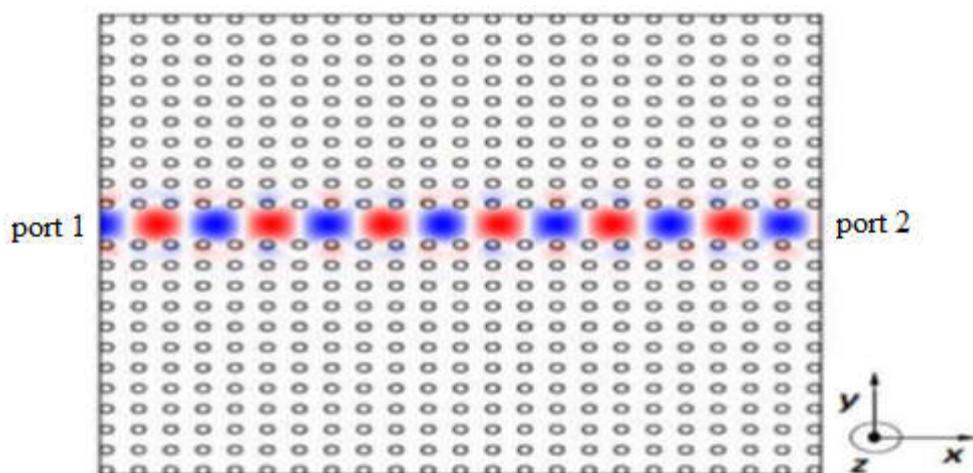


Figure III. 11: Répartition de champ électrique E_z d'un guide d'onde mono rangée à base d'un CP-2D déconnecté à maille carrée à $1.55\mu\text{m}$.

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.

d- 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.

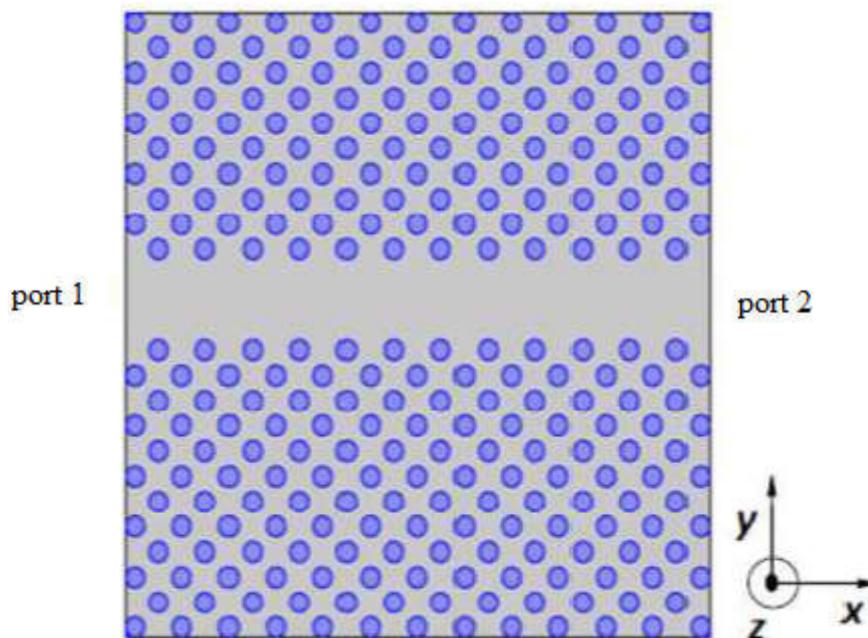


Figure III. 12 : Représentation schématique d'un guide d'onde W_3^{KA} à base d'un CP-2D déconnecté à maille triangulaire.

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 .

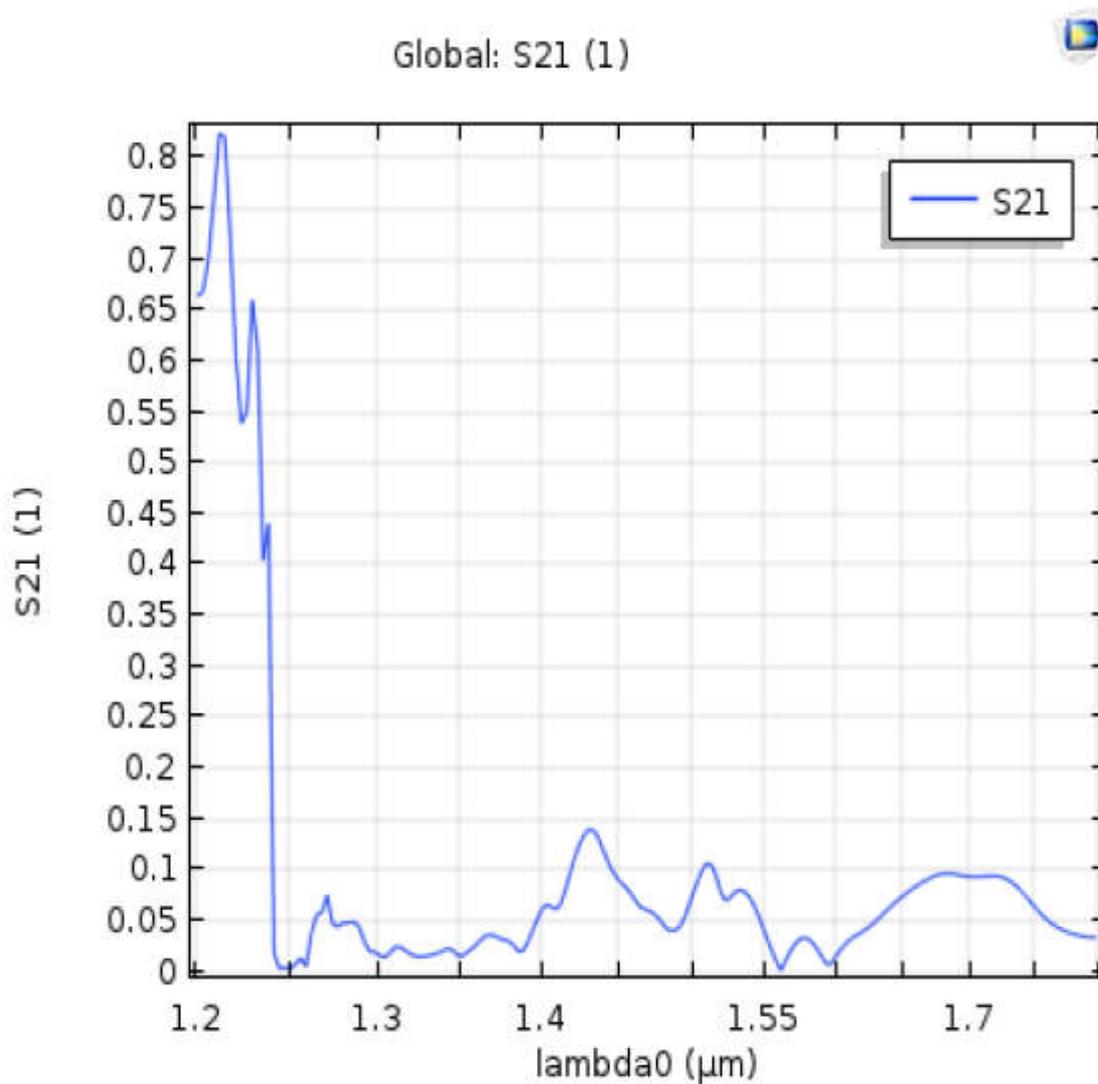


Figure III. 13: Réponse spectrale en terme de transmission un guide à base d'un CP-2D déconnecte à maille triangulaire.

La figure III. 14 illustre la représentation du champ E_z à la longueur d'onde $1.225 \mu\text{m}$ d'un guide d'onde W_3^kA à base d'un CP-2D déconnecté à maille triangulaire.

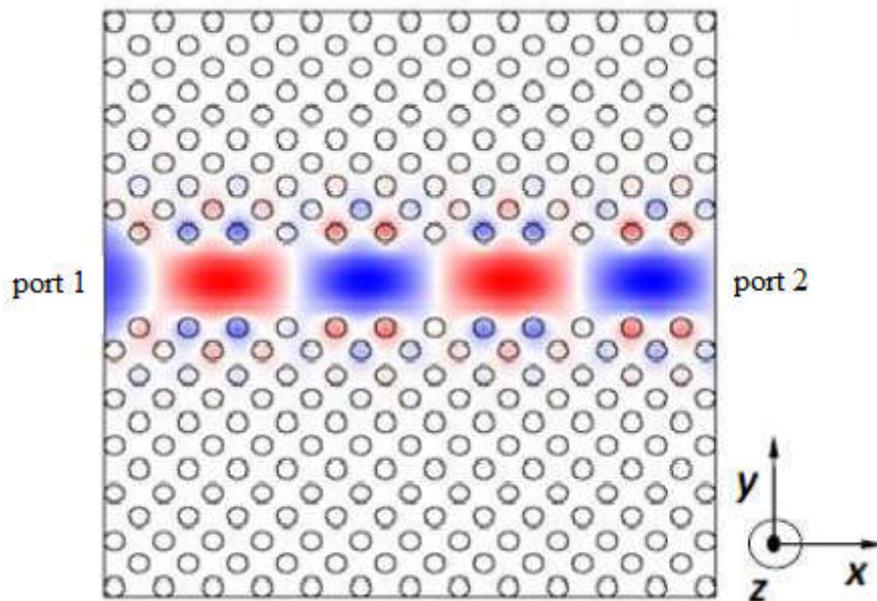


Figure III. 14 : Répartition de champ électrique d'un guide d'onde W_3^kA à base d'un CP-2D déconnecté à maille triangulaire.

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

III.3.2 Circulateur avec trois ports en micro-onde :

Un circulateur magnéto optique est un dispositif multiport non réciproque, Il a la propriété qu'une onde incidente sur le port 1 est acheminé vers le port 3 mais un onde incidente sur le port 3 n'est pas redirigé vers le port 1 mais est à la place acheminé vers le port 2, et ainsi de suite. Les Circulateurs reposent généralement sur l'utilisation de ferrites, un type spécial de matériau magnétique hautement perméable et à faibles pertes.

Un circulateur à trois ports est construit à partir de trois sections de guide d'ondes rectangulaires se rejoignant à 120° et avec un tenon en ferrite au centre du joint.

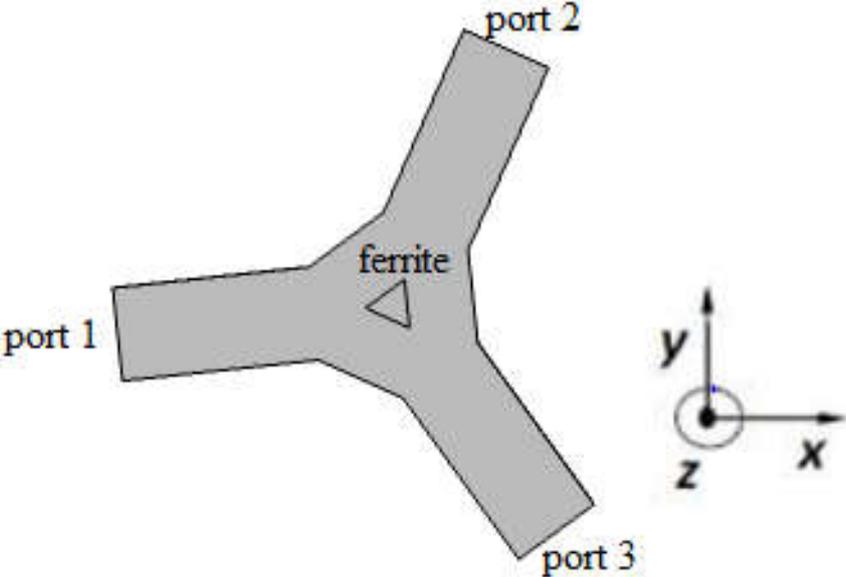


Figure III. 15 :Représentation schématique d'un circulateur trois ports en microonde.

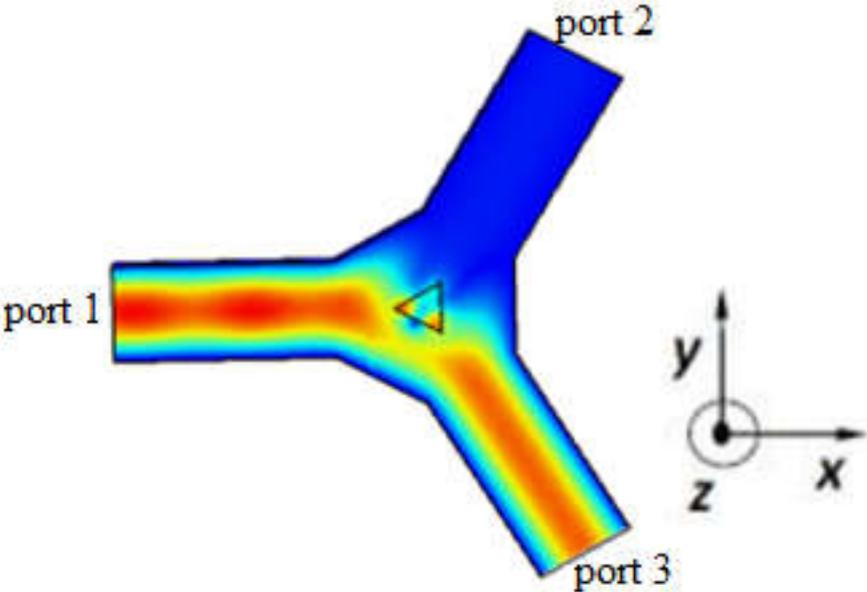


Figure III. 16 :Répartition de champ électrique Ez de port 1 vers le port 3.

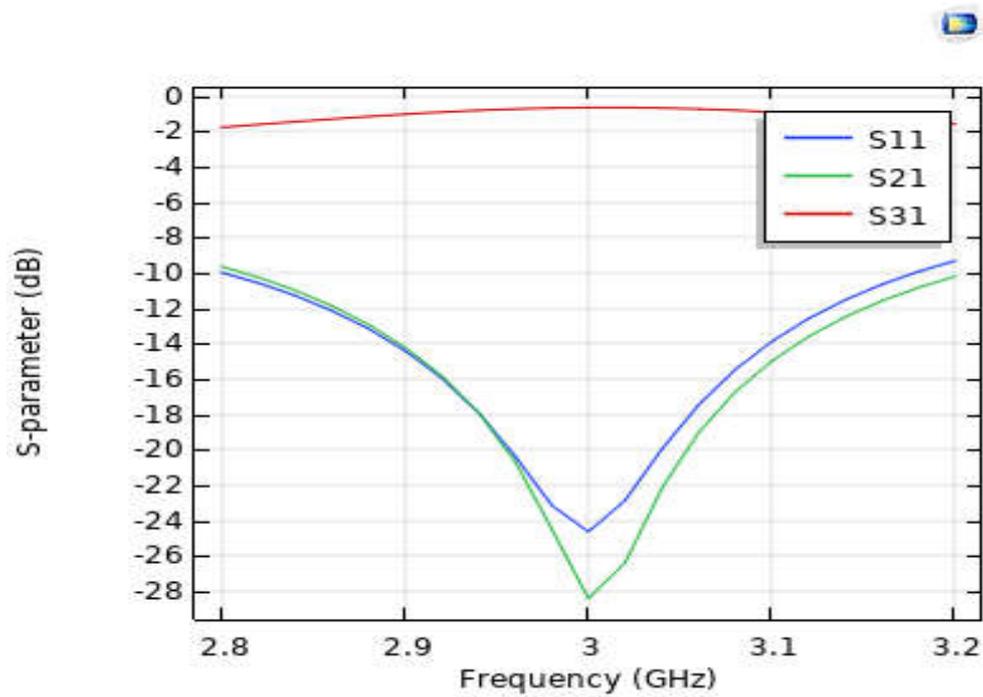


Figure III. 17 : présentation de Paramètre S en fonction de la fréquence pour le port 1 vers le port 3.

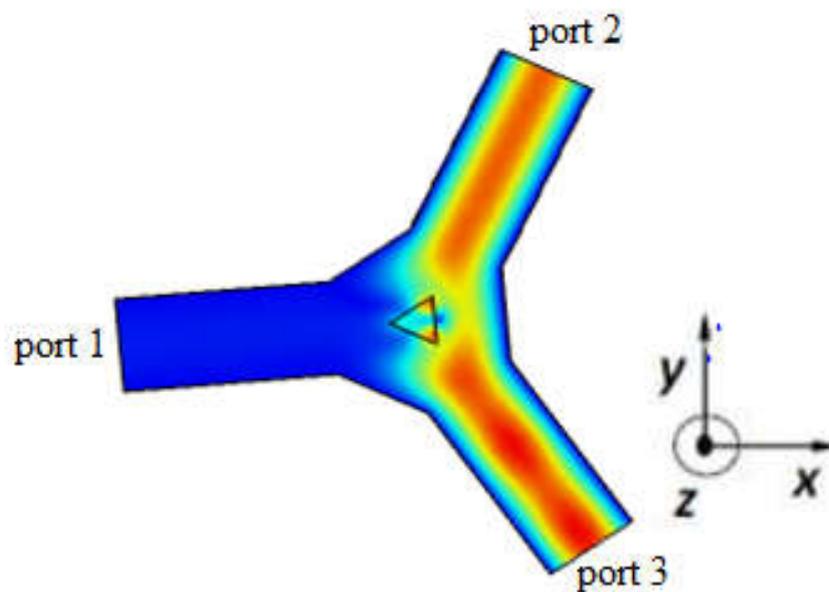


Figure III. 18 : Répartition de champ électrique E_z de port 3 vers le port 2

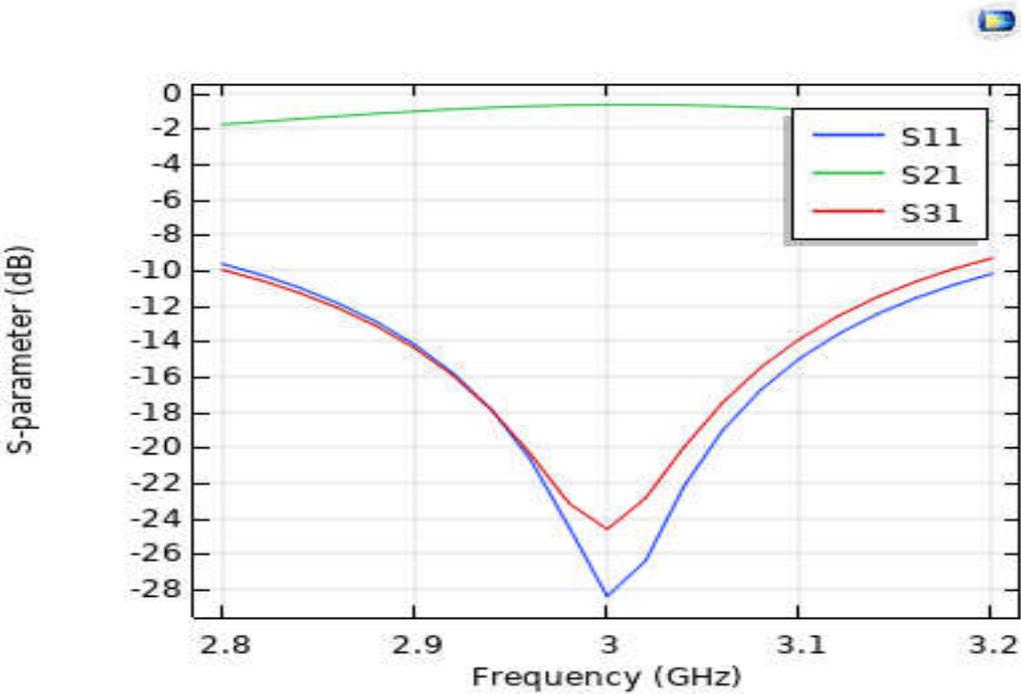


Figure III. 19 : présentation de Paramètre S en fonction de la fréquence pour le port 3 vers le port 2.

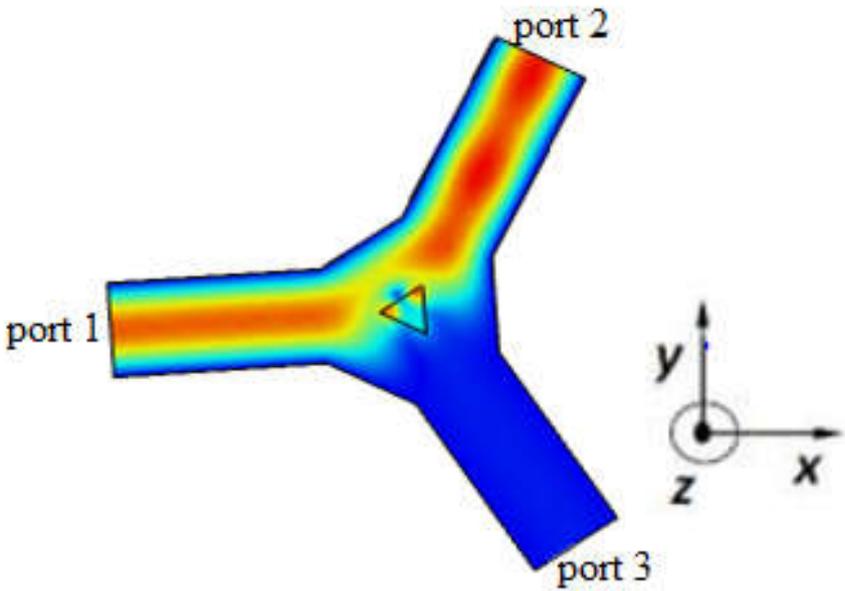


Figure III.20 : Répartition de champ électrique E_z de porte 2 vers le porte 1.

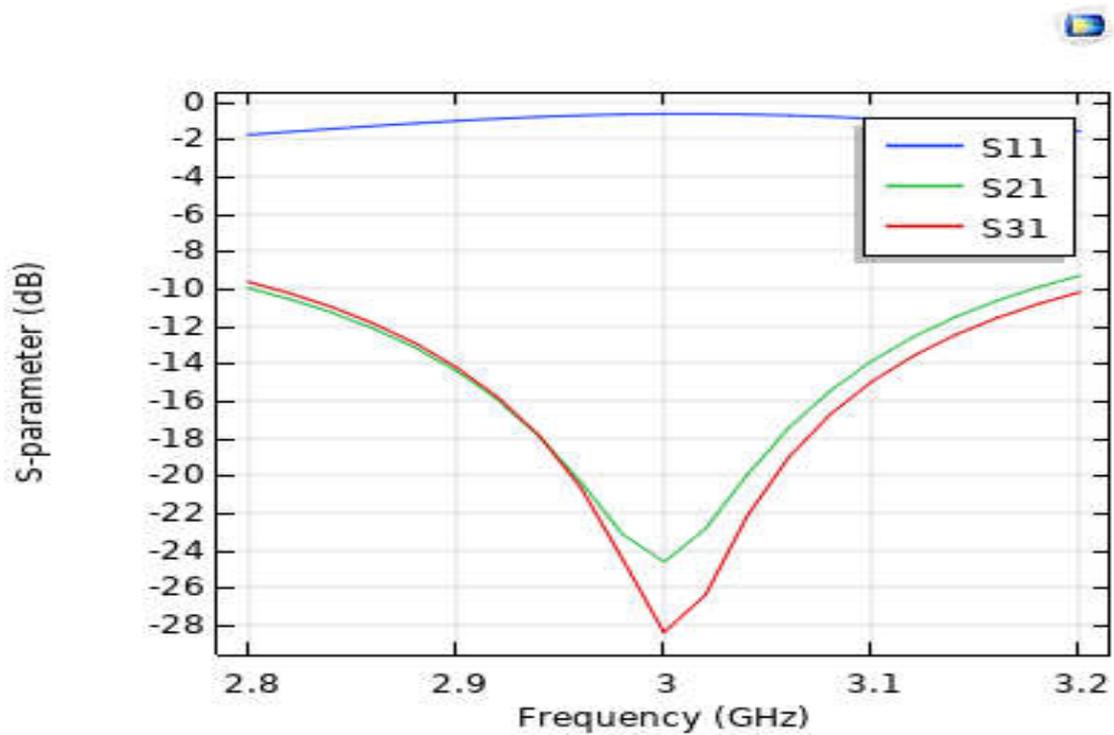


Figure III. 21 : présentation de Paramètre S en fonction de la fréquence pour le port 2 vers le port 1.

III.3.3 Circulateur 4 port en cristaux photoniques :

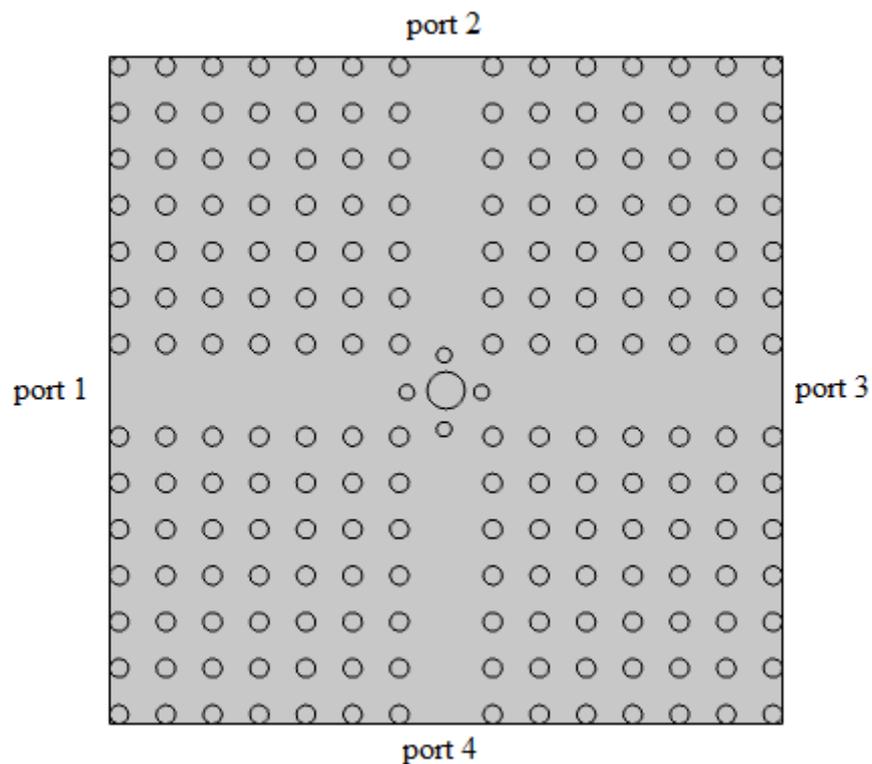


Figure III. 22: Représentation schématique d'un circulateur 4 ports en cristaux photoniques.

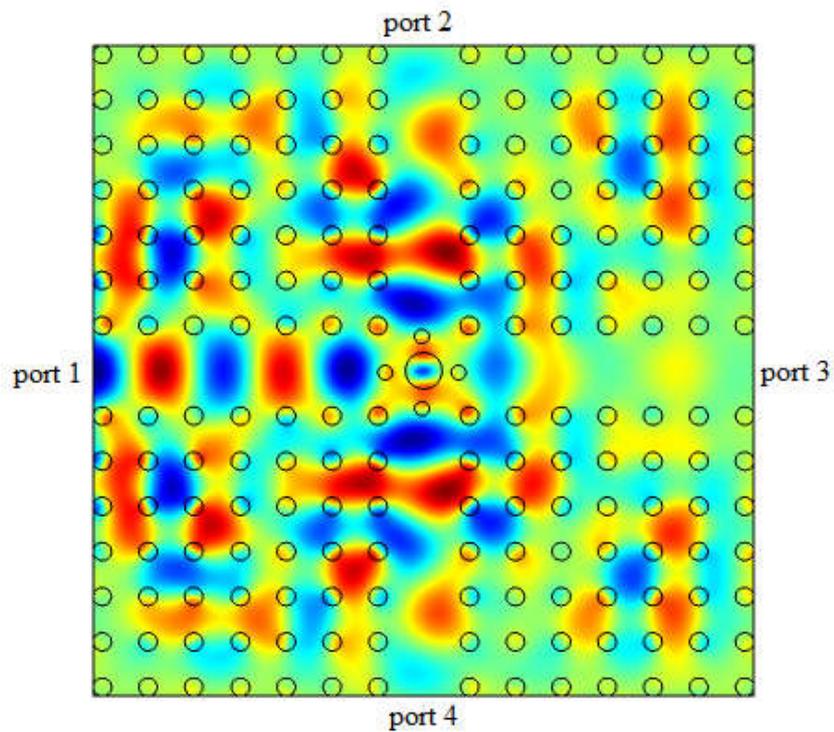


Figure III.23 : Répartition de champ électrique E_z de porte 1.

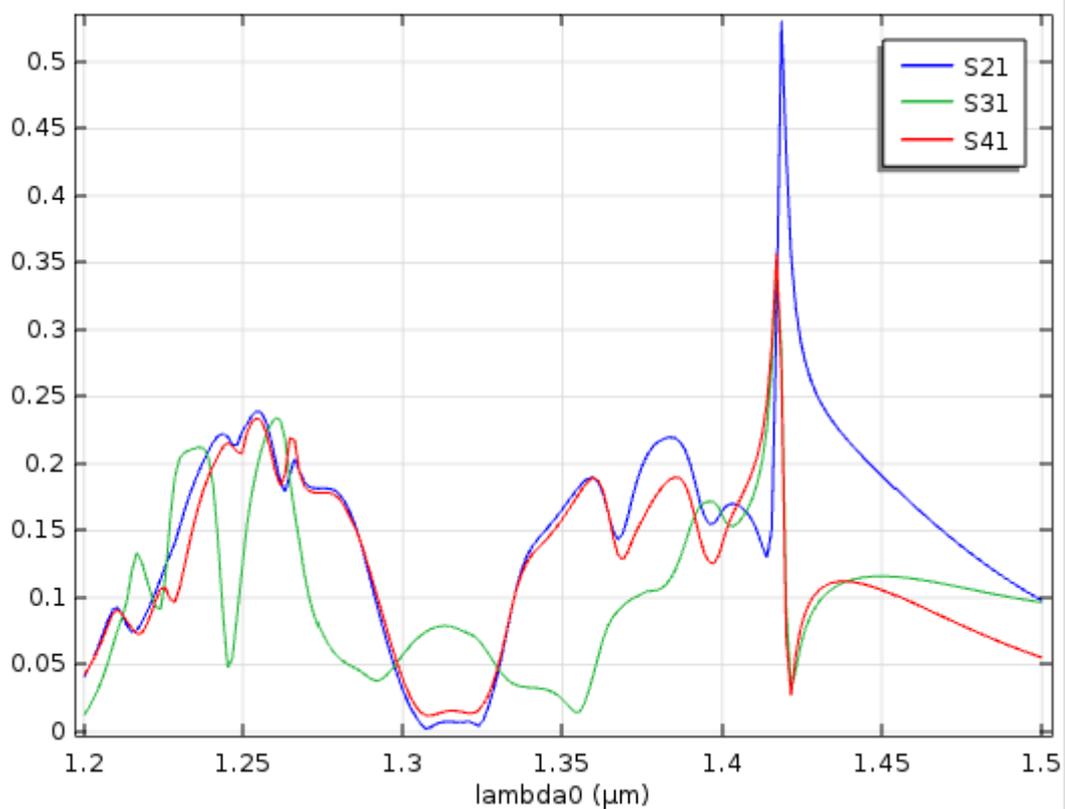


Figure III.24 : présentation de Paramètre S en fonction de la fréquence pour le port 1

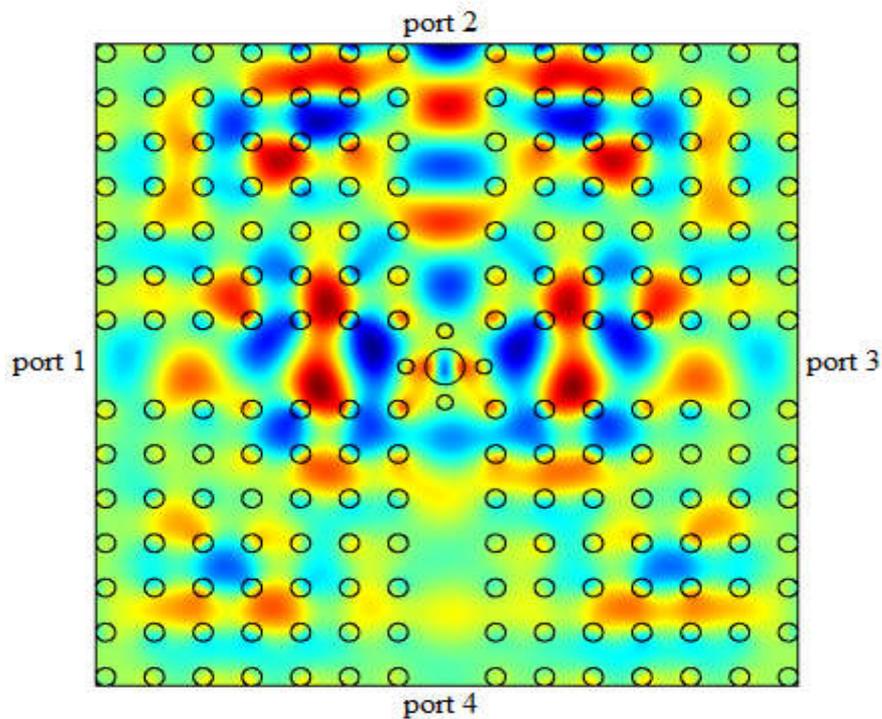


Figure III.25 : Répartition de champ électrique E_z de porte 2.

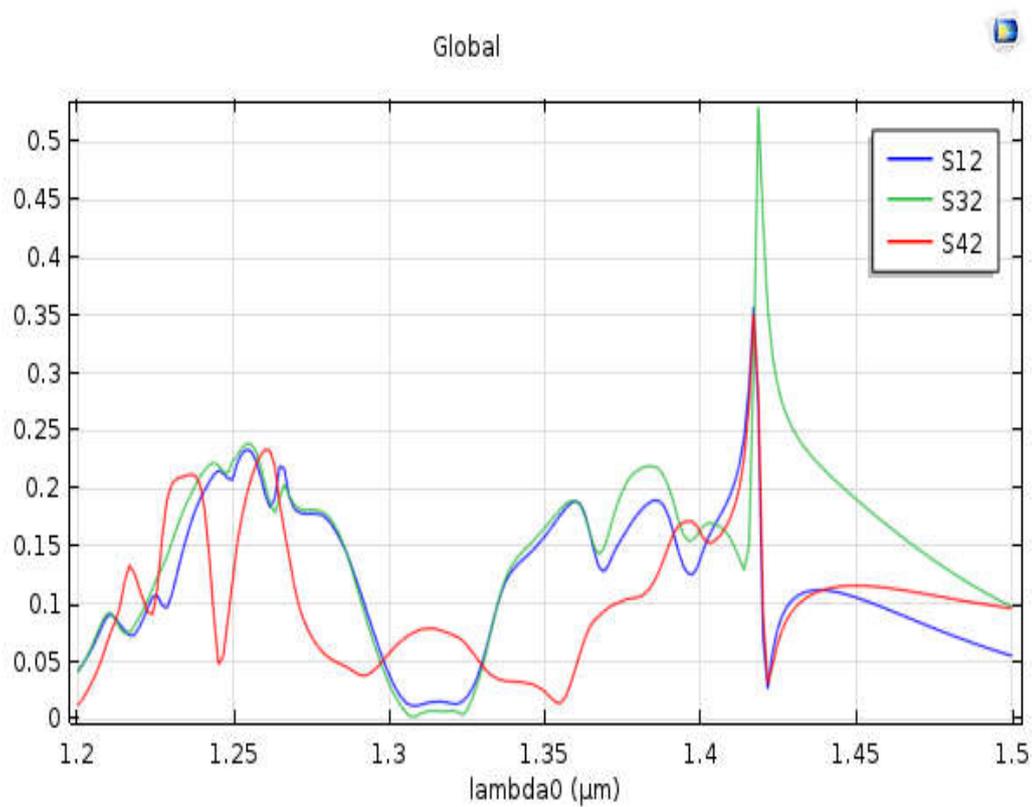


Figure III. 26 : présentation de Paramètre S en fonction de la fréquence pour le port 2.

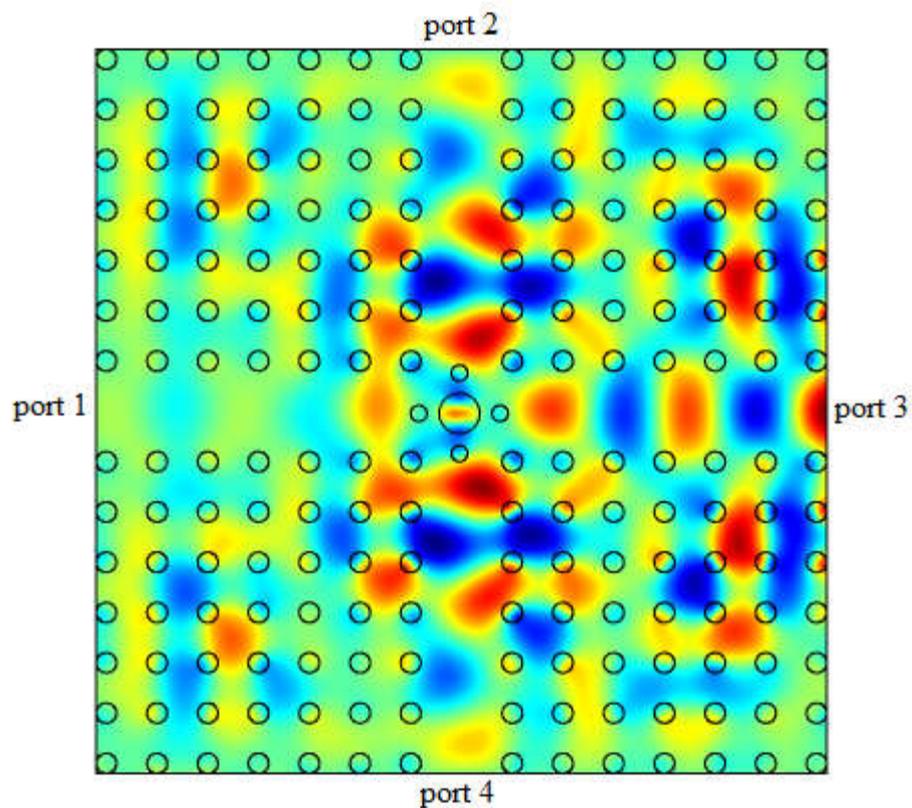


Figure III.27 : Répartition de champ électrique E_z de porte 3.

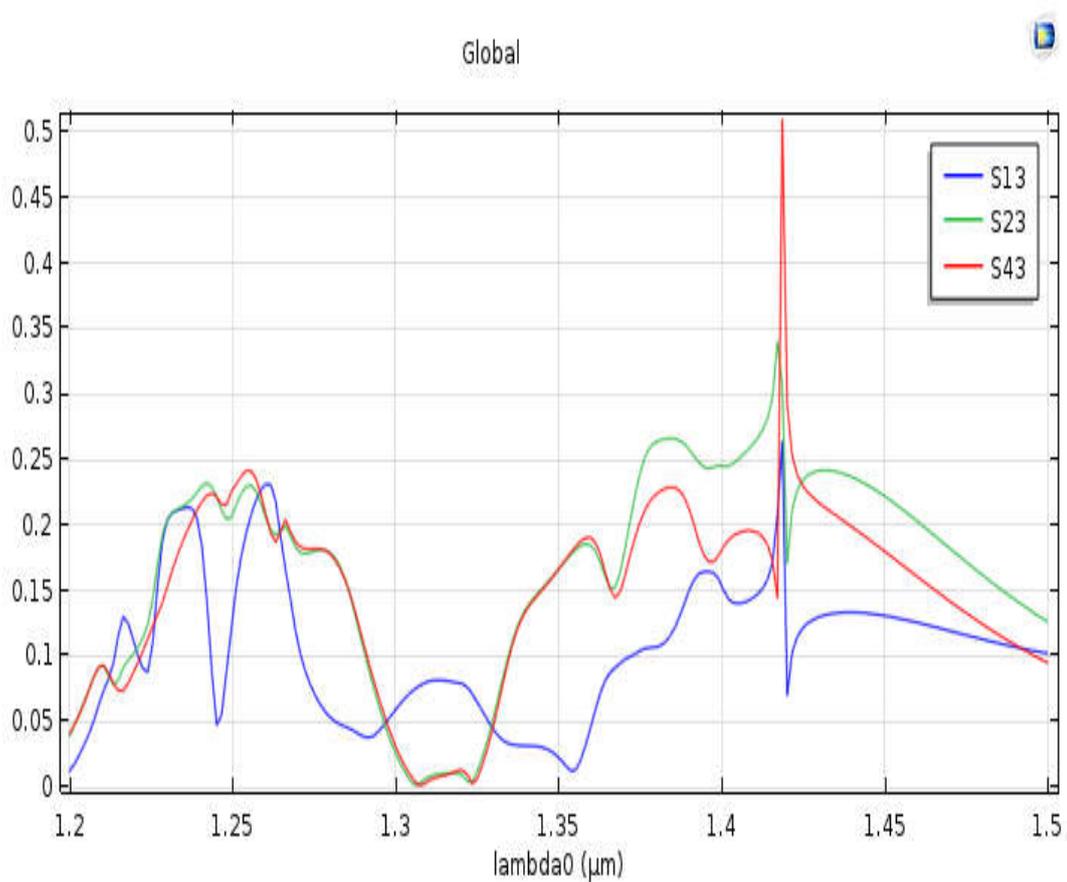


Figure III. 28 : présentation de Paramètre S en fonction de la fréquence pour le port 3.

Chapitre III Présentation des résultats de simulation

Pour le cas de port 4 :

Dans le cas normal quand on injecte le champ électrique dans le port 4 il va traverser vers le port 1, mais dans notre simulation on a trouvé quelque difficulté et le champ traverse vers le port 3.

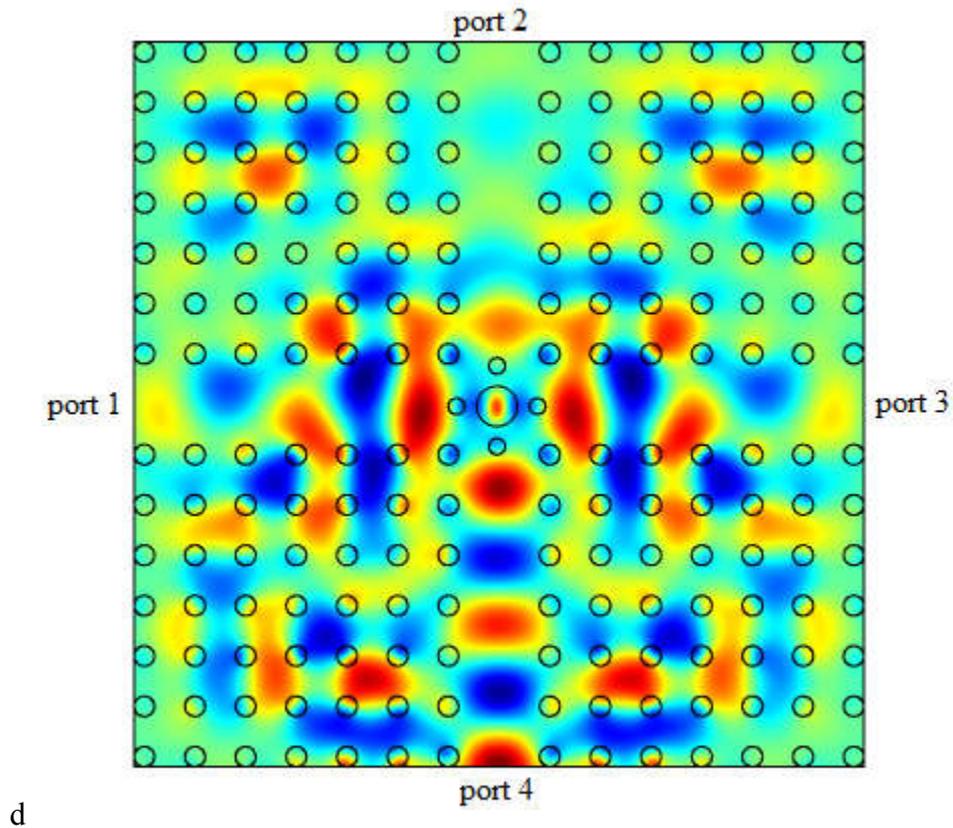


Figure III.29 : Répartition de champ électrique E_z de porte 4.

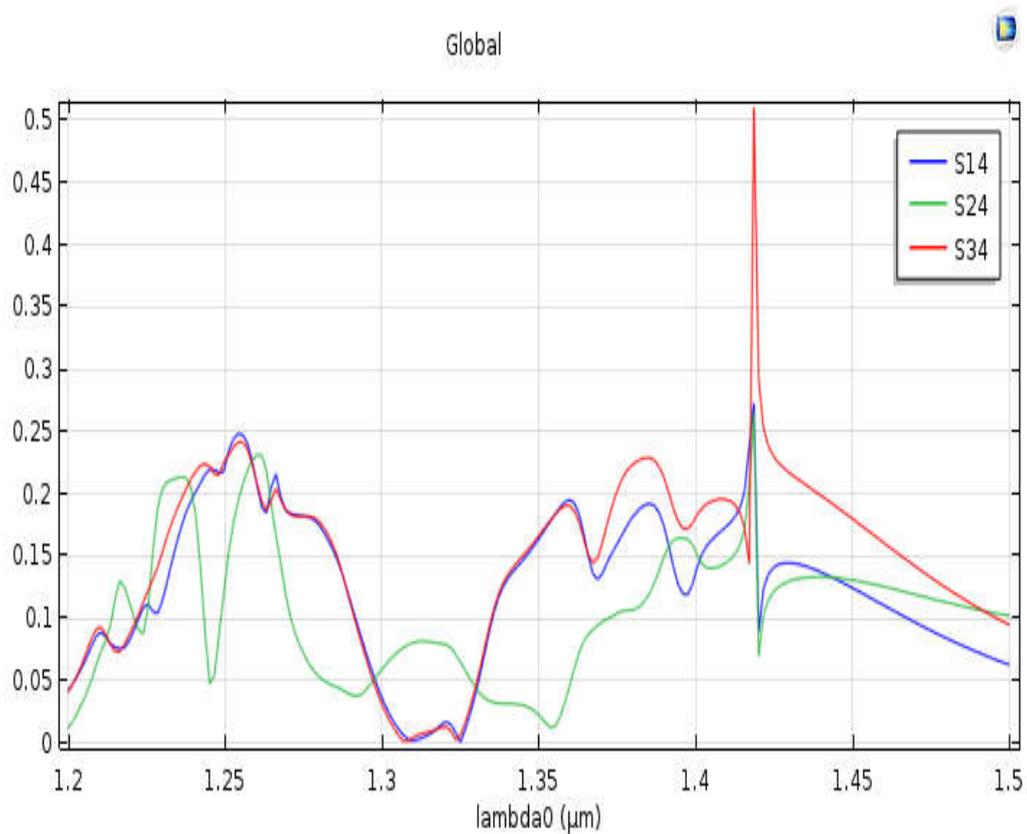


Figure III. 30 : présentation de Paramètre S en fonction de la fréquence pour le port 4.

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^{KA} et W_3^{KA} à maille carrée et triangulaire, et les circulateurs à 3 ports.

Les circulateurs optiques de trois rapports ont été conçus. Les cristaux photoniques à réseau triangulaire de deux dimensions, sont examinés avec des tailles différentes de cristaux circulaires et Les propriétés magnétiques de la ferrite spéciale type de produit hautement perméable et faible.

Conclusion générale

Conclusion générale

Notre travail concerne la conception et l'étude d'un circulateur optique à base sur les guides d'ondes 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 démultiplexeurs , et les diviseurs .

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

Dans le dernier chapitre, nous avons conçu et simulé deux différentes topologies circulateurs à base des cristaux photoniques et micro-onde bidimensionnels en utilisant le logiciel Comsol Multiphysics. La structure du circulateur proposé est basé essentiellement sur les guides d'onde.

Références Bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] E. M. Purcell, Spontaneous emission probabilities at radio frequencies, *Phys. Rev.* 69, 681 (1946).
- [2] Yablonovitch, Eli. *Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics*. New Jersey : Bell Communications Research, 1987.
- [3] S. John, Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices, *Phys. Rev. Lett.* 58, 2486 (1987). 2
- [4] E. Yablonovitch, T.J. Gmitter, K.M. Leung, Photonic band structure : The Face-Centered-Cubic Case Employing Nonspherical Atoms, *J. Physical Review Letters*, vol. 67, pp. 2295–2298, 1991.
- [5] Rayleigh, L. *Philosophical Magazine*. The London, Edinburgh, and Dublin : s.n., 1887.
- [6] M. FILALI, « Etude et Conception d'un démultiplexeur 8 canaux à cristaux photoniques Bidimensionnels », mémoire MASTER, Université Mohamed Boudiaf - M'SILA, juin 2018.
- [7] ABRI née BADAOUI Hadjira, “Etude et Conception des Micro-composants à Base des Cristaux Photonique Bidimensionnels”, Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen, Décembre 2012.
- [8] L. P. Biro, Z. Bálint, K. Kertész, Z. Vértesy, G. I. Márk, Z. E. Horvath, J. Balazs, D. Mehn, I. Kiricsi, V. Lousse, and J.-P. Vigneron, Role of photonic-crystal-type structures in the thermal regulation of a lycaenid butterfly sister species pair , *Phys. Rev. E*, Vol. 67, p. 021907, 2003.
- [9] G. Kiriakidis, N. Katsarakis, Fabrication of 2D and 3D PBG crystals in the GHz and THz regions, *J. Materials Physics and Mechanics*, vol. 1, pp. 20–26, 2000.
- [10] C. Oh, M.J. Escuti, Time domain analysis of periodic anisotropic media at oblique incidence: an efficient FDTD implementation, *J. Optics Express*, vol. 14, pp. 11870–11884, 2006.
- [11] 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.
- [12] M. Pomarède, la couleur des oiseaux, *Pour la Science*, n° 261, p.92, juillet 1999.

- [13] Cohen-Tannoudji 73 C. Cohen-Tannoudji, B. Diu, F. Laloë, *Mécanique quantique*, Tome I (Hermann, Paris, 1973)
- [14] Joannopoulos, R. D. Meade, J. N. Win, *Photonic Crystal: Molding the Flow of Light*, Princeton Univ. Press (1995)
- [15] P. Tayebati, P. D. Wang, M. Azimi, L. Meflah, and D. Vakhshoori, *Electron. Lett.* 34, 1967 (1998)
- [16] Asmaa, *Seri. Propriétés optique des cristaux photoniques unidimensionnels*. Mostaganem : Université Abdelhamid Ben Badis , 2012.
- [17] A. Belhassos, S. Metref, *Etude et simulation des cristaux photoniques*, Mémoire de master Université Kasdi Merbah Ouargla, 2017
- [18] P. Yeh, A. Yariv, and C. Hong, "Electromagnetic propagation in periodic stratified media. I. General theory," *Journal of the Optical Society of America*, vol. 67, no. 4, pp. 423–438,
- [19] K.S. Yee, Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwells equations in isotropic media, *J. IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 14, pp. 302–307, 1966.
- [20] S.Tao, D.Chen, G.Wang, J.Qiao and Y.Duan. « A high sensitivity pressure sensor based on two-dimensional photonic crystal. Photonic sensor». 2016.
- [21] MA. Schmidt, L. Wondraczek, HW. Lee, N. Granzow, N. Da, P. St. J. Russell , "Complex Faraday rotation in microstructured magneto-optical fiber waveguides", *Adv Mater*, Vol.23, N°22-23, p.2681-8, 2011.
- [22] Davy GERARD, « Etude en champ proche et en champ lointain de composants périodiquement nanostructurés: cristaux photoniques et tamis à photons », Thèse de doctorat, Université de Bourgogne, 09 juillet 2004
- [23] M. BOUANATI, N. BELLAREDJ, « conception des filtres a base des cristaux photoniques bidimensionnels par l'analyse de la bip : modélisation par la FDTD-2D », Mémoire de master, université de Tlemcen, juin 2013.
- [24] L. BOUKERZAZA, «Influence des paramètres physiques sur la bande interdite photonique d'un cristal photonique bidimensionnel à réseau hexagoknal», *Université Mentouri Constantine*, 2007-2008,
- [25] R. MOUKHTARI « Contribution à L'étude et La Conception Des Cavités à Cristaux Magneto Photoniques », Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2017/2018

- [26] N.BENMALEK, N.BENLADGHEM « Conception des Démultiplexeurs en Cristaux Photoniques 2D pour les Système DWDM », mémoire MASTER , Université de Tlemcen, juillet 2019.
- [27] 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.
- [28]A. BENMERKHI, «INFLUENCE DES PARAMÈTRES GÉOMÉTRIQUES SUR LA CAVITÉ À CRISTAUX PHOTONIQUES BIDIMENSIONNELS »,mémoire de magister,UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE 2008.
- [29] A.Seri, «*Propriétés optique des cristaux photoniques unidimensionnels périodiques*»,mémoire MASTER, Université Abdelhamid Ben Badis – Mostaganem.
- [30] F.LALLAM, « Conception de Nouvelles topologies des Démultiplexeurs Sélectifs à plusieurs canaux et longueurs d'ondes à base de Cristaux Photoniques Bidimensionnels »,Thèse de doctorat, *Université De Tlemcen, Avril 2019.*
- [31] Hogan, C. Lester "L'effet de Faraday ferromagnétique aux fréquences de micro-ondes et ses applications - le gyrateur de micro-ondes". Journal technique du système Bell(janvier 1952)..
- [32]Hogan, C. Lester (1953), "L'effet de Faraday ferromagnétique aux fréquences micro-ondes et ses applications", Examens de la physique moderne.
- [33]Carchon, G .; Nanwelaers, B. "Limitations de puissance et de bruit des circulateurs actifs". Transactions IEEE sur la théorie et les techniques des micro-ondes(01/02/2000)..
- [34] Qin, Shihan; Xu, Qiang; Wang, Y.E. "Composants non réciproques avec des condensateurs à modulation distribuée". Transactions IEEE sur la théorie et les techniques des micro-ondes(01/10/2014)..
- [35]Mohr, Richard "Un nouveau dispositif de ligne de transmission non réciproque". Actes de l'IEEE(1964)..
- [36]"La nouvelle puce radio Full Duplex transmet et reçoit les signaux sans fil à la fois". Spectre IEEE: Actualités sur la technologie, l'ingénierie et la science. 15/04/2016.
- [37]"Mc Carthy Tétrault , Hank Intven. *MANUEL SUR LA RÉGLEMENTATION DES TÉLÉCOMMUNICATIONS*. Washington : InfoDev, 2000.

- [38]S. Wang, C.H. Lee, Y.B. Wu, circulateur actif et quasi-circulateur 10 GHz entièrement intégrés utilisant des réseaux pontés en T en CMOS standard, *IEEE Trans. sur les systèmes d'intégration à très grande échelle* 24 (10) (2016) 3184–3192.
- [39]S.Bierlich, T.Reimann, F.Gellersen, AF Jacob, J.Topfer, Frittage, propriétés micro-ondes et applications de circulateur de films épais de ferrite de type M texturés à substitution Sc, *J. of the European Ceramic Society* 39 (2019) 3077–3081.
- [40]E. Yablonovitch, émission spontanée inhibée en physique et électronique du solide, *Phys. Rev. Lett.* 58 (1987) 2059-2062.
- [41]S. John, Forte localisation des photons dans certains super-réseaux diélectriques désordonnés, *Phys. Rev. Lett.* 58 (1987) 2486-2489.
- [42]E.K.N. Yung, D.G. Zhang, R.S.K. Wong, Un nouveau circulateur à jonction en Y à guide d'ondes avec une sphère en ferrite pour ondes millimétriques, *IEEE Trans. Technologie de théorie des micro-ondes.* 44 (3) (1996) 454–456.
- [43]D.G. Zhang, W.G. Lin, Une nouvelle méthode de conception de circulateur à guide d'ondes plan H, *International J. of Infrared and Millimeter Waves* 9 (2) (1988) 173–177.
- [44] F.LALLAM, « Conception de Nouvelles topologies des Dèmultiplexeurs Sèlectifs à plusieurs canaux el longueurs d'ondes à base de Cristaux Photoniques Bidimensionnels», Thèse de doctorat, *Université De Tlemcen, Avril 2019.*