

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIC 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 :

- ***SIDI-KADA Meroua Ines***
- ***ZIANI Mohammed Yassine***

Le thème

Conception d'un circulateur optique à hautes performances pour les applications proche infra-rouge

Soutenu publiquement le 07 juillet 2021 à Tlemcen devant le jury composé de :

Mme. M. MELIANI	Professeur	Univ. Tlemcen	Présidente
Mme. H. BADAOU	Professeur	Univ. Tlemcen	Encadrante
Mr M. ABRI	Professeur	Univ. Tlemcen	Examinateur
Mr. B. RAHMI	Doctorant	Univ. Tlemcen	Co-Encadrant

Dédicace

C'est grâce à Allah seul que j'ai pu achever ce travail. Je le dédie :
A ma raison de vivre ma mère, symbole d'amour, pour sa patience, ses sacrifices, sa conscience, ses conseils qui ont éclairés mon chemin,
A mon cher père, en reconnaissance de tout ce qu'il a fait pour moi tout au long de son existence.

A mon cher frère Ismail

A ma chère sœur Aya

A toute ma famille

A mes meilleures amies, et camarades

A mes professeurs et à mon encadreur pour son immense aide,
Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis Merci.

Ines

Dédicace

Si on est là c'est grâce à Allah seul pour que j'ai pu réaliser ce travail. Je le dédie à :

A mes chers parents

Qui mon toujours soutenue dans ma vie et m'encourager, et qui m'on toujours apporté le meilleur que DIEU vous garde pour moi .et vous procure santé, prospérité et bonheur.

A mes chers frères et sœur, et toute la famille pour leurs encouragements et leurs soutiens.

A tous mes amis et camarades, et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que j'ai pu terminer ce travail

A tous mes professeurs

qui m'ont aidé, avec leurs exigence et conseil, je vous dis merci.

Yassine

Remerciements

Avant-propos

الحمد لله رب العالمين حمداً لشكره أداءً

ولحقه قضاءً، ولحبه رجاءً وفضلهناءً ولثوابه عطاءً

Ce projet de fin d'étude s'est déroulé au département de Télécommunication faculté de technologie à l'Université Abou-Bekr Belkaïd de Tlemcen. Je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué à l'aboutissement de ce travail.

En premier lieu, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Madame ABRI Née BADAoui Hadjira professeur à l'Université de Tlemcen pour son encadrement de qualité, la richesse de ses conseils ainsi que pour la liberté et l'autonomie qu'elle nous a accordée dans la gestion de notre travail, et qui nous ont permis de retirer une expérience enrichissante. Son œil critique nous a été très précieux pour structurer le travail et l'améliorer de manière constante.

Je remercie également M. ABRI Mehadji Professeur à l'Université de Tlemcen qui nous a réservé des moments de discussion et de conseil et nous a facilité les conditions pour mener à bien ce travail.

Nous leur serons éternellement reconnaissants.

Nos remerciements chaleureux s'adressent aussi aux membres du jury et de manière particulière Mme. Meliani Professeur à l'Université de Tlemcen qui nous a fait l'honneur de participer à l'évaluation de ce travail.

J'adresse mes remerciements à M. Rahmi doctorant au laboratoire système de Télécommunication, d'avoir mis à notre disposition son savoir-faire et les outils numériques pour réaliser une partie importante de notre travail.

C'est à nos parents que nous adressons toute l'affection, la reconnaissance de nous avoir permis d'en arriver là. Leur soutien constant, leurs encouragements dans les moments les plus difficiles restent notre première source d'inspiration. Qu'ils trouvent dans ces mots et dans ce travail, le témoignage de notre gratitude, notre profond dévouement pour leurs sacrifices.

Résumé

Les cristaux photoniques sont des matériaux diélectriques ou métalliques structurés artificiellement dont la constante diélectrique varie périodiquement à l'échelle des longueurs d'onde dans plusieurs directions de l'espace. On les appelle des cristaux photoniques à une, deux ou trois dimensions, qui influencent la propagation des ondes électromagnétiques à l'intérieur de la structure. Celles-ci possèdent une propriété optique intéressante, à savoir la bande interdite photonique (PBG), dans 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, donc de nouvelles perspectives dans la manipulation de la lumière.

Le but de notre travail est de concevoir de nouveaux circulateurs magnéto-optiques dans des cristaux photoniques bidimensionnels à très haute vitesse en utilisant le logiciel COMSOL. Les performances des circulateurs magnéto-optiques conçus en termes de transmission seront réalisées et analysées.

Mots clés : cristaux photoniques, diagramme de dispersion, PWE, carte de la bande, 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. They are called one-, two- or three-dimensional photonic crystals, which influence the propagation of electromagnetic waves within the structure. These crystals have an interesting optical property, namely the photonic band gap (PBG), in which no electromagnetic mode can propagate. It is notably this property that offers photonic crystals the possibility to control the propagation, without absorption, of electromagnetic waves, thus opening new perspectives in the manipulation of light.

The aim of our work is to design new magneto-optical circulators in two-dimensional photonic crystals at very high speed using the COMSOL software. The performance of the designed magneto-optical circulators in terms of transmission will be realized and analyzed.

Keywords : photonic crystals, scatter plot, PWE, band map, circulator, COMSOL.

ملخص

البلورات الضوئية عبارة عن مواد عازلة أو معدنية ذات هيكل صناعي يختلف ثابتها العازل بشكل دوري عبر الأطوال الموجية في عدة اتجاهات في الفضاء. يطلق عليهم بلورات فوتونية أحادية أو ثنائية أو ثلاثية الأبعاد، والتي تؤثر على انتشار الموجات الكهرومغناطيسية ، حيث لا يمكن أن ينتشر أي وضع (PBG) داخل الهيكل. هذه لها خاصية بصرية مثيرة للاهتمام، وهي فجوة النطاق الضوئية كهرومغناطيسي. هذه الخاصية على وجه الخصوص هي التي تمنح البلورات الضوئية إمكانية التحكم في انتشار الموجات الكهرومغناطيسية دون امتصاص، وبالتالي مناظير جديدة في معالجة الضوء.

الهدف من عملنا هو تصميم دوائر مغناطيسية ضوئية جديدة في بلورات ضوئية ثنائية الأبعاد بسرعة عالية جدًا باستخدام برنامج سيتم تنفيذ وتحليل أداء الدوائر المغناطيسية الضوئية المصممة من حيث الإرسال. COMSOL.

الكلمات الرئيسية: بلورات ضوئية، مخطط مبعثر، PWE، خريطة نطاق، مرشح، DEMUX، 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^{kA} : Guide d'onde mono rangée.

w_3^{kA} : 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.

→

\mathbf{K} : Vecteur d'onde.

\mathbf{V}_g : Vitesse de groupe.

\mathbf{g} : le vecteur du réseau réciproque.

$\vec{\mathbf{E}}$: le champ électrique

$\vec{\mathbf{H}}$: le champ magnétique.

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

ϵ : Permittivité diélectrique.

μ : Perméabilité magnétique.

Q : facteur de qualité.

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

DWDM : dense **Wavelength Division Multiplexing**

FDTD :FiniteDifference Time Domain.

Liste des figures

Figure I.1: Représentation des cristaux photoniques unidimensionnels (1D), bidimensionnels (2D) et tridimensionnels (3D).	5
Figure I.2: Les papillons sont parmi les insectes les plus colorés. Leurs ailes présentent des caractéristiques assimilables à celles des cristaux photoniques comme le montre la figure de droite [9].	7
Figure I.3: Agrandissement d'une plume de paon au microscope montrant la structure des barbules. Chaque barbule est divisée en une série de cuvettes (flèche rouge). Ces cuvettes sont tapissées d'une multitude de micro lamelles régulièrement espacées (figure de droite).	8
Figure I.4: Un exemple d'opale naturelle, minérale dans lequel on retrouve certaine propriété des cristaux photonique.	9
Figure I.5: (a) Structure périodique unidimensionnelle, (b) Représentation schématique de l'interface des ondes réfléchies par chaque dioptré.	10
Figure I.6: Structure 2D.	11
Figure I.7: Réflectivité conjuguée et contraste d'indice.	12
Figure I.8: Réseau direct 2D : (a) structure carrée, (b) structure triangulaire, (c) structure hexagonale.	13
Figure I.9: « Structures tas de bois ». Images MEB d'une structure fabriquée par lithographie UV du silicium [20].	14
Figure I.10: Schéma d'une opale inverse à base de Silicium.	15
Figure I.11: Opale inverse à base de silicium [22].	16
Figure I.12: 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 $[0 ; +\pi/a]$ la zone de Brillouin irréductible.	17
Figure I.13: Cristaux photoniques bidimensionnels à symétries (1) carrée, (2) rectangulaire et (3) triangulaire avec leurs zones de Brillouin irréductibles correspondantes (en trait vert). ...	17
Figure I.14: Représentation des polarisations TE et TM dans un BIP 2D.	18
Figure I.15: Diagramme de structure de bandes d'un cristal photonique 2D à maille carrée où sont représentées graphiquement les vitesses de phase v_ϕ et de groupe v_g pour une onde plane se propageant dans la direction $\Gamma - X$. En un point de la courbe de dispersion, la vitesse de phase s'obtient à partir du rapport ω/k et la vitesse de groupe à partir de la tangente à la courbe.	19

Figure I.16: Structure de bande calculée avec HFSS pour un réseau carré bidimensionnel de tiges cylindriques en cuivre dans l'air, en polarisation TM avec un pas $a = l_1 d_1 l_2 d_2 l_3 = 1$ et un rayon $r = 1/15a$.	21
Figure I.17: Diagramme de dispersion 3D calculé avec HFSS pour un réseau carré bidimensionnel de tiges de cuivre cylindriques dans l'air, en polarisation TM du pas $a = l_1 d_1 l_2 d_2 l_3 = 1$ et un rayon $r = 1/15a$.	22
Figure I.18: Cartes des bandes interdites d'un réseau de trous d'air dans une matrice diélectrique ($\epsilon = 12.25$) : (a) Réseau triangulaire ; (b) Réseau carré.	24
Figure I.19: Exemples de défauts ponctuels dans un cristal photonique composé de tiges diélectriques	25
Figure I.20: Simulation de la propagation du champ électromagnétique dans un guide d'onde réalisé dans un cristal photonique.	25
Figure I.21: Diagrammes de transmission mesurés pour un réseau carré de 11 rangées de tiges d'alumine ayant deux défauts. Lorsque les défauts sont espacés l'un de l'autre (à gauche), un seul pic de résonance s'observe (défaut peu profond). Lorsque les défauts sont rapprochés, le pic se dédouble (défauts couplés, à droite) [36].	26
Figure I.22: (a) Représentation d'un filtre add / drop,(b) Principe de fonctionnement. Système à 4 accès constitué d'un résonateur en anneaux et de deux guides d'ondes [40].	27
Figure I.23: Exemple d'un filtre add-drop constitué de deux guides d'ondes diffractifs et d'une cavité linéaire dans un cristal photonique à membrane. Un peu plus de 80% de la puissance se propageant dans le guide d'onde bus a été transférée dans le guide d'onde goutte, en avant, autour de $1,537 \mu\text{m}$ [42].	27
Figure I.24: Images MEB des cavités H2 (a) et L3 (b) fabriquées dans la salle blanche de l'IEF [46].	28
Figure I.25: Exemple d'ingénierie des défauts. Dans ce cas, il s'agit d'une cavité H1 modifiée : les six trous adjacents au défaut sont réduits de manière à amener progressivement des modes de symétries différentes dans la bande interdite photonique.	29
Figure I.26: Représentation du phénomène de superprisme et de sa sensibilité aux longueurs d'onde.	30
Figure I.27: Principe du démultiplexeur spectrographique : le guide PC de largeur proche de "W3" couple le mode fondamental au mode d'ordre supérieur uniquement dans la section où la diffraction de Bragg entre les deux modes est autorisée.	31
Figure I.28: illustration de l'utilisation de la mini-bande d'arrêt.	32

Figure I.29: Guide d'onde de la structure GaAs à motifs carrés dans l'air montrant la distribution du champ E_y autour du défaut en polarisation (a) rectiligne (b) coudes à 90°	33
Figure I.30: (a) Guide d'ondes.....	33
Figure I.31: Diagrammes de transmission calculés avec la méthode des matrices de transfert (trait plein) et la méthode des éléments finis HFSS (traits pointillées) pour un réseau carré de	35
Figure I.32: Classification des problèmes de la mécanique.	36
Figure I.33: L'étude des spectres d'émission permet de connaître la composition du gaz.	37
Figure I.34: L'étude du spectre d'absorption permet de connaître la composition du milieu absorbant.	38
Figure I.35: Réseau (vu en coupe).	39
Figure I.36: Réseau Vue en coupe.	40
Figure II.1: Principe de construction d'un circulateur à rotation de Faraday [32]	47
Figure II.2: Circulateurs à éléments localisés	48
Figure II.3: Circulateur à guide d'onde.....	48
Figure II.4: Circulateur à jonction triplaque.	49
Figure II.5: Schéma de principe d'un circulateur en Y à trois ports.	54
Figure II.6: (a) Schéma structurel du circulateur MPC dans un guide d'ondes partiellement transparent ; (b) Schéma structurel de 7×8 TLPC.....	53
Figure II.7: Structures de bande TE des TLPCs Al_2O_3	58
Figure II.8: Isolation numérique et perte d'insertion du circulateur.....	56
Figure II.9: (a) Montage expérimental pour mesurer le PBG des TLPC ; (b) vue de dessus du circulateur MPC ; (c) montage expérimental pour mesurer les caractéristiques de transmission des ports A et B du circulateur MPC ; (d) montage expérimental pour mesurer les caractéristiques de transmission des ports A et C du circulateur MPC.....	57
Figure II.10: Mesure de l'isolation et de la perte d'insertion du circulateur.....	57
Figure II.11 : Circulateur comme duplexeur RF.....	59
Figure II.12: Double circulateur	60
Figure II.13: Combinaison de réseaux pour les liaisons radio : (a) solution basée sur des lters ; (b) solution basée sur des circulateurs [25]	65
Figure III.1: Interface du logiciel COMSOL Multiphysics	65
Figure III.2: Représentation schématique d'un CP-2D déconnecté sans défaut de motif carré.	66

Figure III.3: Représentation de la propagation du champ électrique E_z dans un cristal photonique carré 2D sans défauts.....	67
Figure III.4: Réponse spectrale de transmission d'un CP-2D déconnecté sans carré.	67
Figure III.5: Représentation schématique d'un CP-2D déconnecté avec défaut de motif carré.	72
XI	
Figure III.6: Distribution du champ électrique E_z d'un guide d'ondes à une seule rangée basé sur un maillage carré déconnecté CP-2D (la longueur d'onde $1.8 \mu\text{m}$).	69
Figure III.7: Réponse spectrale en termes de transmission d'un guide d'ondes déconnecté basé sur CP-2D.	69
Figure III.8: Représentation schématique d'un circulateur micro-ondes à trois ports.	75
Figure III.9: Distributions du champ électrique E_z dans le circulateur MPC fonctionnant à la fréquence de $\omega = 0,4132(2\pi c/a)$ pour une lumière d'entrée lancée. (a) depuis le port 1, (b) du port 2, et (c) du port 3.....	76
Figure III.10: Présentation de Paramètre S en fonction de la fréquence, (a) depuis le port 1, (b) du port 2, et (c) du port 3.	77
Figure III.11: Schéma de principe du circulateur proposé avec quatre cristaux de ferrite uniformes enchâssés dans l'air.....	78
Figure III.12: Modèles de champ électrique du circulateur. (a)-(d) Les modèles de champ électrique à la fréquence normalisée sous le champ magnétique sont excités aux ports 1, 2, 3 et 4.	76
Figure III.13: Présentation de Paramètre S en fonction de la fréquence pour les ports 1,2,3, 4.	61-62

Liste des tableaux

Tableau 1: Caractéristiques géométriques principales des réseaux bidimensionnels carré et triangulaire [17].....	13
---	----

TABLE DES MATIERES

Dédicaces.....	I
Remerciements.....	III
Résumés	IV
Abstract	V
Résumé en arabe	VI
Liste des abréviations	VII
Liste des figures.....	IX
Liste des tableaux	XIII
Introduction générale.....	1
Chapitre I.....	4
I.1 Introduction :.....	5
I.2 Les cristaux photoniques naturels :.....	5
I.2.1 Les papillons :.....	6
I.2.2 Les oiseaux :.....	7
I.2.3 Les opales :.....	9
I.3 Les cristaux photoniques artificiels :.....	10
I.3.1 Cristaux photoniques unidimensionnels "CP-1D" :.....	10
I.3.2 Cristaux photoniques bidimensionnels "CP-2D" :.....	11
I.3.2.1 Propriétés physique et géométriques d'un Cp-2d:.....	12
a- Contraste d'indice :.....	12
I.3.2.2 Facteur de remplissage :.....	12
I.3.2.1 Maille élémentaire :.....	13
I.3.3 Les cristaux photoniques tridimensionnelles « CP-3D » :.....	14
I.3.3.1 Structures « Tas de bois » :.....	14
I.3.3.2 Les opales :.....	15
I.4 Zone de Brillouin :.....	16

I.4.1	Zone de Brillouin en cristaux photoniques unidimensionnels :	16
I.4.2	Zone de Brillouin bidimensionnelle :	17
I.5	Polarisation de l'onde électromagnétique (TE et TM) :	18
I.6	Diagramme de dispersion :	18
I.7	Les équations de maxwell et équation aux valeurs propres :	19
I.8	Diagramme de bande :	20
I.9	Carte de bande :	23
I.10	Les défauts des cristaux photoniques :	24
I.10.1	Défauts ponctuels :	24
I.10.2	Défauts linéaires :	25
I.10.3	Défauts couplés :	26
I.11	Applications des cristaux photoniques CP2D :	26
I.11.1	Filtre add / drop :	26
I.11.2	Cavité résonante :	27
I.11.3	Phénomène de super prisme :	29
I.11.4	DEMUX-coupler :	30
I.11.5	Guides d'ondes :	32
I.12	Les méthodes d'analyse des cristaux photoniques :	34
I.12.1	La méthode FDTD (Finite-Difference Time-Domain) :	34
I.12.2	La méthode de matrice de transfert (TMM):	34
I.12.3	La méthode des éléments finis FEM :	35
I.12.4	Domaines d'application de la méthode des éléments finis :	36
I.12.5	La méthode des réseaux de diffraction : [44]	37
I.12.5.1	Intérêt d'un réseau :	37
b-	Spectre d'émission :	37
c-	Spectre d'absorption :	37
d-	Dispersion de la lumière avec un réseau :	38

I.12.5.2	Réseau de transmission :	38
I.12.5.3	Théorie élémentaire du réseau :	39
I.12.6	La méthode des liaisons forte : [45]	41
I.13	Conclusion :	42
Chapitre II	.....	48
Les circulateurs en cristaux photonique	.....	48
II.1	Introduction :	48
II.2	Circulateurs :	48
II.2.1	Principales caractéristiques d'un circulateur :	48
II.2.1.1	Isolation :	49
II.2.1.2	Perte d'insertion :	49
II.2.1.3	Bande passante :	49
II.2.1.4	Capacité de puissance :	49
II.2.1.5	Température :	50
II.2.1.6	Accordabilité de fréquence :	50
II.3	Les types de circulateurs :	50
II.3.1	Circulateurs à ferrite :	50
II.3.2	Circulateur à effet Faraday :	51
II.3.3	Le circulateur à éléments localisés :	51
II.3.4	Circulateur à déplacement de champs :	52
II.3.5	Circulateur à jonction Y :	52
II.3.5.1	Guide d'ondes :	52
II.3.5.2	Structure Triplaque :	53
II.4	Principe de fonctionnement d'un circulateur	53
II.4.1	La matrice S d'un circulateur.....	54
II.5	Les circulateurs en cristaux photoniques :	55
II.5.1	Circulateur à cristal photonique de type T Al ₂ O ₃ a réseaux carrés :	56

II.5.2	Analyse théorique :.....	56
II.5.2.1	Conception du circulateur MPC :.....	56
II.5.2.2	Structure de bande de mot TE par PCS :	57
II.5.2.3	Propriétés gyromagnétiques de la ferrite :	58
II.5.3	Fonction du circulateur MPC:	59
II.5.4	Circulateur 2D-MPCS en forme de Y :.....	60
II.6	Applications en circulateurs:	63
II.6.1	Duplexeur :.....	63
II.6.2	Isolation :.....	63
II.6.3	Amplificateur de réflexion :	64
II.6.4	Combiner :.....	64
II.6.5	Quelque Domaines d'application :.....	65
II.7	Conclusion :.....	66
Chapitre III	.....	67
Présentation des résultats de SIMULATION	.....	67
Introduction :	.....	68
III.1	Présentation du logiciel COMSOL Multiphysics :	68
III.2	Résultats des calculs et discussion :	69
III.2.1	Les guides d'ondes :	70
III.2.1.1	Cristal photonique 2D sans défaut :.....	70
e-	Maille carrée :.....	70
III.2.1.2	Cristal photonique 2D avec défaut :.....	72
f-	Guides d'ondes carrés à rangée unique basés sur une maille carrée CP-2D :. 72	72
III.2.2	Circulateur avec trois ports micro-ondes :.....	74
III.2.3	Circulateur à cristaux photoniques à 4 ports :	77
III.3	Conclusion :.....	84
Conclusion générale	.....	85

Références bibliographiques : 110

Introduction générale

Contrôler la propagation de la lumière : tel est l'objectif de la photonique, une branche récente et prometteuse de l'optique qui a donné naissance aux diodes électroluminescentes et aux fibres optiques structurées. Pour répondre à ce besoin, on utilise des matériaux artificiellement structurés comme les cristaux photoniques. Ces derniers sont couramment utilisés pour leurs propriétés dispersives. La relation de dispersion $\omega = \omega(\mathbf{k})$ qui résulte de cette variation périodique a la forme d'une structure de bande à l'intérieur de laquelle il existe des bandes interdites photoniques où la propagation du champ électromagnétique est interdite. En dehors de ces bandes, c'est-à-dire dans les bandes photoniques, se trouvent les propriétés de dispersion des cristaux photoniques. En effet, la propagation du champ électromagnétique dans les cristaux photoniques est régie par la forme des bandes photoniques. [1].

Le but du travail présenté dans ce mémoire est la conception d'un circulateur optique à hautes performances pour les applications proche infra-rouge.

En particulier, leur capacité à courber le flux de lumière a été démontrée [2]. Leur principe est basé sur la variation d'un paramètre de la maille du cristal photonique : dimension, facteur de remplissage, permittivité. Avec les cristaux photoniques, on peut réaliser des fonctions relativement simples comme le démultiplexage, le couplage, l'imitation d'un matériau naturel structuré...etc. [3]

Dans le premier chapitre, nous présentons les cristaux photoniques en partant des premiers travaux fondateurs de Lord Rayleigh en 1887. Il a travaillé sur ce qui est aujourd'hui le premier cristal photonique unidimensionnel : le miroir de Bragg. Ses travaux ont ensuite été étendus à des structures à deux et trois dimensions.

Nous rappelons la relation de dispersion qui lie la pulsation ω au vecteur d'onde \mathbf{k} d'une onde monochromatique dans le vide et dans un milieu. Cette relation de dispersion, dont l'étude peut être limitée à la zone de Brillouin dite irréductible, a la forme d'une structure de bande dont on peut déduire les vitesses et indices de phase et de groupe.

En étendant cette étude à l'ensemble de la zone de Brillouin, on obtient une représentation tridimensionnelle de cette relation : ce sont les surfaces iso-fréquentielles dont on déduit les courbes iso-fréquentielles utiles pour déterminer la direction de propagation d'une onde monochromatique dans un cristal photonique. Elles permettent de mettre en évidence des propriétés remarquables de la dispersion de la lumière : effet de super-prisme, auto-collimation, ultra-réfractivité et réfraction négative. Nous terminons ce premier chapitre en abordant le cas de certaines espèces animales qui présentent des caractéristiques similaires

aux cristaux photoniques : ils sont naturellement présents sur les ailes de certains papillons et oiseaux, sur les opales...Aussi, dans ce chapitre consacré au développement des méthodes et des outils numériques utilisés dans ce travail, nous abordons tout d'abord l'étude théorique de la propagation des ondes électromagnétiques dans l'air et dans les matériaux homogènes. Pour ce faire, nous rappelons les équations de Maxwell et l'équation des ondes. Et Une partie de ce chapitre est ensuite consacrée à la méthode de résolution numérique des équations de Maxwell que nous avons utilisée au cours des trois dernières années : il s'agit de la méthode FDTD (FiniteDifference Time Domain), une méthode aux différences finies dans le domaine temporel basée sur la résolution en temps et en espace des équations différentielles de Maxwell.

Nous aborderons ensuite les techniques de modélisation et les principes de défauts ponctuels qui existent dans les PC, ainsi que les diverses applications optiques qui peuvent être dérivées de ces matériaux.

Le deuxième chapitre est consacré aux circulateurs à cristaux photoniques Tout d'abord, les bases des circulateurs seront présentées, puis les principales caractéristiques d'un circulateur telles que la transmission, l'isolation, la bande passante, la capacité de puissance, etc. Ensuite, les types de circulateurs et le principe de fonctionnement et la matrice S d'un circulateur. Enfin, les applications des circulateurs telles que le découplage, la combinaison et l'isolation sont également proposées.

Enfin, dans le dernier chapitre de ce document, nous présenterons brièvement notre outil de simulation, le logiciel COMSOL, et étudierons les différents résultats de simulation ainsi que la distribution du champ électrique pour plusieurs topologies de circulateur à cristaux photoniques bidimensionnel. Ce document sera enfin clôturé par une conclusion générale, et une référence bibliographique.

Chapitre I

Généralités sur les cristaux photoniques

I.1 Introduction :

Les cristaux photoniques peuvent être fabriqués pour une, deux ou trois dimensions. Les cristaux photoniques unidimensionnels peuvent être constitués de couches déposées ou collées ensemble. Ceux bidimensionnels peuvent être réalisés par photolithographie ou en perçant des trous dans un substrat approprié. Les méthodes de fabrication pour celles en trois dimensions comprennent le perçage sous différents angles, l'empilement de plusieurs couches 2D les unes sur les autres, l'écriture directe au laser ou, par exemple, l'instauration d'un auto-assemblage de sphères dans une matrice et la dissolution des sphères Figure I.1 [4].

Les cristaux photoniques sont des structures artificielles ou naturelles, diélectriques, semi-conductrices ou métallo-diélectriques dont l'indice de réfraction est modulé périodiquement à l'échelle de la longueur d'onde, selon plusieurs directions de l'espace avec un contraste d'indice suffisamment élevé. Un cristal photonique peut présenter des bandes d'énergie interdites aux photons dans un certain domaine spectral.

L'objectif de ce premier chapitre est de présenter quelques bases théoriques des cristaux photoniques. Les différents types de structures permettant d'obtenir des bandes interdites photoniques seront présentés [5].

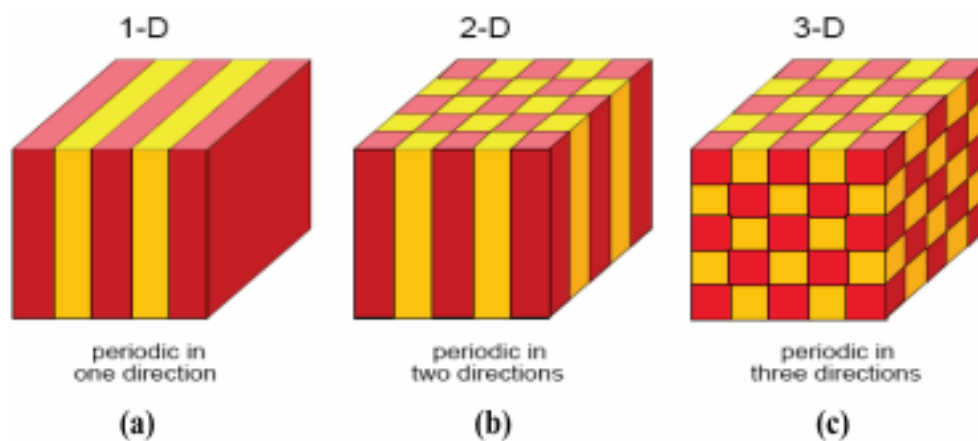


Figure I.1: Représentation des cristaux photoniques unidimensionnels (1D), bidimensionnels (2D) et tridimensionnels (3D).

I.2 Les cristaux photoniques naturels :

L'intuition naturelle consiste à attribuer les couleurs que l'on trouve dans les mondes animal, végétal et minéral à l'absorption sélective de la lumière due à la présence de pigments. Si l'on prend l'exemple de la chlorophylle, elle donne sa couleur verte aux plantes suite à

l'absorption de la lumière rouge et bleue. Cependant, toutes les couleurs rencontrées ne doivent pas leur présence à un phénomène aussi simple que l'absorption. En effet, des études ont montré que des structures naturelles pouvaient avoir exactement les mêmes caractéristiques que les cristaux photoniques artificiels. Les colorations vives et très caractéristiques (et souvent très directionnelles) de certaines espèces sont directionnelles) de certaines espèces sont parfois dues à la présence de structures relativement complexes présentant un arrangement périodique. Elles participent notamment à la communication intraspécifique (entre mâle et femelle) ou interspécifique (couleurs d'avertissement) [6].

Dans cette section, nous présentons brièvement les endroits où il est possible de trouver des structures naturelles de cristaux photoniques.

I.2.1 Les papillons :

Il existe plus de 100 000 espèces de papillons dans la nature et l'on pense souvent, à tort, que cet insecte est très fragile. Pourtant, le papillon s'est adapté, depuis des millions d'années, à des climats et des milieux naturels très différents, comme le Morpho, qui vit en Amazonie. Le secret de son incroyable couleur bleue réside dans la structure particulière de ses ailes. Cette structure naturelle lui confère de nombreuses autres propriétés qui sont étudiées par une science récente : la photonique. La difficulté de la photonique est qu'il faut structurer la matière à une échelle où nous sommes pratiquement incapables de le faire. L'idée ici est de chercher dans la nature des structures que nous ne sommes pas encore capables de faire, mais que nous pourrions utiliser dans le futur. Le Morpho, comme d'autres papillons, a développé des stratégies aux applications multiples. Sa couleur, par exemple, n'est pas due à des pigments, mais à la diffraction des rayons lumineux sur ses ailes, ce qui permet d'envisager de nouveaux tissus ou écrans moins gourmands en énergie Figure I.2 [7][8].



Figure I.2: Les papillons sont parmi les insectes les plus colorés. Leurs ailes présentent des caractéristiques assimilables à celles des cristaux photoniques comme le montre la figure de droite [9].

I.2.2 Les oiseaux :

Comme pour les papillons que nous venons d'évoquer, l'une des caractéristiques les plus admirables des oiseaux est celle de leurs couleurs qui leur permettent d'affirmer leur identité. Ce sont à la fois les pigments et la structure périodique de leurs plumes qui contribuent à l'absorption et la diffraction de la lumière. En effet, les pigments absorbent une partie de la lumière solaire et renvoient d'autres couleurs à l'œil. A ces couleurs "pigmentaires" s'opposent les couleurs "structurelles", qui naissent de la diffraction du rayonnement lumineux par les micro-structures des plumes. Alors que les couleurs "pigmentaires" sont stables, les couleurs "structurelles" varient souvent en fonction de l'angle d'incidence de la lumière. En effet, dans le cas du paon, en observant une de ces plumes au microscope, on constate que toutes les couleurs naissent dans les barbules des plumes. Les barbules sont des lames étroites constituées d'une succession de petites cuvettes séparées par un seuil transversal. Au fond de ces cuvettes se trouvent de fines lamelles parallèles qui peuvent être considérées comme des miroirs réfléchissant la lumière incidente. Le parallèle avec les cristaux photoniques unidimensionnels est alors évident et l'on peut en déduire que l'intensité de la lumière réfléchi par la plume dépendra de la longueur d'onde et de l'angle d'observation, d'où la sensation de ruissellement de couleur sur les plumes du paon [10]

Figure I.3.

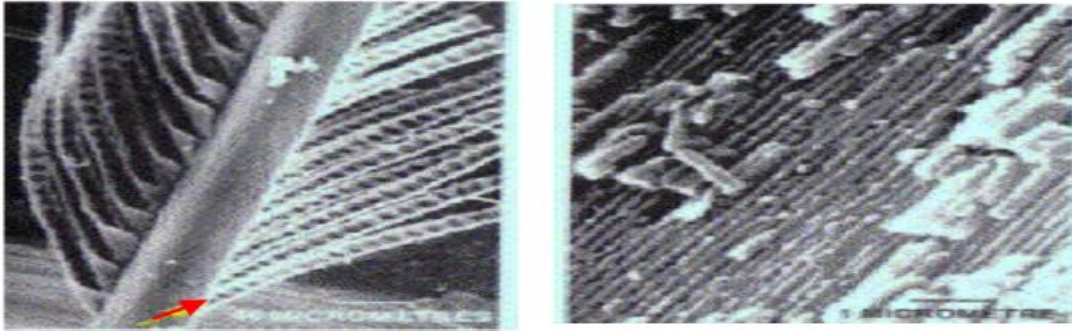


Figure I.3: Agrandissement d'une plume de paon au microscope montrant la structure des barbules. Chaque barbule est divisée en une série de cuvettes (flèche rouge). Ces cuvettes sont tapissées d'une multitude de micro lamelles régulièrement espacées (figure de droit).

I.2.3 Les opales :

La figure I.4 montre un exemple d'opale naturelle. C'est un minéral typique d'origine sédimentaire formé par le dépôt chimique d'eaux très riches en silice et par l'accumulation de squelettes d'organismes marins. C'est un minéral colloïdal amorphe, ou microcristallin, qui contient de la silice et de l'oxygène dans un rapport d'un à deux, comme le quartz, ainsi que de l'eau. On la trouve principalement sous forme de globules et de croûtes de différentes couleurs. L'opale comporte plusieurs sous-variétés, dont certaines sont utilisées en joaillerie et classées parmi les pierres fines ; ces variétés se distinguent par leur origine, la couleur du fond ou sa nature. Sans jeu de couleurs, elle est classée comme "commune", avec jeu de couleurs, elle est classée comme "précieuse" ou "noble". Le "motif arlequin" désigne une distribution extrêmement rare des couleurs d'une opale, celle des carrés bien définis, mais ce n'est pas une variété. Mais ce n'est pas une variété. Une opale arlequin peut être noire, blanche, boulder, etc. Une étude au microscope électronique a permis de révéler sa structure à caractère périodique. Elle est Elle est formée de petites sphères entourées d'espaces vides équidistants. Face à la lumière ultraviolette, elle présente souvent une fluorescence jaune ou verte. Les microbilles de silice peuvent être considérées comme un réseau de diffraction de la lumière incidente. Même si le contraste d'indice entre l'air et la silice ($n = 1;5$) est faible, nous pouvons utiliser ce type de structures à fort contraste pour réaliser des structures à bande interdite photonique [11].



Figure I.4: Un exemple d'opale naturelle, minérale dans lequel on retrouve certaine propriété des cristaux photonique.

I.3 Les cristaux photoniques artificiels :

I.3.1 Cristaux photoniques unidimensionnels "CP-1D" :

Les cristaux photoniques unidimensionnels sont les structures les plus anciennes qui ont été étudiées. Ils sont principalement utilisés comme miroirs diélectriques (par exemple pour les lasers) ou comme fibres optiques. Au cours de l'année 1972, V.P. Bykov. Ce type de structure, appelé réseau de Bragg, est représenté sur la figure I.5. Il consiste en une alternance, le long d'une même direction de l'espace, de deux matériaux diélectriques de constante diélectrique ϵ_1 et ϵ_2 différentes. Ainsi, lorsqu'une onde incidente se propage à travers l'un de ces deux matériaux et arrive à l'interface entre eux, une partie de cette lumière est réfléchie. Cette réflexion s'accompagne d'un changement de phase de π si l'onde passe d'un milieu à faible indice à un milieu à indice élevé. L'autre partie est transmise au second milieu au sein duquel elle va se propager. L'opération qui vient d'être décrite est répétée pour chaque couche constitutive du miroir de Bragg, comme le montre la figure b. Dans le cas particulier où les deux couches de chaque alternance ont la même épaisseur optique $n_1 a_1 = n_2 a_2 = \lambda/4$, on observe que les ondes réfléchies par toutes les interfaces (1), (2), (3), etc. sont en phase [12].

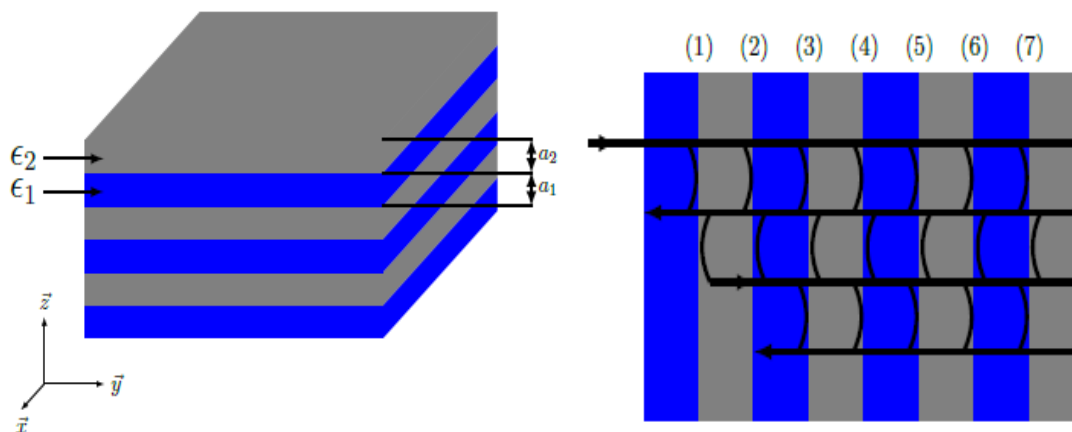


Figure I.5:(a) Structure périodique unidimensionnelle, (b) Représentation schématique de l'interface des ondes réfléchies par chaque dioptré.

Cela correspond à la bande interdite la plus large. Cela permet de réaliser des miroirs diélectriques avec des coefficients de réflexion très élevés, proches de 1. Sans entrer dans le détail des calculs, il a été montré que lorsque les épaisseurs optiques des différentes couches sont égales, la largeur de cette bande interdite $\Delta\omega$ ne dépend que du contraste d'indice

$$\Delta\omega = \frac{4}{\pi}\omega_0 \arcsin\left|\frac{n_1-n_2}{n_1+n_2}\right| \quad (\text{I.1})$$

Où $n_1=\sqrt{\epsilon_1}$ et $n_2=\sqrt{\epsilon_2}$ sont les indices de réfraction des deux matériaux diélectriques et ω_0 la fréquence centrale.

En conclusion de cette étude, il a également formulé des hypothèses sur l'utilisation de structures bidimensionnelles et tridimensionnelles que nous discuterons dans la section suivante [8].

I.3.2 Cristaux photoniques bidimensionnels "CP-2D" :

Les cristaux photoniques offrent une possibilité intéressante de manipuler les propriétés de la lumière. En particulier, si des points quantiques sont contenus dans des cristaux optiques, un fort couplage entre électrons et photons peut être obtenu. Cependant, cette conjugaison n'a jusqu'à présent été réalisée que dans des cristaux photoniques 2D [13].

Les structures de cristaux photoniques qui sont périodiques dans deux directions différentes et homogènes dans la troisième direction sont appelées cristaux photoniques bidimensionnels (2D). Généralement, les cristaux photoniques 2D sont constitués de tiges diélectriques dans l'hôte aérien (piliers à haut pouvoir diélectrique intégrés dans un milieu à faible pouvoir diélectrique) ou de trous d'air dans la région diélectrique (tiges à faible pouvoir diélectrique dans un réseau diélectrique supérieur connecté).

Les structures de dalles de cristaux photoniques sont constituées d'un cristal photonique 2D (cœur) entouré de deux couches d'indice de réfraction effectif inférieur (revêtements) qui fournissent un indice de guidage par réflexion interne totale dans la direction normale au plan du cristal [14].

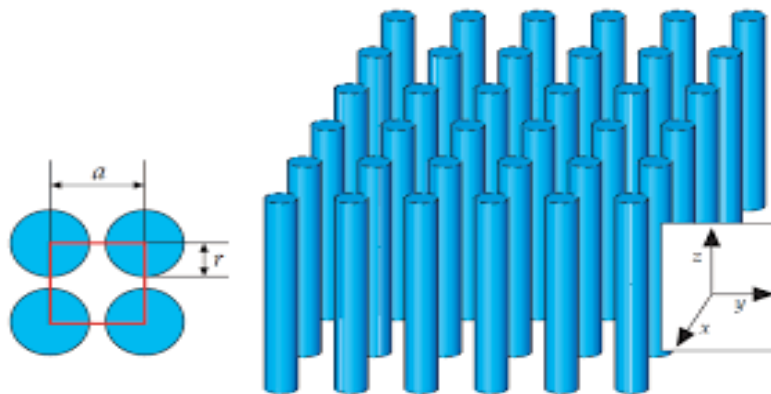


Figure 6:Structure 2D.

I.3.2.1 Propriétés physique et géométriques d'un Cp-2d:

a- *Contraste d'indice :*

Le contraste d'indice est la différence entre les indices de réfraction des deux matériaux. En effet, augmenter le contraste d'indice revient à augmenter la réflectivité des miroirs entourant la microcavité, augmentant ainsi les performances de cette dernière. Néanmoins, on peut voir sur l'encart de la Figure I.7 que l'augmentation du contraste d'indice conduit à une forte réduction de la largeur du pic de réflectivité conjuguée lié à la largeur de la résonance. Les très petites longueurs spectrales calculées pourraient poser des problèmes pour les applications pratiques. [15]

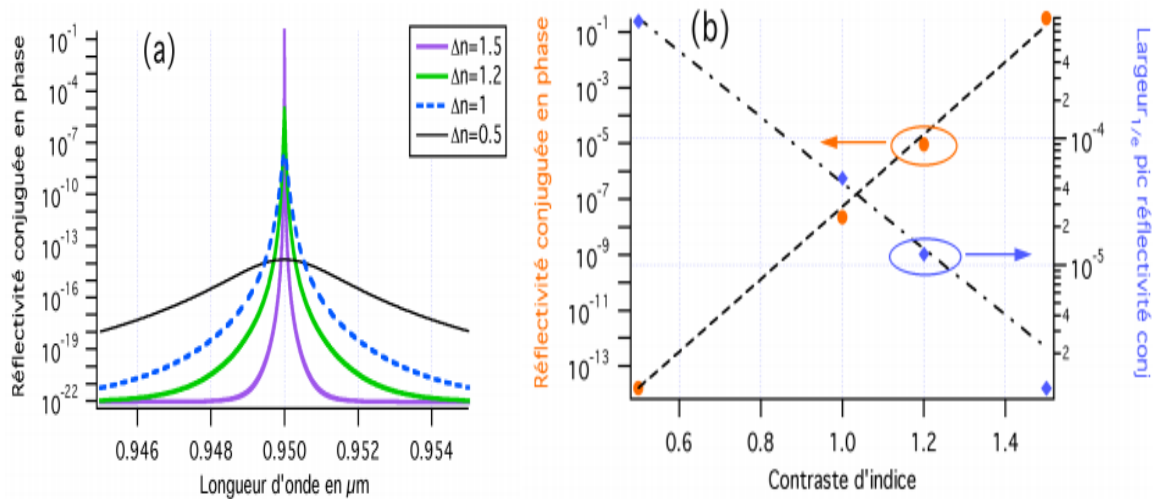


Figure I.7: Réflectivité conjuguée et contraste d'indice.

(a) Spectre de réflectivité conjuguée pour différents contrastes d'indice

(b) Evolution du pic de réflectivité conjuguée (points) et de la largeur à 1/e de celle-ci en fonction du contraste d'indice (losanges).

I.3.2.2 Facteur de remplissage :

Le facteur de remplissage définit la cellule élémentaire dans l'espace direct. Pour le réseau bidimensionnel, c'est le rapport entre la surface occupée par la particule élémentaire et la surface de la cellule élémentaire. [16]

$$f = \frac{A_{\text{motif}}}{A_{\text{maille élémentaire}}} \quad (I.2)$$

I.3.2.1 Maille élémentaire :

Les structures 2D sont des cristaux dont la permittivité diélectrique est périodique dans deux dimensions et reste dans deux dimensions et reste invariable dans la troisième dimension. Elles sont regroupées principalement selon trois familles qui sont illustrées sur la figure I.8. [9]

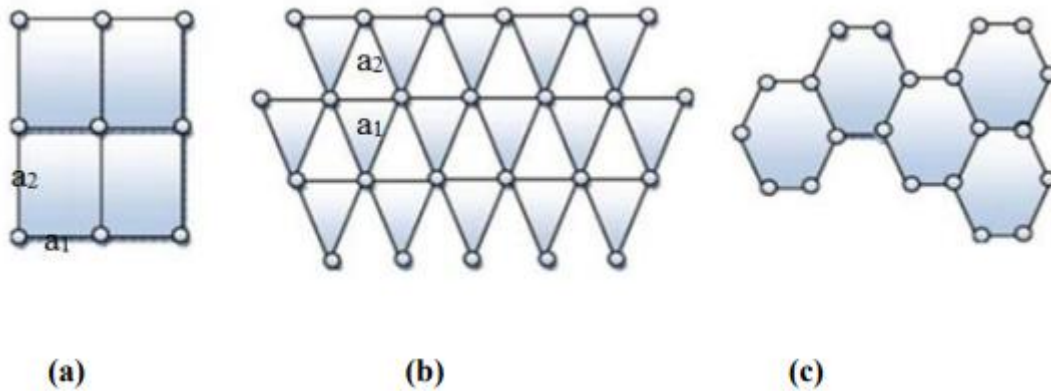


Figure I.8:Réseau direct 2D : (a) structure carrée, (b)structure triangulaire, (c) structure hexagonale.

Tableau 1: Caractéristiques géométriques principales des réseaux bidimensionnels carré et triangulaire [17].

	Réseaux carré	Réseau triangulaire
Vecteur direct (a_1, a_2)	$a_1=a(1,0)$ $a_2=a(0,1)$	$a_1=a(1,0)$ $a_2= a(\frac{1}{2}, \frac{\sqrt{3}}{2})$
Vecteur réciproque (b_1, b_2)	$b_1=\frac{2\pi}{a}(1,0)$ $b_2=\frac{2\pi}{a}(0,1)$	$b_1=\frac{2\pi}{a}(1, \frac{\sqrt{3}}{3})$ $b_2=\frac{2\pi}{a}(0, \frac{2\sqrt{3}}{3})$
Facteur de remplissage en air f	$f= \pi (\frac{r^2}{a^2})$	$f= \frac{2\pi}{\sqrt{3}} (\frac{r^2}{a^2})$

I.3.3 Les cristaux photoniques tridimensionnelles « CP-3D » :

Les cristaux photoniques tridimensionnels (CP-3D) constituent la seule classe de structures dont la dimensionnalité permet d'obtenir une bande d'énergie interdite omnidirectionnelle, et on peut donc, par ce biais, commander la propagation de lumière selon toutes les directions. Les CP-3D concentrent encore beaucoup d'efforts de recherche. Le premier CP-3D a été fabriqué par K.M Ho et al. Il était formé de sphères de silicium ordonnées sur une structure diamant. Plus tard, en 1991 E. Yablonovitch proposa une structure 3D conçue

pour opérer en régime micro-ondes. Cette structure, la Yablonovite, a été fabriquée en perçant des trous dans du plexiglas selon les trois axes $\langle 110 \rangle$ d'une maille diamant. De nombreuses méthodes de fabrication de structures 3D ont été depuis proposées. Nous allons développer, à titre d'exemple, deux d'entre elles [18].

I.3.3.1 Structures « Tas de bois » :

Ces structures 3D sont obtenues en déposant, par couches successives, des rubans de silicium poly-cristallin dans des sillons de silice (Figure I.9). Après avoir défini la structure, la silice est retirée afin d'obtenir un CP-3D Si/air avec un contraste d'indice très élevé, permettant d'ouvrir une bande interdite photonique omnidirectionnelle. Des structures similaires à base de GaAs ont été proposées par Noda et al. Leurs procédés de fabrication exploitent les technologies standards de micro-fabrication et permet l'insertion déterministe de défauts [19].

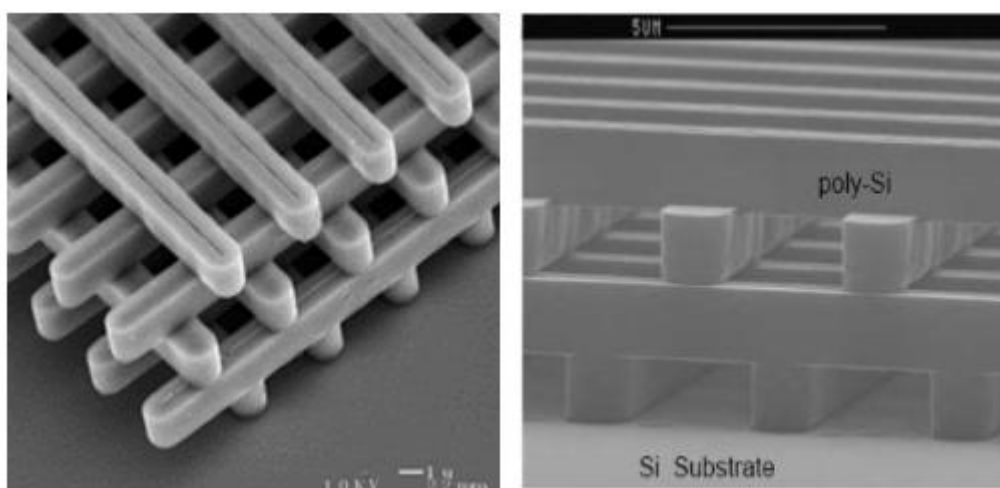


Figure I.9: « Structures tas de bois ». Images MEB d'une structure fabriquée par lithographie UV du silicium [20].

I.3.3.2 Les opales :

Ces structures originales sont réalisées par voie chimique. Leur procédé de fabrication est une alternative bon marché aux structures obtenues par les techniques de micro/nano-lithographie. La première opale a été réalisée par sédimentation de sphères de silice en solution. Les microsphères sont organisées par effet de gravité selon un réseau cubique à faces centrées (cfc). Les premières réalisations souffraient d'un nombre important de défauts. La technique de croissance auto-organisée proposée par Y.A. Vlasov et al. a permis de réduire considérablement leur nombre. La structure la plus intéressante à étudier est l'opale inverse (Figure I.10), car elle présente, contrairement au réseau cfc de sphères, des bandes d'énergies interdites complètes. Cette structure est généralement obtenue en infiltrant un matériau de haut indice dans les interstices qui séparent les sphères. Ces dernières sont ensuite dissoutes chimiquement pour aboutir à la structure finale de sphères d'air dans une matrice de haut indice (figure I.11) [21].

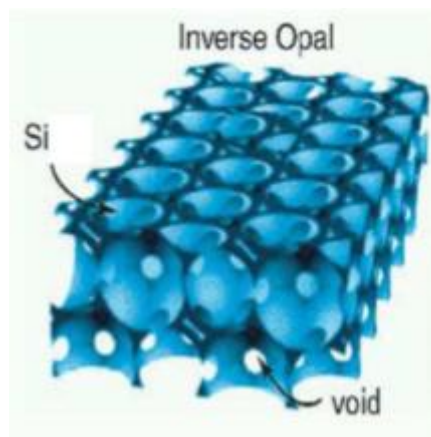


Figure I.10:Schéma d'une opale inverse à base de Silicium

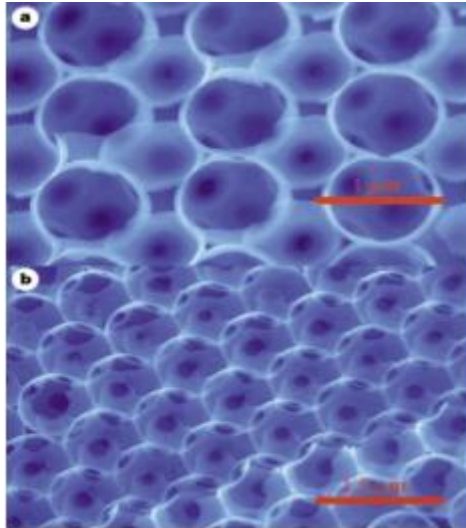


Figure I.11: Opale inverse à base de silicium [22]

I.4 Zone de Brillouin :

La zone de Brillouin est définie comme étant la cellule de Wigner-Seitz du réseau réciproque et est donc la cellule primitive de l'espace réciproque. La zone de Brillouin est importante pour décrire les ondes électromagnétiques dans un milieu périodique, comme nous le verrons plus loin.

La zone de Brillouin peut être dessinée par une procédure similaire à celle utilisée pour dessiner la cellule de Wigner-Seitz dans un réseau réel. Tracez des lignes pour relier un point de réseau donné à tous les points de réseau voisins, au milieu et à la normale de ces lignes, tracez de nouvelles lignes ou plans, le plus petit volume ainsi délimité est la première zone de Brillouin. Nous verrons ci-dessous comment dessiner la zone de Brillouin pour des treillis à une, deux et trois dimensions. [23]

I.4.1 Zone de Brillouin en cristaux photoniques unidimensionnels :

Dans le cas 1D, la symétrie du cristal par rapport à l'origine a pour conséquence que, si une onde de vecteur « k » et de fréquence ω est solution du problème, alors l'onde se propageant en sens opposé, de vecteur « $-k$ » et de même fréquence. On peut ainsi restreindre l'intervalle d'étude à $[0 ; +\frac{\pi}{a}]$ au lieu de $[-\frac{\pi}{a} ; +\frac{\pi}{a}]$ où « a » est le pas du réseau [24].

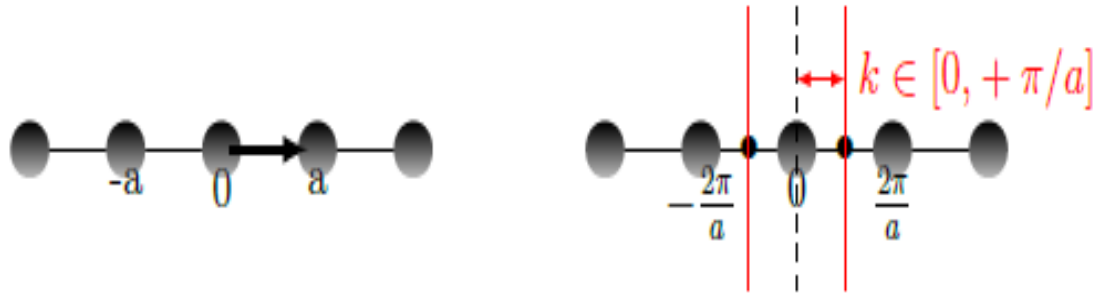


Figure I.12:Exemple de cristal photonique unidimensionnel (à gauche) et zone de Brillouin correspondante (à droite). L'intervalle $[-\pi/a ; +\pi/a]$ est la première zone de Brillouin et $[0 ; +\pi/a]$ la zone de Brillouin irréductible.

I.4.2 Zone de Brillouin bidimensionnelle :

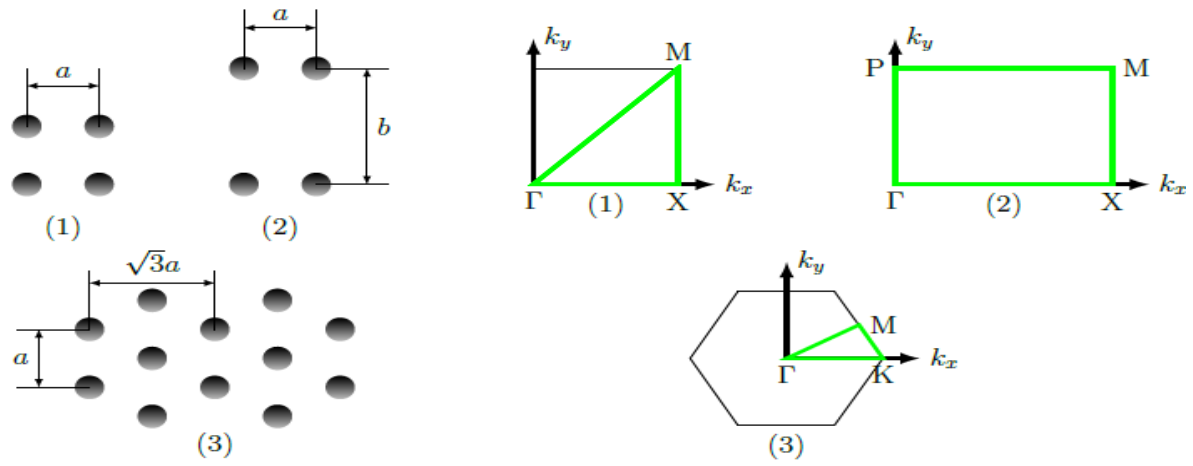


Figure I.13:Cristaux photoniques bidimensionnels à symétries (1) carrée, (2) rectangulaire et (3) triangulaire avec leurs zones de Brillouin irréductibles correspondantes (en trait vert).

Considérons maintenant le cristal bidimensionnel à symétrie carrée. Le réseau réciproque est aussi un réseau carré et la première zone de Brillouin est définie par :

$$-\frac{\pi}{a} < k_x \leq \frac{\pi}{a} \text{ et } -\frac{\pi}{a} < k_y \leq \frac{\pi}{a}$$

Les points $\Gamma (0 ; 0)$, $X (\frac{\pi}{a} ; 0)$ et $M (\frac{\pi}{a} ; \frac{\pi}{a})$ désignent les trois sommets du triangle qui constitue la zone de Brillouin irréductible du réseau carré.

Dans le cas d'un cristal bidimensionnel à symétrie rectangulaire de longueur a et de largeur b. Les sommets sont habituellement désignés par $\Gamma (0 ; 0)$, $X (\frac{\pi}{a} ; 0)$ et $M (\frac{\pi}{a} ; \frac{\pi}{b})$, $P(0 ; \frac{\pi}{b})$. Là aussi, dans l'étude des diagrammes de dispersion, on se limite aux quatre côtés du rectangle.

Dans le cas d'un cristal bidimensionnel à symétrie hexagonale, dans ce cas, on a six axes de symétrie qui se déduisent les uns des autres par des rotations de $\pi/6$ avec une invariance par rotation de $\pi/3$. Les sommets sont habituellement désignés par $\Gamma(0 ; 0)$, $K(\frac{4\pi}{3a}; 0)$ et $M(\frac{\pi}{a}; \frac{\pi}{\sqrt{3}a})$, dans l'étude des diagrammes de dispersion, on se limite aux trois côtés du triangle. [19]

I.5 Polarisation de l'onde électromagnétique (TE et TM) :

Pour étudier le comportement d'une onde électromagnétique incidente sur une telle structure, deux polarisations sont possibles :

La polarisation électrique TE correspond au cas où le champ électrique E est parallèle aux cylindres infinis. Tandis que la polarisation magnétique TM correspond au cas où E est perpendiculaire à ceux-ci (figure I.14).

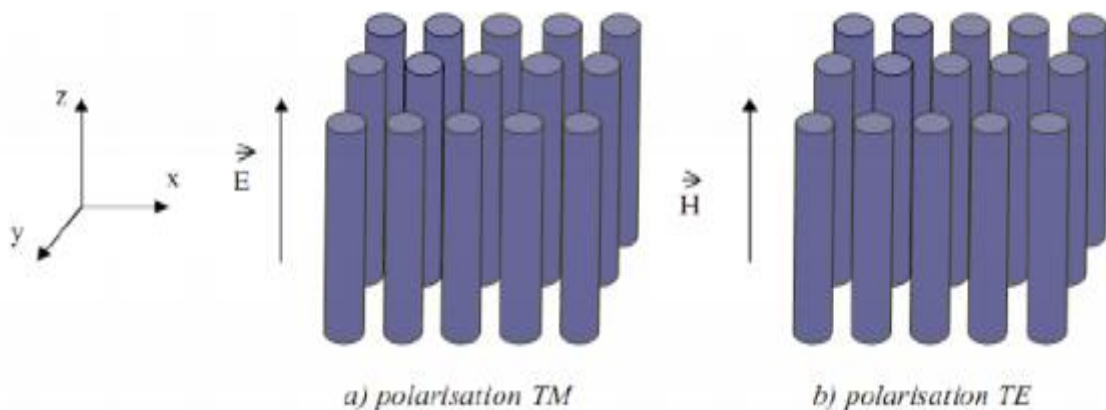


Figure I.14: Représentation des polarisations TE et TM dans un BIP 2D.

Dans les cristaux 2D, les ondes électromagnétiques se propagent dans le plan perpendiculaire aux tiges et peuvent être séparées en deux polarisations TE ou TM. Les bandes interdites qui apparaissent dans chaque cas doivent se chevaucher pour former une bande interdite totale. [25]

I.6 Diagramme de dispersion :

La structure de bande ou le diagramme de dispersion d'un réseau de cristaux photoniques est la représentation graphique de la fréquence (valeurs propres) par rapport à la relation vecteur d'onde (vecteurs propres). Cette relation dépend à la fois des paramètres du

réseau et de la polarisation de la lumière. Dans les systèmes bidimensionnels, les champs électromagnétiques peuvent être divisés en deux polarisations indépendantes : les modes électriques transversaux (TE), où le champ électrique est dans le plan de périodicité et le champ magnétique est perpendiculaire à ce plan, et les modes magnétiques transversaux (TM), où le champ magnétique est dans le plan de périodicité et le champ électrique lui est perpendiculaire. Ainsi, la structure de bande d'un réseau de cristaux photoniques peut également être séparée en bandes TE et TM.

La structure de bande d'un réseau de cristaux photoniques est généralement tracée le long des directions principales qui se trouvent le long des limites globales de la première zone de Brillouin (Figure I.15) [26].

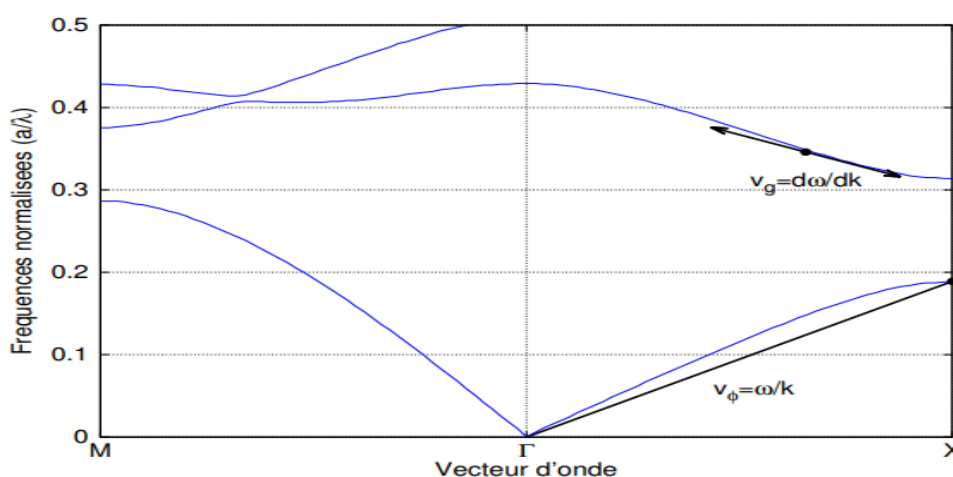


Figure I.15: Diagramme de structure de bandes d'un cristal photonique 2D à maille carrée où sont représentées graphiquement les vitesses de phase v_ϕ et de groupe v_g pour une onde plane se propageant dans la direction $\Gamma - X$. En un point de la courbe de dispersion, la vitesse de phase s'obtient à partir du rapport ω/k et la vitesse de groupe à partir de la tangente à la courbe.

I.7 Les équations de maxwell et équation aux valeurs propres :

La propagation de la lumière dans un diélectrique est régie par les équations de Maxwell :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (I.3)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (I.4)$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 \quad (\text{I.5})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{j} \quad (\text{I.6})$$

Où \vec{B} est l'induction magnétique, \vec{D} est l'induction électrique, ρ est la densité de charge volumique, E est le champ électrique, \vec{H} est le champ magnétique, et \vec{j} est la densité de courant. Puisqu'il n'y a pas de source lumineuse dans le milieu, $\rho=0$ et $\vec{j}=0$. De plus, le matériau est considéré comme linéaire et transparent en première approximation, ce qui permet d'écrire les champs électriques et magnétiques comme des modes harmoniques [27] :

$$\vec{H}(\vec{r}, t) = \vec{H}(\vec{r}) e^{-i\omega t} \quad (\text{I.7})$$

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}(\vec{r}) e^{-i\omega t} \quad (\text{I.8})$$

Dans ces conditions, nous obtenons des équations de Maxwell la relation de base utilisée pour trouver les modes dans les cristaux photoniques :

$$\vec{\nabla} * \left(\frac{1}{\epsilon_r(\vec{r})} \vec{\nabla} * \vec{H}(\vec{r}) \right) = \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 \vec{H}(\vec{r}) \quad (\text{I.9})$$

Cette relation peut être vue comme une équation de valeur propre où l'opérateur Θ est défini :

$$\Theta \vec{H}(\vec{r}) = \vec{\nabla} * \left(\frac{1}{\epsilon_r(\vec{r})} \vec{\nabla} * \vec{H}(\vec{r}) \right) \quad (\text{I.10})$$

Ainsi, l'équation aux valeurs propres est :

$$\Theta \vec{H}(\vec{r}) = \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 \vec{H}(\vec{r}) \quad (\text{I.11})$$

I.8 Diagramme de bande :

Les diagrammes de bande d'un cristal photonique nous permettent de prédire les propriétés d'une structure finie à partir de la connaissance des propriétés d'une structure infinie. La figure I.16 montre la relation de dispersion des modes de Bloch calculée avec HFSS pour un réseau métallique carré bidimensionnel de diamètre $\phi = 2$ mm et de pas $a = 15$ mm en polarisation TM. Ce diagramme montre également une bande interdite en dessous de la fréquence du plasma. La fréquence du plasma est d'environ 6,54 GHz.

La figure I.16 montre également une deuxième bande interdite, mais uniquement dans la direction $\Gamma \rightarrow X$, d'une largeur de 3,2 GHz, située entre 10,3 et 13,5 GHz. L'avantage du diagramme de bande par rapport au diagramme de transmission est qu'il nous permet d'avoir les modes de Bloch dans le cristal photonique et de localiser les bandes interdites et autorisées dans toutes les directions du cristal photonique. Autorisées dans toutes les directions de l'espace. Le diagramme de transmission, quant à lui, nous donne uniquement la transmission dans une direction spécifique[28]. L'avantage du diagramme de transmission, est de pouvoir le comparer facilement avec les résultats des mesures.

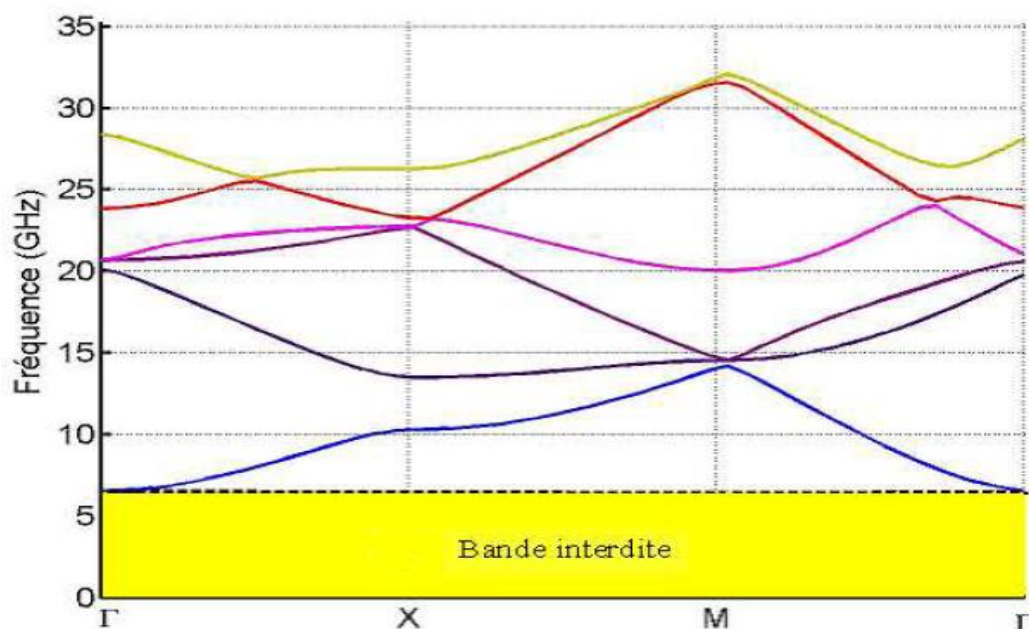


Figure I.16: Structure de bande calculée avec HFSS pour un réseau carré bidimensionnel de tiges cylindriques en cuivre dans l'air, en polarisation TM avec un pas $a = |d_1| = |d_2| = 1$ et un rayon $r = 1/15a$.

Compte tenu de notre objectif (étude des propriétés du cristal photonique), il est plus important de donner les modes propres correspondant à toutes les valeurs possibles de k (k_x ; k_y) dans la zone de Brillouin réduite. On effectue donc un balayage de l'espace défini par $K = \{ \{k_x = 0^\circ ; 0^\circ \leq k_y \leq 180^\circ\} ; \dots ; \{k_x = 10^\circ ; 0^\circ \leq k_y \leq 180^\circ\} ; \dots ; \{k_x = 180^\circ ; 0^\circ \leq k_y \leq 180^\circ\} \}$, ce qui permet de déduire les iso-fréquences comme le montre la figure I.17. Cette figure donne une représentation plus complète de cette relation de dispersion. Nous nous limitons ici à 14 GHz, car notre objectif est de déterminer le comportement du cristal photonique dans la

première bande permise (zone des phénomènes inhabituels) et sa deuxième bande interdite. On considère maintenant toutes les valeurs possibles de la zone de Brillouin et non plus seulement son contour. Le schéma de la figure I.16 n'est autre que la représentation de l'intersection entre les couches de la figure I.17 et les plans verticaux passant par les bords de la zone de Brillouin réduite (représentée dans le plan (k_x, k_y)). La figure I.17, montre aussi que pour les fréquences supérieures à 10GHz, les courbes ont une forme complexe. Afin de vérifier ce point, on prend par exemple une fréquence, $f = 11$ GHz et on fait la projection du nuage de points à cette fréquence sur le plan $(k_x ;k_y)$, on obtient les quatre courbes en noir comme le montre la figure.

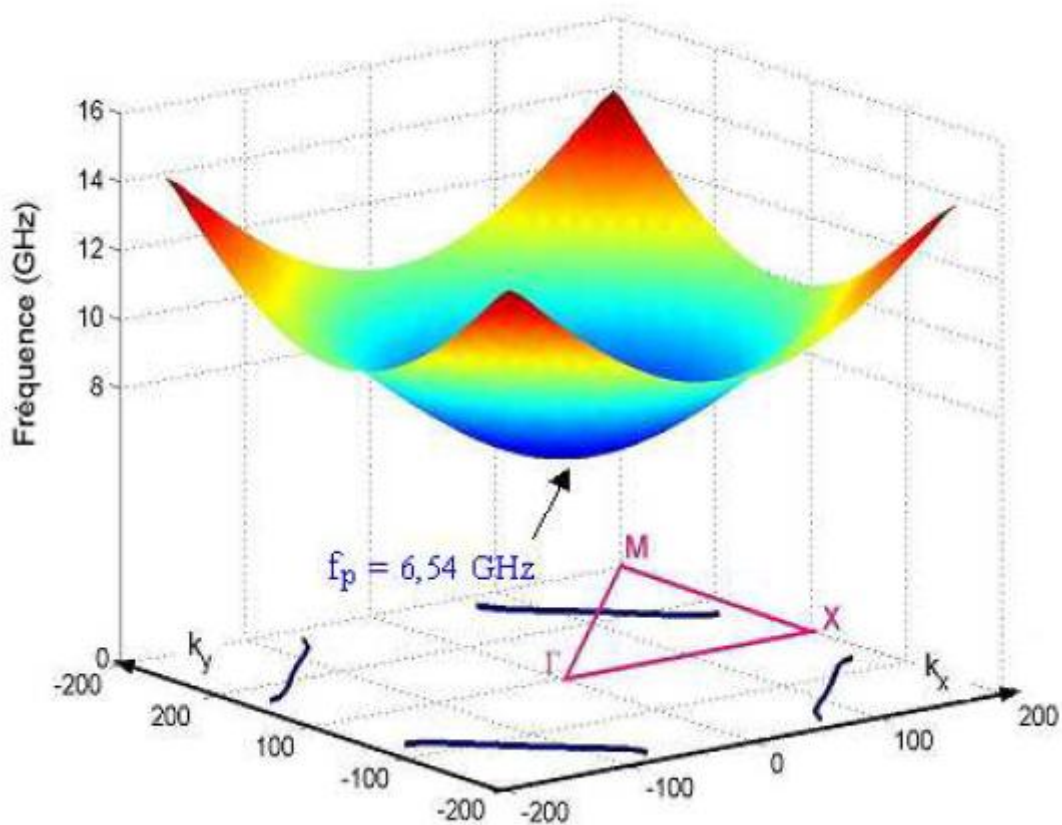


Figure I.17:Diagramme de dispersion 3D calculé avec HFSS pour un réseau carré bidimensionnel de tiges de cuivre cylindriques dans l'air, en polarisation TM du pas $a = 11d_1$ $d_2 = d_1$ et un rayon $r = 1/15a$.

Les quatre courbes en noir, représentent la courbe d'isofréquence du cristal photonique métallique à 11 GHz. Le triangle dans le plan $(k_x ;k_y)$ représente la zone de Brillouin réduite. k_x et k_y sont donnés en degrés.

Le choix d'une structure infinie nous permettra de prédire les propriétés d'une structure finie à partir de la connaissance des propriétés d'une structure infinie. Dans un premier temps, nous

donnerons une estimation théorique du comportement du prisme métallique à travers les courbes de dispersion et la cartographie du champ électrique. Ensuite, nous calculerons le diagramme de rayonnement et enfin nous vérifierons ces propriétés expérimentalement. [29]

I.9 Carte de bande :

Une bande interdite photonique d'un cristal est dite complète (ou totale) lorsqu'une onde dont la fréquence est dans la bande interdite totale ne peut se propager dans le cristal quelles que soient sa polarisation et sa direction de propagation.

Pour un cristal bidimensionnel, une bande est dite complète si, dans le domaine de fréquence considéré, le cristal (infini) ne supporte aucun mode de propagation dans le plan perpendiculaire aux bâtonnets.

La périodicité de l'indice diélectrique doit être étendue à deux ou trois dimensions pour obtenir une bande d'énergie interdite dans toutes les directions du plan ou de l'espace.

Pour ouvrir une bande interdite dans le plan ou l'espace, toutes les bandes interdites unidirectionnelles doivent se chevaucher au moins partiellement sur la première zone de Brillouin.

Le chevauchement sera maximal si les bandes interdites sont centrées à des énergies proches.

Fréquence ($0.221 \leq \Lambda/\lambda \leq 0.329$) dans laquelle aucun vecteur d'onde ne peut se propager dans la structure c'est : la bande interdite Figure I.18 [30].

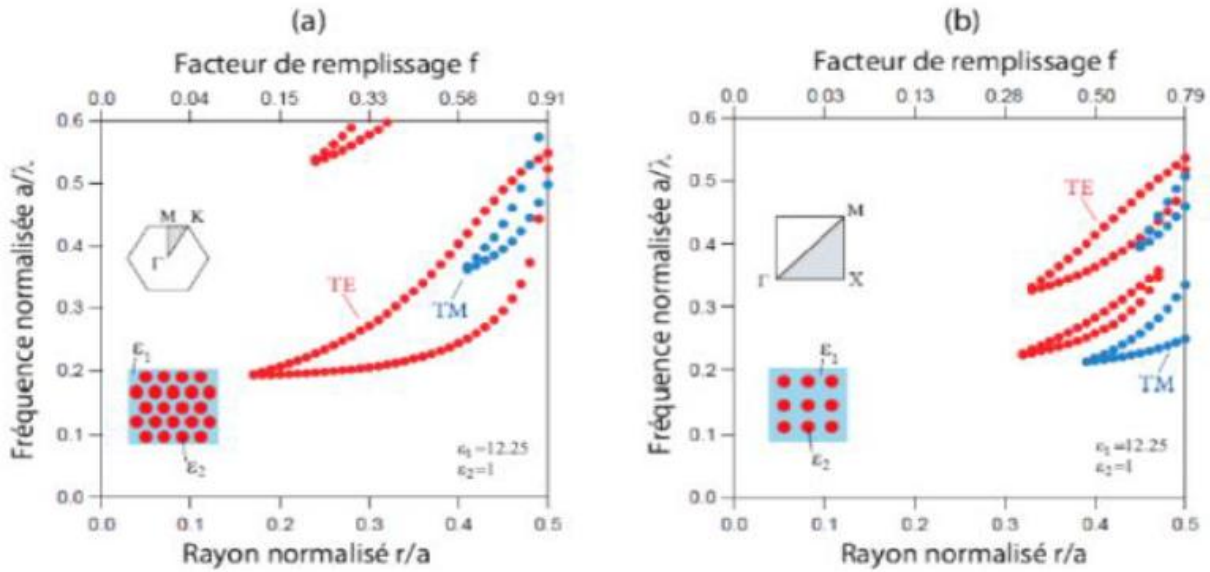


Figure I.18: Cartes des bandes interdites d'un réseau de trous d'air dans une matrice diélectrique ($\epsilon=12.25$) : (a) Réseau triangulaire ; (b) Réseau carré.

I.10 Les défauts des cristaux photoniques :

La majorité des applications de la PC nécessitent l'incorporation précise de défauts extrinsèques. Ces défauts rompent la périodicité du cristal, créant des états autorisés dans la bande interdite photonique. Ces défauts sont appelés défauts extrinsèques, par opposition aux défauts non intentionnels, intrinsèques aux PC, tels que les imperfections de la structure qui apparaissent lors de leur fabrication.

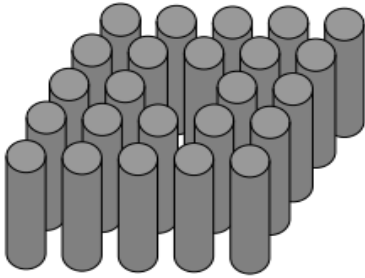
La création d'un défaut extrinsèque est provoquée par la rupture de la périodicité de l'indice de réfraction. Pour ce faire, on modifie la taille d'un certain nombre de briques élémentaires, on les remplace par des objets d'indice de réfraction différent, voire on les supprime. Il est ainsi possible d'obtenir des points, des lignes ou des plans de défauts dans le matériau [30].

Pour les cristaux photoniques bidimensionnels qui nous intéressent particulièrement dans ce travail, plusieurs types de défauts peuvent être considérés [31] [32].

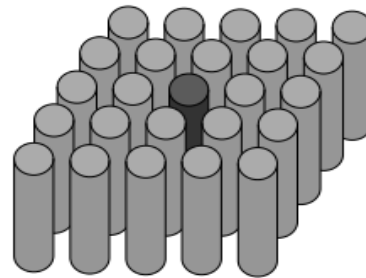
I.10.1 Défauts ponctuels :

- ❖ Ces impuretés ponctuelles provoquent l'apparition d'un mode de défaut dans la bande interdite photonique, ce qui se traduit par l'apparition d'un maximum dans l'intensité transmise. La position de ce mode de défaut, également appelé bande interdite, peut être contrôlée par le volume ou l'indice de réfraction des impuretés.

- ❖ Des équipes de recherche ont couplé l'auto-assemblage de particules et les techniques lithographiques pour contrôler précisément le placement des défauts ponctuels dans les structures.
- ❖ Les modes électromagnétiques introduits par le défaut sont appelés modes de défaut. Il s'agit d'un mode dont la fréquence peut être située dans la bande interdite et qui est localisé autour du site du défaut [28].



Retrait d'un cylindre



Modification de la constante diélectrique d'un cylindre

Figure I.19:Exemples de défauts ponctuels dans un cristal photonique composé de tiges diélectriques

I.10.2 Défauts linéaires :

- ❖ Les défauts étendus sont obtenus en modifiant les cylindres ou les trous sur plusieurs sites voisins. Il existe trois types de défauts étendus, les défauts 1D, 2D ou 3D. Les défauts 2D et 3D consistent en une série de guides 1D orientés dans différentes directions de manière à transporter la lumière sur tous les chemins optiques possibles à l'intérieur du cristal. Les recherches actuelles ont montré que ces guides présentent des pertes importantes et que leur réalisation est loin d'être évidente [33].
- ❖ le défaut 2D conduit à l'apparition d'une bande passante dans la bande interdite, associée à un mode photonique résonnant localisé au niveau du plan du défaut. La position de la bande interdite peut être contrôlée précisément par l'épaisseur du défaut [34].

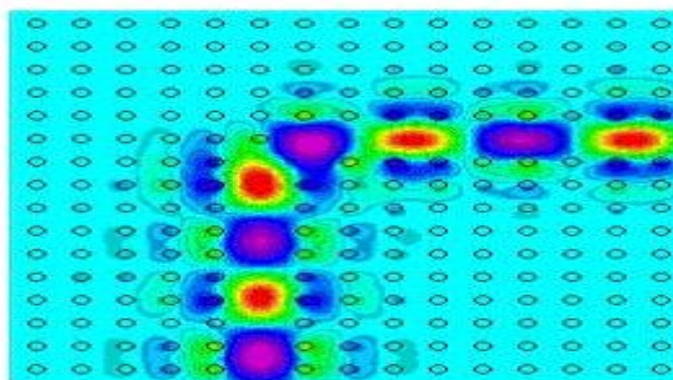


Figure I.20:Simulation de la propagation du champ électromagnétique dans un guide d'onde réalisé dans un cristal photonique.

I.10.3 Défauts couplés :

- ❖ Les défauts couplés sont des défauts suffisamment proches dans le cristal pour échanger de l'énergie.
- ❖ L'utilisation de ce type de défauts dans le domaine des micro-ondes permet également d'améliorer l'efficacité de la réfraction anormale et l'apparition de nouvelles propriétés. [35]

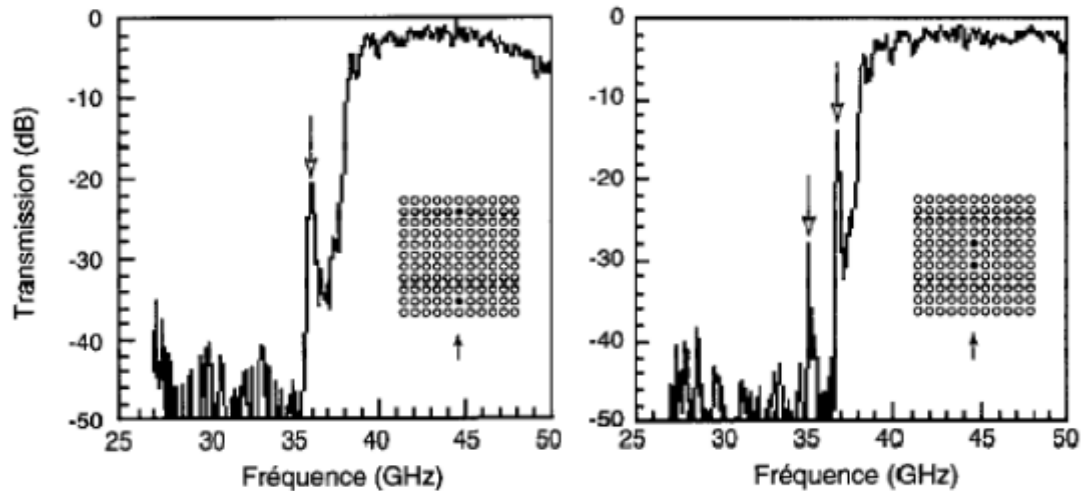


Figure I.21:Diagrammes de transmission mesurés pour un réseau carré de 11 rangées de tiges d'alumine ayant deux défauts. Lorsque les défauts sont espacés l'un de l'autre (à gauche), un seul pic de résonance s'observe (défaut peu profond). Lorsque les défauts sont rapprochés, le pic se dédouble (défauts couplés, à droite) [36].

I.11 Applications des cristaux photoniques CP2D :

Comme nous l'avons vu précédemment, les applications potentielles des matériaux BIP 2D sont nombreuses : contrôle de l'émission spontanée dans les dispositifs, guides d'ondes rectilignes, à grand rayon de courbure, faces miroir, guidage, démultiplexage, etc. guides d'ondes, à grand rayon de courbure, faces miroir, guidage, démultiplexage, dédoublement, filtres, microcavités à haut facteur de qualité, effet superprisme, diffraction, démultiplexage, fractionnement...etc. [37][38] Nous allons donc présenter brièvement quelques exemples d'utilisation des cristaux photoniques bidimensionnels.

I.11.1 Filtre add / drop :

Le filtre add/drop est composé de deux guides d'ondes couplés par un ou deux résonateurs. (figure I.22 a et b) [39]

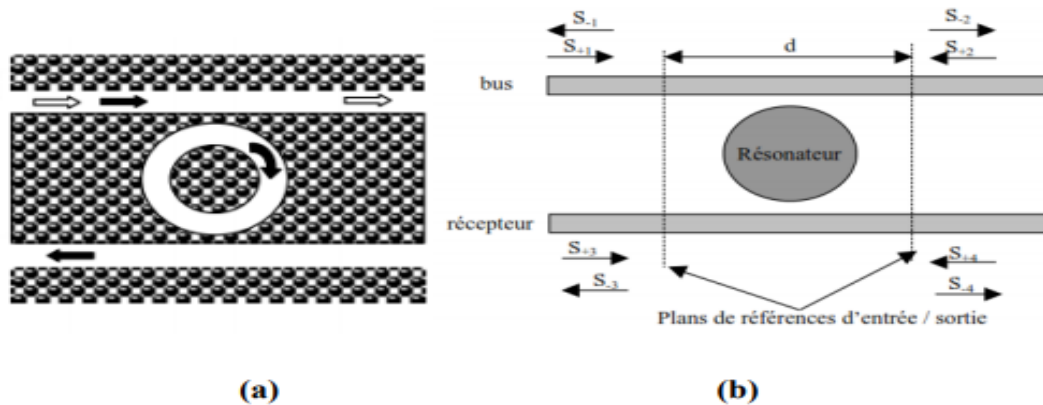


Figure I.22:(a) Représentation d'un filtre add / drop,(b) Principe de fonctionnement. Système à 4 accès constitué d'un résonateur en anneaux et de deux guides d'ondes [40].

Une réalisation expérimentale, a montré près de 80% de la puissance transférée vers l'avant dans le guide d'onde de chute. Le résonateur est une cavité linéaire de dix trous manquants (figure I.23) dont la conception fine et l'exploitation des modes optiques lents ont permis d'accéder à deux modes dégénérés dans la cavité dont les symétries étaient compatibles pour un fonctionnement en add-drop [41].

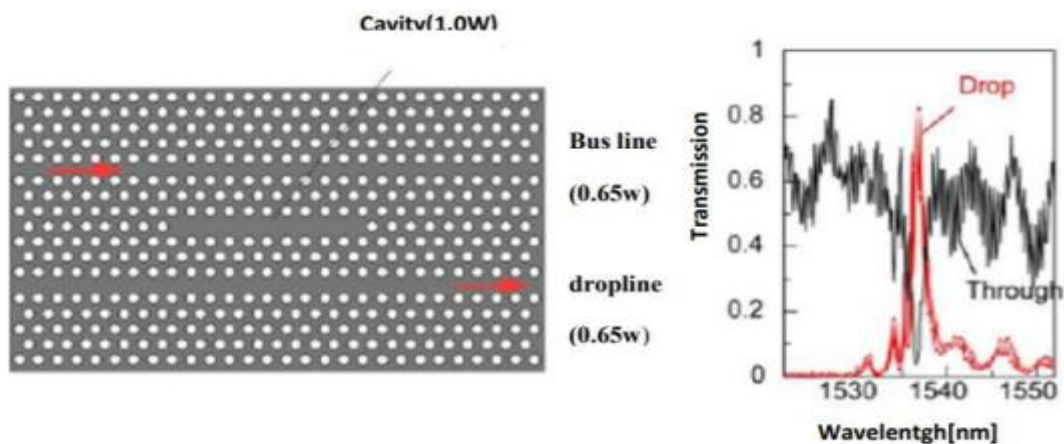


Figure I.23:Exemple d'un filtre add-drop constitué de deux guides d'ondes diffractifs et d'une cavité linéaire dans un cristal photonique à membrane. Un peu plus de 80% de la puissance se propageant dans le guide d'onde bus a été transférée dans le guide d'onde goutte, en avant, autour de 1,537 μm [42].

I.11.2 Cavité résonante :

La présence de défauts dans un cristal permet l'existence de modes localisés dans une fréquence très étroite ; un défaut dans un cristal photonique peut ainsi servir de cavité résonnante puisqu'il piège la lumière dans une cavité très résonnante puisqu'il piège la lumière

dans une bande de fréquence très étroite. Une modification d'une des propriétés du matériau (par application d'un champ électrique par exemple) permettra de "libérer" la lumière [43]. Dans le cas des cristaux photoniques bidimensionnels réalisés dans un réseau triangulaire de trous d'air, il existe plusieurs types de cavités de cristaux photoniques et parmi ces types se trouve la cavité à défaut ponctuel. Il est possible de réaliser une cavité en modifiant les paramètres d'un ou plusieurs trous dans un cristal photonique, soit en changeant le rayon des trous, soit en déplaçant les trous de leur position initiale, soit en remplissant complètement les trous. Ces cavités sont généralement de deux types : le type Hn et le type Ln [44].

La cavité de type Hn est une cavité hexagonale dont chaque côté présente une omission de n trous. La cavité de type Ln est une cavité linéaire qui est réalisée par l'omission de n trous dans la direction de ΓK . Les deux images au microscope électronique à balayage (MEB) (Figure I.24) sont des exemples de ces deux types de cavités, une cavité H2 et une cavité L3. Elles ont été fabriquées dans la salle blanche de l'IEF par M. El Kurdi[45].

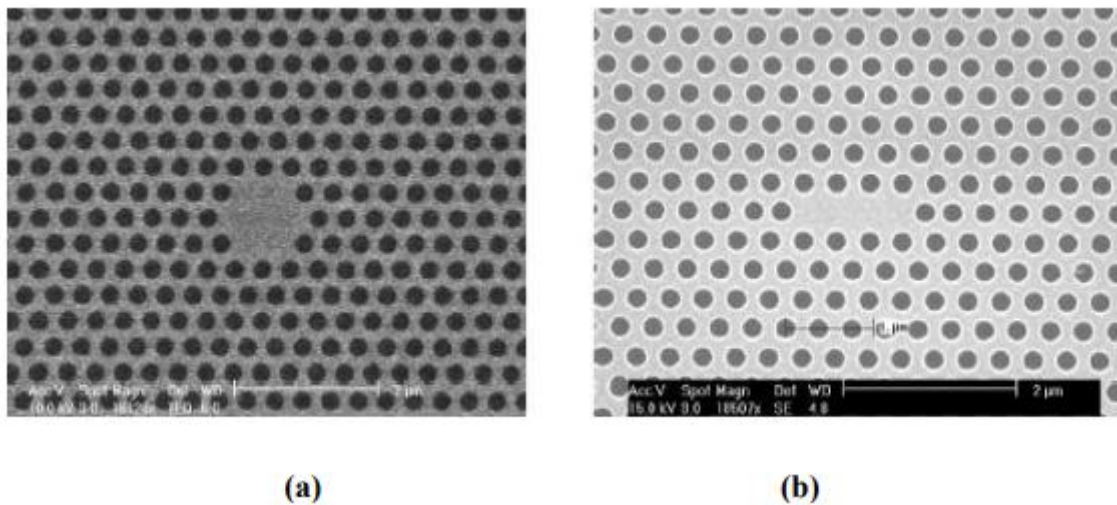


Figure I.24: Images MEB des cavités H2 (a) et L3 (b) fabriquées dans la salle blanche de l'IEF [46].

D'autres groupes, comme le KAIST, ont adopté une approche plus intuitive. Augmenter le facteur Q de manière conséquente. Un exemple simple de conception d'une microcavité à Q élevé est présenté (figures I.23 et 24).

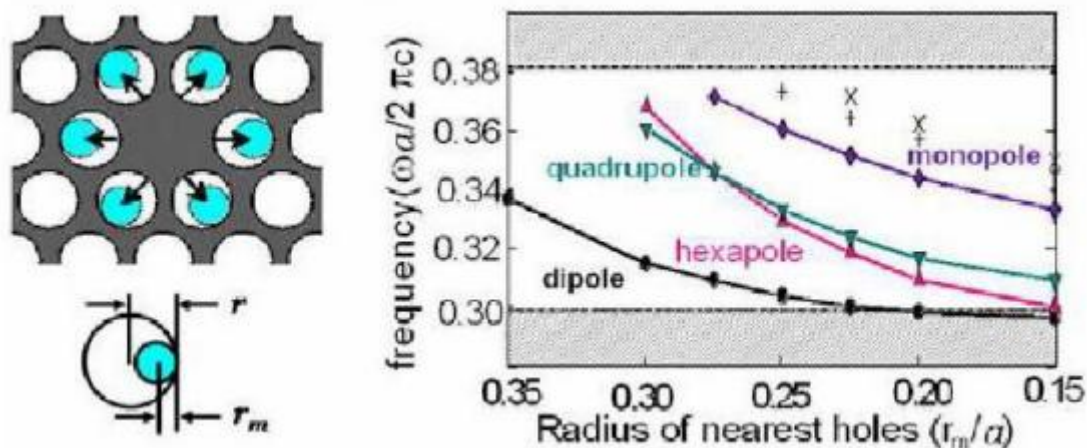


Figure I.25:Exemple d'ingénierie des défauts. Dans ce cas, il s'agit d'une cavité H1 modifiée : les six trous adjacents au défaut sont réduits de manière à amener progressivement des modes de symétries différentes dans la bande interdite photonique.

I.11.3 Phénomène de super prisme :

Une lumière polarisée TE ou TM est injectée dans un cristal photonique. Si la longueur d'onde varie (autour d'une longueur proche de la bande interdite photonique), une grande déviation du faisceau due à une forte dispersion chromatique du cristal photonique est observée. [34]

Si on fait varier la longueur d'onde (autour d'une longueur proche de la bande interdite photonique), on observe une grande déviation du faisceau due à une forte dispersion chromatique du cristal photonique. Cette déviation angulaire peut atteindre 50° pour une variation de longueur d'onde de 1% (figure I.26). Les conditions ont été choisies pour exploiter les surfaces équifréquences là où elles sont le plus déformées. En effet, il suffit d'une légère variation de la longueur d'onde pour obtenir une variation de la longueur d'onde pour obtenir un changement radical de la direction de la vitesse de groupe. [35]

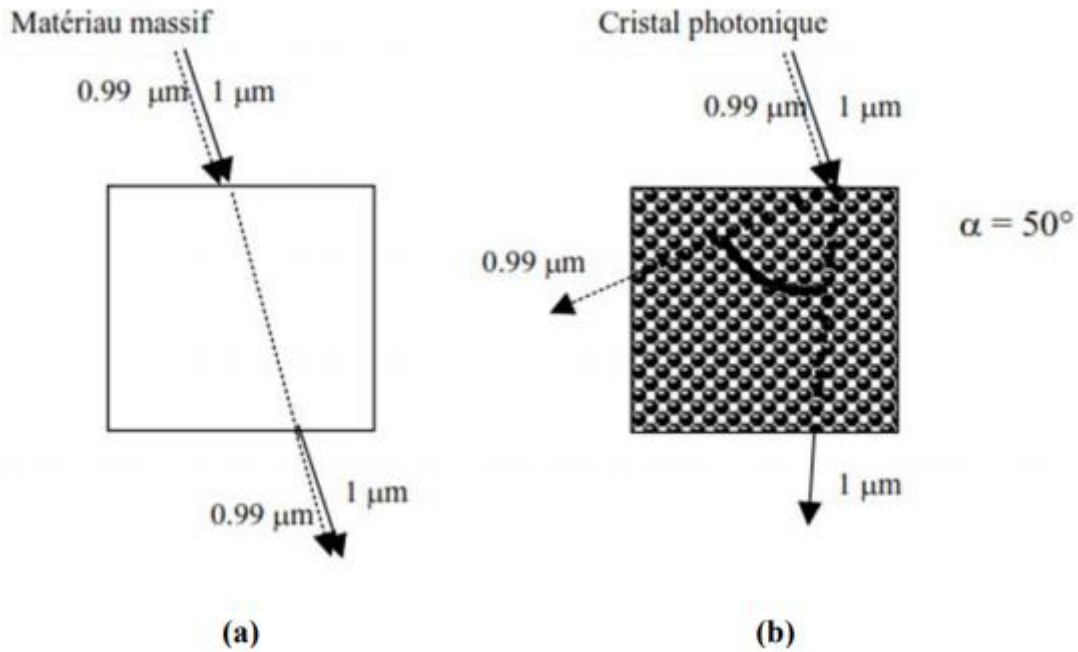


Figure I.26: Représentation du phénomène de superprisme et de sa sensibilité aux longueurs d'onde.

- (a) propagation de la lumière dans un cristal de silicium classique avec une lumière incidente dont la longueur d'onde varie entre 0,99 et 1 μm . La lumière incidente est polarisée TM et inclinée de 15° par rapport à la normale de la tranche de cristal, (b) trajet de la lumière dans un cristal photonique de la lumière dans un cristal photonique dans les mêmes conditions. Une déviation importante (50°) est observée pour une variation de longueur d'onde de 1% [35].

I.11.4 DEMUX-coupler :

Les propositions de démultiplexeurs à cristaux photoniques ont tendance à privilégier les cavités de très petite taille (quelques périodes) et la fonctionnalité " add-drop ", la plus exigeante. " Le principe du dispositif proposé est d'utiliser le couplage par diffraction de Bragg entre un mode fondamental rapide Le principe du dispositif proposé est d'utiliser le 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 les guides à cristaux photoniques (CP) " W3 " ou " W5 ", formés de 3 ou 5 rangées manquantes, ce couplage correspond à une mini-bande d'arrêt, dont la largeur typique est de 3-20 nanomètres à 1500 nm, ce qui est bien adapté au WDM grossier (CWDM), et donc aux réseaux métropolitains [36] [37].

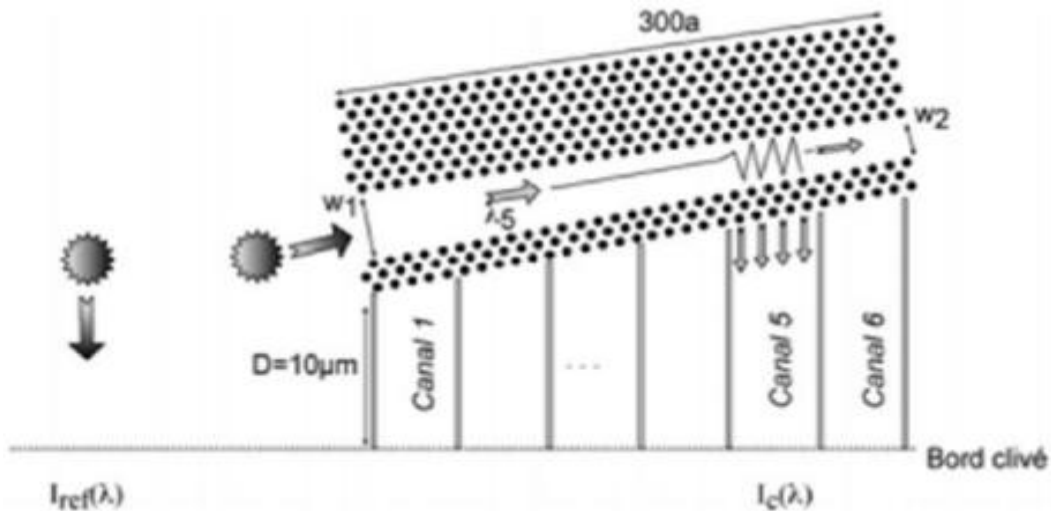


Figure I.27: Principe du démultiplexeur spectrographique : le guide PC de largeur proche de "W3" couple le mode fondamental au mode d'ordre supérieur uniquement dans la section où la diffraction de Bragg entre les deux modes est autorisée.

Ce mode est ensuite extrait latéralement à travers les trois rangées de trous [38].

Comme le montre la figure I.27, il suffit en première approximation d'affiner et de faire varier lentement l'un de ses paramètres (la largeur dans l'illustration, mais ce pourrait aussi être la période) l'illustration, mais ce pourrait aussi être la période) : une longueur d'onde donnée est alors acheminée dans une section donnée est alors dirigée dans une section donnée car le couplage au mode d'ordre supérieur n'a lieu que dans cette section, et la paroi raffinée laisse sortir latéralement la lumière du mode d'ordre supérieur le mode d'ordre supérieur, tandis que le guidage du mode fondamental reste mode fondamental reste très robuste à toutes les autres longueurs d'onde, l'effet tunnel sur ce mode "réfractif" étant très faible. La figure I.28(a), I.28(b), illustre le couplage des modes de W3 de manière générique. Dans le dispositif, la position de la mini-bande d'arrêt change avec la largeur du guide [38].

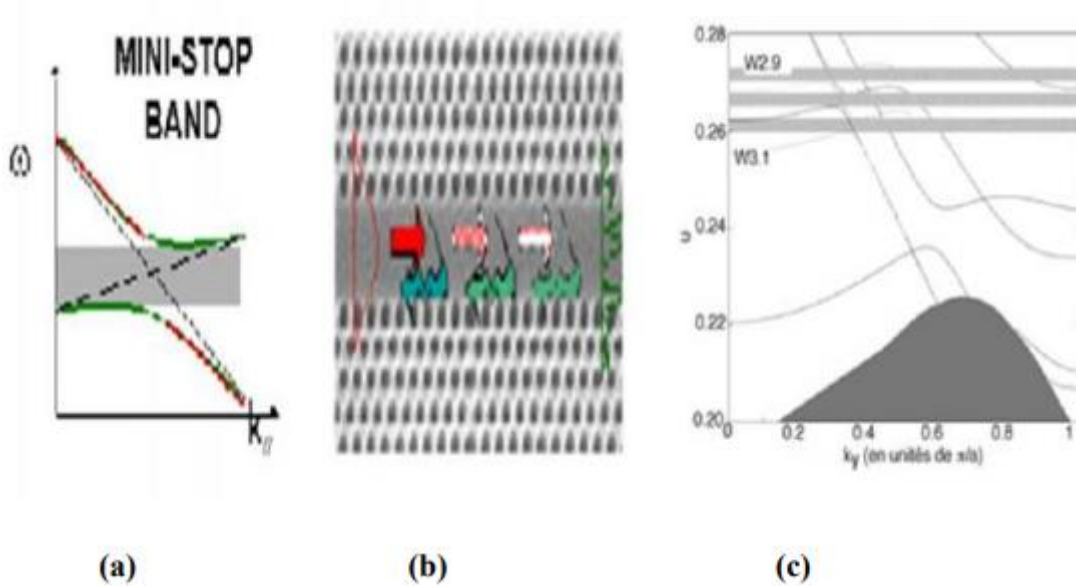


Figure I.28: illustration de l'utilisation de la mini-bande d'arrêt.

- relation de dispersion locale, le mode fondamental étant le plus raide, le mode d'ordre supérieur le moins raide ; (b) diagramme du couplage des modes dans le guide W3 ; (c) superposition des relations de dispersion pour des guides dont la largeur est modifiée de 0,1 rang en plus ou en moins par rapport à W3. On peut voir que cette modification de la largeur de 40 nm, dans un cas typique, conduit à des mini-bandes d'arrêt bien séparées [38].

I.11.5 Guides d'ondes :

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 se propagera le long de ce guide avec une fréquence appartenant à la bande interdite photonique du cristal (figure I.29 a). Les guides d'ondes conventionnels basés sur des matériaux diélectriques sont fabriqués depuis longtemps. L'onde se propage dans le diélectrique d'indice élevé et est totalement réfléchi sur les bords qui sont constitués d'un diélectrique d'indice plus faible. L'intérêt des guides d'ondes BIP par rapport aux guides d'ondes traditionnels est qu'ils présentent de faibles pertes au niveau des courbures (figure I.29 b). Le fait de courber un de ces guides sur lui-même permet d'obtenir un anneau et seuls certains modes peuvent rester dans cet anneau [39].

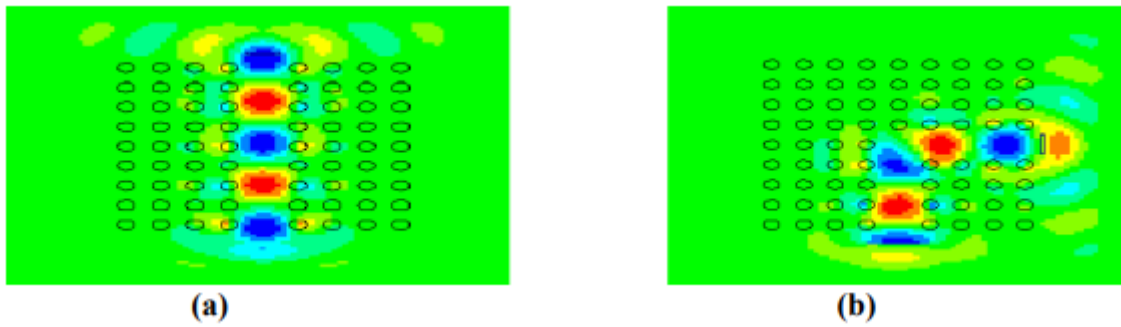


Figure I.29: Guide d'onde de la structure GaAs à motifs carrés dans l'air montrant la distribution du champ E_y autour du défaut en polarisation (a) rectiligne (b) coudes à 90° .

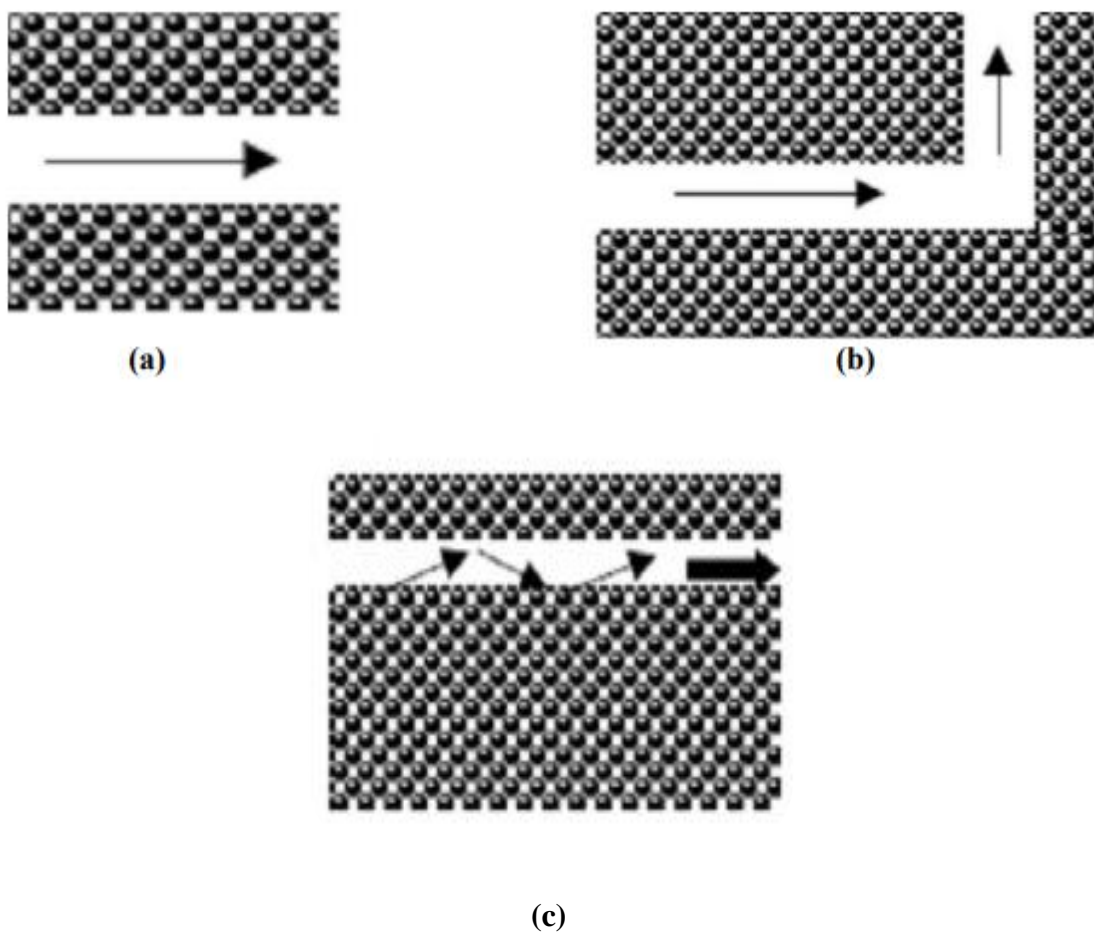


Figure I.30:(a) Guide d'ondes

(b) Guide d'ondes avec des coudes extrêmes (simulé par le logiciel Rsoft).

(c) Guidage par bande interdite photonique. [39]

I.12 Les méthodes d'analyse des cristaux photoniques :

I.12.1 La méthode FDTD (Finite-Difference Time-Domain) :

Introduite par K.S. Yee en 1966, la méthode FDTD (FiniteDifference Time Domain) est un outil puissant pour la résolution des équations de Maxwell. Effectuée dans le domaine temporel, elle permet de comprendre visuellement la propagation d'une onde électromagnétique dans un milieu structuré (en particulier un cristal photonique). Le calcul de toutes les composantes du champ à chaque instant et sur tout le domaine de calcul permet d'obtenir, entre autres, la transformée de Fourier, des informations telles que le spectre de fréquence en plusieurs points de la structure, une carte du champ électrique ou magnétique, etc.

Les conditions initiales Les conditions initiales fixent la valeur du champ électromagnétique au temps $t = 0$ et la discrétisation supplémentaire permet de suivre l'évolution du champ dans le temps. Cette méthode est adaptée à l'étude d'un défaut ou d'une cavité. Elle nous donne le champ à l'intérieur du cristal ainsi que les coefficients de transmission et de réflexion de la structure qui les coefficients de réflexion de la structure qui nous permettent de les comparer avec nos résultats expérimentaux. Résultats expérimentaux. Cette méthode permet d'étudier des réseaux de taille finie grâce aux conditions limites absorbantes ou des réseaux de taille infinie en utilisant les conditions de paroi magnétique ou de paroi électrique ou de paroi électrique [40]

I.12.2 La méthode de matrice de transfert (TMM):

La méthode de la matrice de transfert permet de calculer les coefficients de réflexion et de transmission pour les cristaux photoniques de taille finie. Ces matériaux peuvent être parfaits ou dopés [41]. Elle peut être utilisée pour calculer la structure de bande d'un cristal parfait. Elle a été adaptée au cas des cristaux photoniques par Pendry au début des années 90 et par Reynolds ces deux dernières années. En fait, elle permet d'exprimer le champ électromagnétique sur une couche en fonction du champ sur la couche précédente. L'évolution du champ dans le cristal est alors calculée de couche en couche, ce qui permet d'obtenir les coefficients de transmission et de réflexion. Nous avons utilisé ce code de Reynolds pour calculer les coefficients de transmission et de réflexion et l'avons comparé avec la méthode des éléments finis (Figure I.31). Les résultats obtenus par les deux méthodes sont en très bon accord à l'exception d'une légère différence. Cette différence est liée aux paramètres géométriques. En effet, dans le code des matrices de transfert, on intègre directement la valeur

du rapport entre le rayon et le pas qui n'est pas une valeur exacte (elle n'est pas un entier). Par contre, avec la méthode des éléments finis, les paramètres géométriques sont intégrés séparément. Les paramètres géométriques sont intégrés séparément.

Un autre inconvénient du logiciel de matrice de transfert que nous avons utilisé est qu'une banque de structures est intégrée par défaut et par conséquent le choix de la structure est limité.

L'avantage de ce code est la vitesse de calcul qui est très élevée et les calculs n'occupent que peu d'espace mémoire. [42]

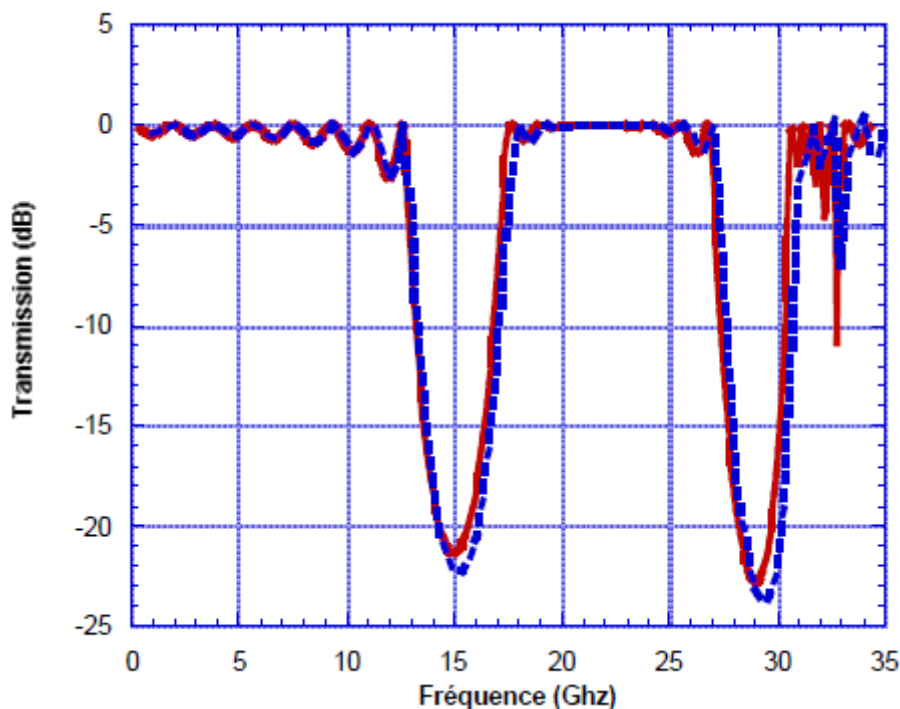


Figure I.31:Diagrammes de transmission calculés avec la méthode des matrices de transfert (trait plein) et la méthode des éléments finis HFSS (traits pointillés) pour un réseau carré de tiges de Nylon de permittivité 3.5, de diamètre 5 mm, et de pas $p = 7$ mm. Les calculs ont été effectués en incidence normale et en polarisation TM.

I.12.3 La méthode des éléments finis FEM :

La solution analytique des problèmes mécaniques ne peut se faire que dans un nombre limité de cas, cependant, les méthodes numériques basées sur la discrétisation de ses problèmes, présentent une alternative très efficace, souvent utilisée dans le domaine de la mécanique pour résoudre des problèmes complexes. La méthode des éléments finis est la plus

utilisée de toutes ces méthodes de discrétisation car elle permet de traiter des problèmes de géométrie complexe, elle couvre de nombreux domaines de la physique. Les moyens informatiques actuels (puissance des ordinateurs, outils de visualisation et de simulation) la rendent facile à mettre en œuvre. La méthode des éléments finis est actuellement la méthode la plus utilisée et son champ d'application ne cesse de s'étendre. Le succès de cette méthode réside dans le fait que sa formulation fait appel à des procédures standardisées qui sont répétées lors de la résolution de problèmes de natures différentes.

Cette méthode est l'une des techniques numériques les plus puissantes. Un des avantages majeurs de cette méthode est le fait qu'elle offre la possibilité de développer un programme pour résoudre, avec peu de modifications, plusieurs types de problèmes. En particulier, toute forme complexe d'un domaine géométrique où un problème est bien posé avec toutes les conditions aux limites, peut être facilement traitée par la méthode des éléments finis. [43]

I.12.4 Domaines d'application de la méthode des éléments finis :

Les domaines d'application de la méthode des éléments finis sont très larges et variés. En général, les domaines d'application de cette méthode sont les suivants :

1. La mécanique des milieux solides continus
2. La mécanique des milieux fluides continus
3. L'analyse thermique
4. Electromagnétisme et électrostatique

Dans le contexte de la mécanique des milieux continus solides, les problèmes peuvent être classés comme suit (figure I.32) :



Figure I.32: Classification des problèmes de la mécanique.

I.12.5 La méthode des réseaux de diffraction : [44]

Un réseau est constitué par la répétition périodique d'un motif diffractant, comme une fente. L'interférence entre les rayons issus des nombreux motifs successifs favorise alors précisément certaines directions dans lesquelles l'énergie lumineuse est envoyée. Cette partie traite de la diffraction de la lumière par un réseau et de ses applications.

I.12.5.1 Intérêt d'un réseau :

b- Spectre d'émission :

Lorsque les atomes d'un gaz sont excités, ils émettent un rayonnement caractéristique des éléments chimiques qui composent le gaz. Un atome excité émet un photon, c'est-à-dire un train d'ondes, à une fréquence ν telle que :

$$\Delta E = h \nu \quad (h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s (constante de Planck)}) \quad (\text{I.12})$$

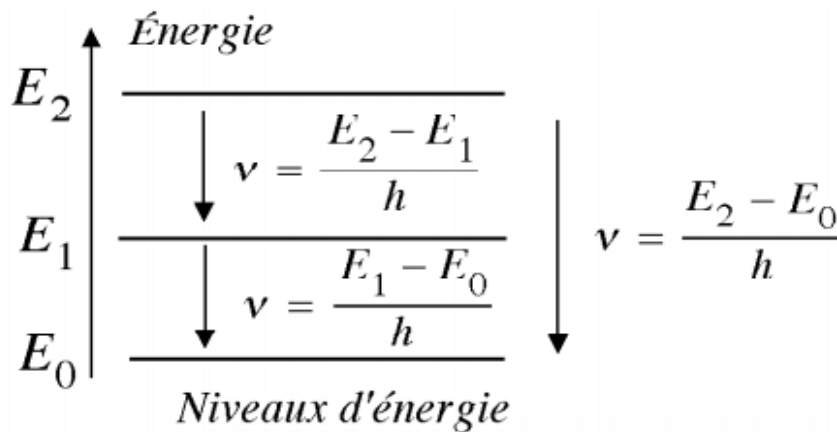


Figure I.33: L'étude des spectres d'émission permet de connaître la composition du gaz.

En astronomie, on peut ainsi connaître la composition des gaz de la couche externe des étoiles. En raison de l'effet Doppler, les fréquences sont légèrement décalées ; on peut en déduire la vitesse à laquelle l'étoile observée s'éloigne de la Terre.

c- Spectre d'absorption :

Lorsqu'un faisceau de lumière blanche traverse un milieu "transparent", ce dernier absorbe sélectivement le rayonnement caractéristique du milieu qu'il traverse.

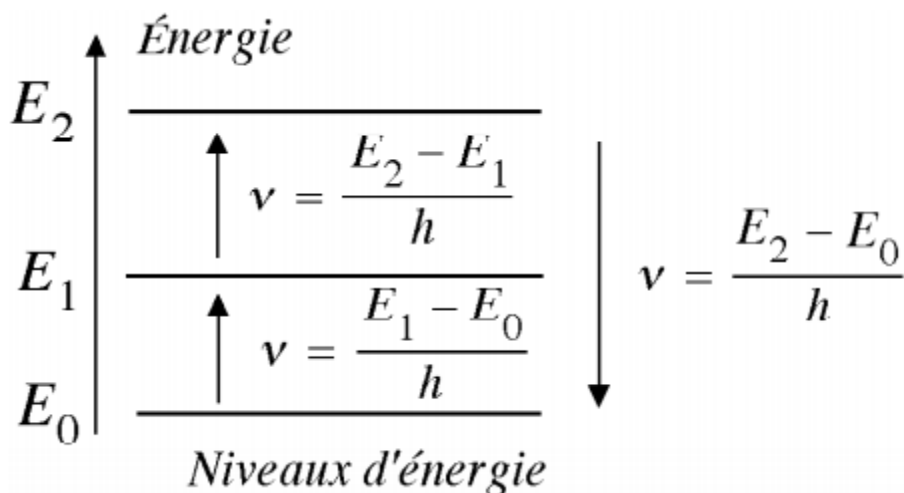


Figure I.34: L'étude du spectre d'absorption permet de connaître la composition du milieu absorbant.

d- Dispersion de la lumière avec un réseau :

On peut séparer les composantes monochromatiques de la lumière avec un prisme, ou mieux, avec un réseau.

I.12.5.2 Réseau de transmission :

Un réseau de transmission est constitué d'un très grand nombre de fentes parallèles et équidistantes. Il est souvent constitué d'une lame de verre sur laquelle on a tracé un très grand nombre de lignes parallèles et équidistantes (environ 500 lignes par millimètre !). La distance a entre deux fentes successives est appelée le pas du réseau.

Supposons une source ponctuelle, à l'infini, qui illumine le réseau. Chaque fente diffracte la lumière.

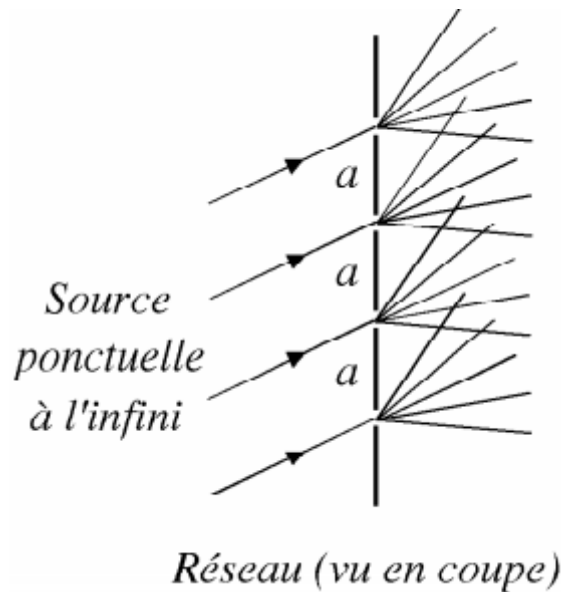


Figure I.35:Réseau (vu en coupe).

Les rayons issus des différentes fentes interfèrent entre eux. Nous nous intéressons uniquement à l'interférence à l'infini. Remarque : la surface d'un CD ou d'un DVD est constituée de petits motifs répétés et constitue pratiquement un réseau. On remarque que cette surface décompose la lumière blanche et qu'elle apparaît différemment colorée selon l'orientation du disque.

I.12.5.3 Théorie élémentaire du réseau :

Soit une source ponctuelle monochromatique S, à l'infini, envoyant un faisceau de lumière parallèle et arrivant sur le réseau sous l'angle d'incidence i . On cherche les directions θ pour lesquelles l'intensité des rayons qui interfèrent à l'infini est maximale. Il y a interférence à l'infini entre tous les rayons diffractés selon la direction θ . L'amplitude diffractée par le réseau à l'infini résulte de l'interférence entre les rayons de tous les motifs éclairés : on parle d'interférence à N ondes (dans le cas des trous d'Young, il s'agit d'interférence à deux ondes). La différence de marche entre les deux rayons (1) et (2) est :

$$\delta = (SM)_1 - (SM)_2 = a \sin \theta - a \sin i = a(\sin \theta - \sin i) \quad (I.14)$$

(Attention ! Les angles i et θ peuvent être très grands ; on n'est pas dans les conditions de Gauss : il n'y a pas de lentilles !)

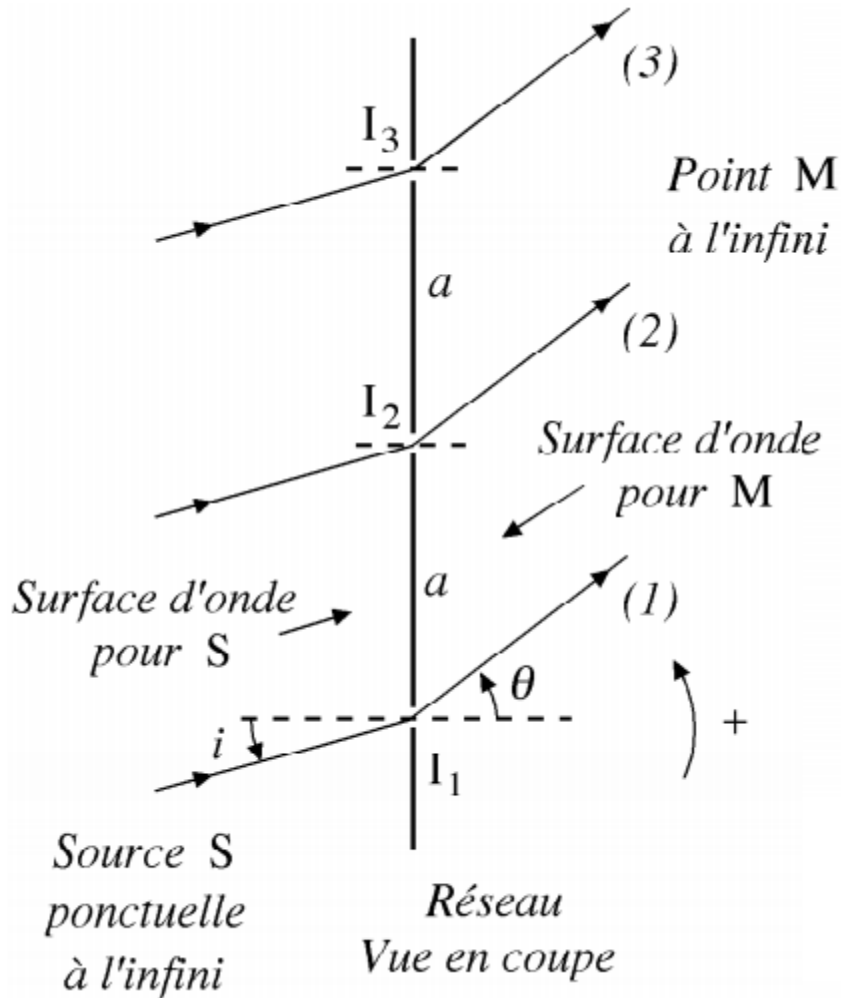


Figure I.36: Réseau Vue en coupe.

S'il n'y avait que les rayons (1) et (2), l'intensité en M serait égale à :

$$I(M) = 2I_0 \left[1 + \cos\left(2\pi \frac{\delta(M)}{\lambda_0}\right) \right] \quad (I.15)$$

L'intensité $I(M)$ serait maximale pour :

$$2\pi \frac{\delta(M)}{\lambda_0} = 2\pi m \quad \text{soit} \quad \delta(M) = m\lambda_0 \quad (m \in \mathbb{Z}) \quad (I.16)$$

Les rayons (1) et (2) sont en phase. Si la différence de chemin optique entre les rayons (1) et (2) vaut $m\lambda_0$:

- la différence de chemin optique entre les rayons (2) et (3) vaut aussi $m\lambda_0$
- la différence de chemin optique entre les rayons (1) et (3) vaut $2m\lambda_0$

Tous les rayons qui interfèrent en M à l'infini sont donc en phase : il y a un maximum de lumière dans cette direction d'angle θ .

Pour un angle d'incidence i donné, les angles θ correspondant à un maximum de lumière (les interférences entre les ondes de deux motifs successifs sont constructives) sont donnés par la relation : ("formule des réseaux")

$$a(\sin \theta - \sin i) = m\lambda_0 \text{ soit } \sin \theta - \sin i = m\lambda_0/a \quad (\text{I.17})$$

m est appelé l'ordre du spectre (c'est l'ordre d'interférences).

I.12.6 La méthode des liaisons forte : [45]

Dans leur article, Barreteau et al indiquent que contrairement au modèle Jellium des électrons libres où la délocalisation des électrons est décrite par des fonctions d'onde planes, l'approximation de la liaison forte consiste à décrire les états électroniques par des fonctions de Bloch qui sont développées sur la base de fonctions d'onde atomiques localisées. C'est pourquoi la méthode des liaisons fortes s'applique, en principe, aux systèmes pour lesquels les électrons de valence sont décrits par des fonctions d'onde atomiques localisées. Celles-ci se superposent alors faiblement à celles de leurs atomes voisins.

Toutes les méthodes de structure électronique nécessitent le calcul des fonctions d'onde à un électron $\psi(\mathbf{r})$ solution de l'équation de Schrödinger à l'approximation de champ moyen (approximation où chaque électron se déplace indépendamment dans le potentiel effectif $V_{\text{eff}}(\mathbf{r})$ créé par les ions et les autres électrons) :

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + V_{\text{eff}}(\mathbf{r})\right)\vec{\psi}(\mathbf{r}) = \vec{E}\vec{\psi}(\mathbf{r}) \quad (\text{I.18})$$

Une telle équation différentielle peut être résolue soit par des méthodes de discrétisation, soit en exprimant les fonctions d'onde à un électron comme une combinaison de fonctions de base permettant de reformuler l'équation de Schrödinger sous une forme matricielle.

I.13 Conclusion :

Les premiers cristaux photoniques que nous avons présentés dans ce chapitre d'introduction sont ceux qui permettent un confinement dans les trois directions de l'espace. Nous avons cherché à décrire le fonctionnement de ces cristaux à travers l'étude de leurs structures de bandes et courbes iso-fréquences. Cependant, nous verrons que les structures bidimensionnelles sont, d'une part plus faciles à fabriquer, d'autre part, de bons candidats pour y tracer des circuits de routage complexes (guides, cavités, coupleurs, ...). Un problème se pose toutefois : la minimisation des pertes par radiation perpendiculairement au plan de périodicité, dans le cône de lumière. En allant au-delà des propriétés de gap, et en s'intéressant à la courbure des bandes, les cristaux bidimensionnels permettent de concevoir des dispositifs très intéressants, telle la lentille plate. Il reste à optimiser l'isotropie de tels dispositifs, pour en améliorer les propriétés optiques.

Chapitre II

Les circulateurs en cristaux photonique

II.1 Introduction :

Actuellement, la plupart des systèmes de télécommunication fonctionnant à des fréquences élevées sont basés sur la technologie des circuits micro-ondes. Les composants passifs non réciproques sont utilisés dans les systèmes de télécommunication sans fil tels que les duplexeurs radar, la téléphonie mobile, les liaisons par satellite...etc. Ils sont présents dans les applications micro-ondes où il est nécessaire de découpler la transmission et la réception lorsqu'une seule fréquence porteuse est utilisée.

Parmi ces composants, on trouve les circulateurs et les isolateurs, qui assurent la circulation entre les différents ports dans un sens et pas dans l'autre. Les isolateurs sont utilisés pour protéger une source d'énergie de toute énergie réfléchie notamment pour les applications micro-ondes de forte puissance (circulateur ou isolateur dans un guide d'ondes). Un circulateur à trois ports peut être utilisé comme isolateur, en connectant son troisième port à une charge appropriée qui absorbe l'énergie réfléchie.

Ces éléments non réciproques passifs utilisent des matériaux magnétiques qui leur confèrent leur non-réciprocité.

Dans ce chapitre, nous présenterons tout d'abord les types de circulateurs, le principe de fonctionnement d'un circulateur, et les circulateurs à cristaux photoniques [46].

II.2 Circulateurs :

Les circulateurs sont des dispositifs largement utilisés dans les systèmes de télécommunication bidirectionnels tels que les radars, les téléphones portables ou les liaisons par satellite. Un circulateur est représenté par un hexa-pôle formé par au moins trois ports d'accès orientés à 120° les uns des autres autour d'une cavité résonante [47].

Les composants non réciproques occupent une place importante dans le domaine des radars et des télécommunications. Il existe plusieurs types de circulateurs et après avoir décrit leur fonctionnement, nous analyserons les applications auxquelles ils sont associés. [48]

II.2.1 Principales caractéristiques d'un circulateur :

Les performances d'un circulateur sont principalement caractérisées par l'isolation, la perte d'insertion, la bande passante, la capacité de puissance, la température et, dans certains cas, l'accordabilité en fréquence.

II.2.1.1 Isolation :

Le circulateur, en tant que composant important dans les applications micro-ondes, doit avoir un niveau d'isolation élevé. que le dispositif possède un niveau d'isolation élevé. L'isolation mesure la séparation des niveaux de signal niveaux de signaux sur les ports adjacents d'un dispositif. Une valeur d'isolation élevée (en dB) entraîne une faible interférence du signal entre un port et l'autre. La valeur de l'isolation est liée au rapport d'onde stationnaire de tension (VSWR) (Voltage Standing Wave Ratio). Prenons l'exemple d'un circulateur dont le port 3 est connecté à une charge adaptée : si l'on observe une mauvaise adaptation (par ex. VSWR=2) au port 3, l'isolement attendu est inférieur à 10 dB, mais si une bonne charge d'adaptation est utilisée comme terminaison, l'adaptation du ROS peut être améliorée à 1,1, ce qui correspond à une isolation supérieure à 20 dB. Cependant, si l'adaptation de l'impédance change sur tous les trois ports, une intelligence active (compensation de l'adaptation) pourrait être employée. Ceci reste à explorer par des travaux futurs.

II.2.1.2 Perte d'insertion :

La perte d'insertion est un autre paramètre important pour les circulateurs. En général, la perte d'insertion est importante à haute fréquence. Par conséquent, une faible perte d'insertion est souhaitée pour éviter de gaspiller une énergie précieuse. La valeur typique de la perte d'insertion pour un circulateur fonctionnant sur la bande X est <0,5 dB.

II.2.1.3 Bande passante :

La bande passante est la plage de fréquences dans laquelle elle assure une valeur de réflexion, d'isolation et de perte d'insertion souhaitée. On utilise couramment la bande passante fractionnelle qui est la bande passante d'un dispositif divisée par la fréquence centrale de fonctionnement. Les circulateurs commercialisés ont généralement une largeur de bande fractionnée supérieure à 3% de la fréquence de travail. Certains circulateurs peuvent même couvrir une ou plusieurs bandes telles que la bande X, Ku, K, Ka, etc.

II.2.1.4 Capacité de puissance :

La capacité de puissance est une question de linéarité des circulateurs. Les circulateurs sont considérés comme des dispositifs linéaires et fonctionnent généralement sous le point de compression P1 dB ou le point IP3. Une puissance élevée est généralement nécessaire pour les systèmes radar où des radars/antennes à haute énergie sont utilisés. Une plus grande puissance peut être obtenue au détriment de la taille de l'appareil et des systèmes de refroidissement. A titre d'exemple, un isolateur à jonction unique (basé sur un circulateur) avec une capacité de

charge interne de 10 W pourrait être fabriqué par MECA Electroniques. Cependant, pour un transfert de chaleur et un déclassement sûr, la puissance maximale recommandée avec laquelle l'appareil peut fonctionner est de 2 W. Pendant ce temps, l'armement d'une charge externe entraînerait un transfert de chaleur vers un dissipateur thermique externe, par conséquent, un niveau de puissance plus élevé de l'isolateur pourrait être atteint facilement au prix de la taille. [49]

II.2.1.5 Température :

L'aimantation à saturation M_s d'un matériau ferrite est une fonction importante de la température, qui diminue lorsque la température augmente. Cet effet peut être compris en notant que l'énergie vibratoire d'un atome augmente avec la température, ce qui rend plus difficile l'alignement de tous les dipôles magnétiques [50]. À une température suffisamment élevée (seuil), l'énergie thermique est supérieure à l'énergie fournie par le champ magnétique interne, et il en résulte une aimantation nette nulle. Cette température est appelée température de Curie, T_C [51]. La température maximale de fonctionnement typique est de 75°C selon JQL Electronics Inc [52].

II.2.1.6 Accordabilité de fréquence :

L'accordabilité de la fréquence du circulateur est généralement obtenue en modifiant le champ magnétique statique externe fourni par un électroaimant volumineux. Les circulateurs conventionnels fonctionnent en état de saturation, l'aimant externe doit donc surmonter le champ de démagnétisation. Pour augmenter le champ magnétique interne de 0,1 T, un champ magnétique H supplémentaire de 80 kA/m est nécessaire, ce qui rend difficile la conception d'un dispositif accordable compact. Récemment, des chercheurs ont démontré qu'un enroulement intégré dans la ferrite LTCC ESL 40012 pouvait facilement faire passer le champ magnétique interne de 0 à 0,4 T en utilisant un champ H inférieur à 2,5 kA/m dans un état partiellement magnétisé [53]. Cette idée pourrait être utilisée pour concevoir des dispositifs accordables compacts [54].

II.3 Les types de circulateurs :

Les circulateurs sont classés en deux grandes familles : les circulateurs actifs et les circulateurs passifs à base de ferrite. On se base dans cette thèse sur la deuxième famille qui se compose de quelque dispositif qu'on va les citer.

II.3.1 Circulateurs à ferrite :

Ces dispositifs en ferrite sont essentiels et indispensables dans les chaînes de communication par radiofréquence. Ils assurent le routage des signaux en fonction de leur origine, en favorisant la propagation de l'onde EM dans une direction plutôt que dans une autre. Ils permettent donc de

dissocier les signaux d'émission et de réception. Ils utilisent les propriétés d'anisotropie et de non-réciprocité des matériaux ferrites lorsqu'ils sont magnétisés par un champ magnétique statique.

II.3.2 Circulateur à effet Faraday :

Ce circulateur utilise les mêmes effets Faraday que l'isolateur. Il se compose d'un accès de guide d'ondes rectangulaire et d'une section de guide d'ondes circulaire.

Un cylindre de ferrite est positionné à l'intérieur de la section centrale du guide d'ondes circulaire.

La longueur du cylindre de ferrite et le champ magnétique polarisant sont dimensionnés de telle sorte que l'onde subit (par l'effet Faraday) une rotation de 45° . Une onde entrant par le port 1 est transmise au port 2, une onde qui entre par le port 2 ressort par le port 3 et ainsi de sui.

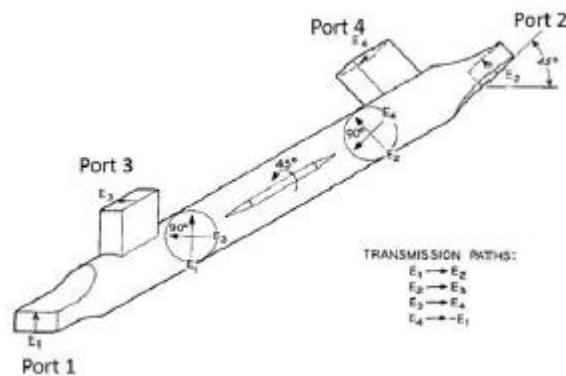


Figure II.1: Principe de construction d'un circulateur à rotation de Faraday [55]

II.3.3 Le circulateur à éléments localisés :

Le circulateur à éléments localisés a été proposé par Kionishi [56]-[57]. Il est constitué d'un disque de ferrite avec trois paires de conducteurs centraux entrelacés. Les bras de ces conducteurs successifs forment un angle de 120° (voir Figure II.2). Le diamètre du disque de ferrite est inférieur à la longueur d'onde. L'épaisseur de la ferrite est équivalente à un dixième de son diamètre.

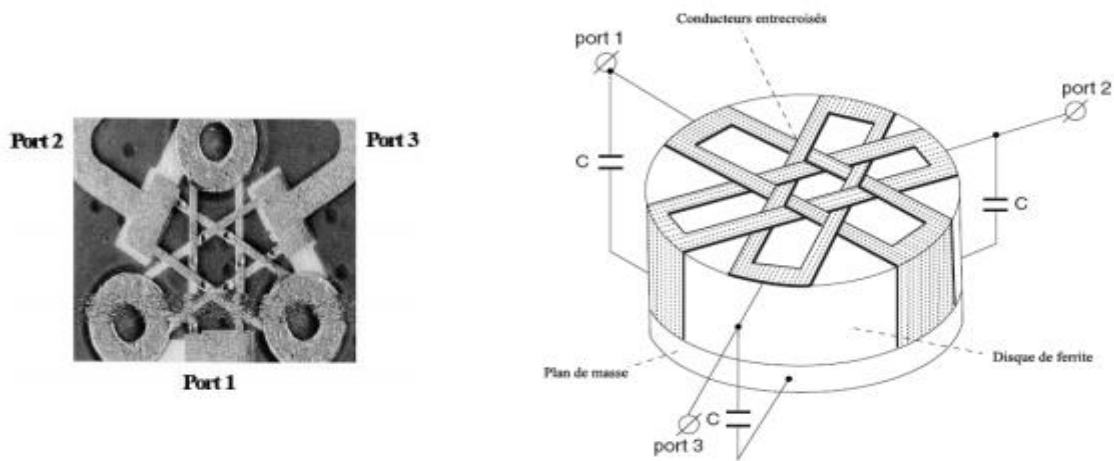


Figure II.2: Circulateurs à éléments localisés

II.3.4 Circulateur à déplacement de champs :

Ces circulateurs utilisent les mêmes principes de déplacement de champ que les isolateurs. Mais contrairement aux isolateurs, le déplacement du champ se fait sur 3 ports ou plus.

II.3.5 Circulateur à jonction Y :

Les circulateurs à jonction sont généralement peu encombrants dans la gamme des micro-ondes et simples à fabriquer. Au centre, se trouve la ferrite qui peut avoir différentes formes et dimensions. Ils sont souvent fabriqués en technologie guide d'ondes, triplaque, microruban ou coplanaire...

[58]

II.3.5.1 Guide d'ondes :

Ce circulateur à jonction Y est composé de trois guides d'ondes espacés de 120° . Au centre, une ferrite donne au circulateur sa non réciprocity (voir Figure II.3)

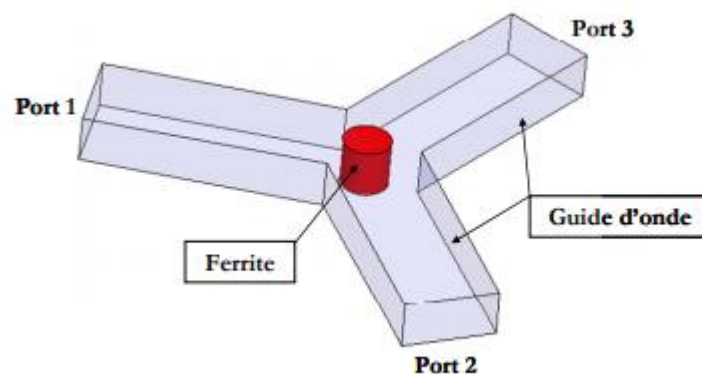


Figure II.3: Circulateur à guide d'onde

Pour améliorer les performances et réduire la complexité du processus de fabrication de ce type de circulateur, diverses études ont été menées en modifiant les géométries et les dimensions de la ferrite. [59]

II.3.5.2 Structure Triplaque :

Le circulateur triplaque à jonction en Y présente une disposition géométrique simple, ce qui rend son étude analytique assez simple. Il s'agit d'une structure symétrique par rapport au conducteur central. En d'autres termes, comme le montre la Figure II.4, deux disques de ferrite sont séparés par le conducteur central, formé par une partie centrale circulaire et trois lignes d'accès espacées de 120° . Deux plans de masse enveloppent la structure de part et d'autre de la structure. L'espace entre les deux plans de masse et entourant la structure est de 1,5 mètre.

L'espace entre les deux plans de masse et entourant les disques de ferrite est occupé par le diélectrique. Le matériau de ferrite est magnétisé perpendiculairement au plan du disque par un champ magnétique statique créé par deux aimants situés de part et d'autre du disque [60].

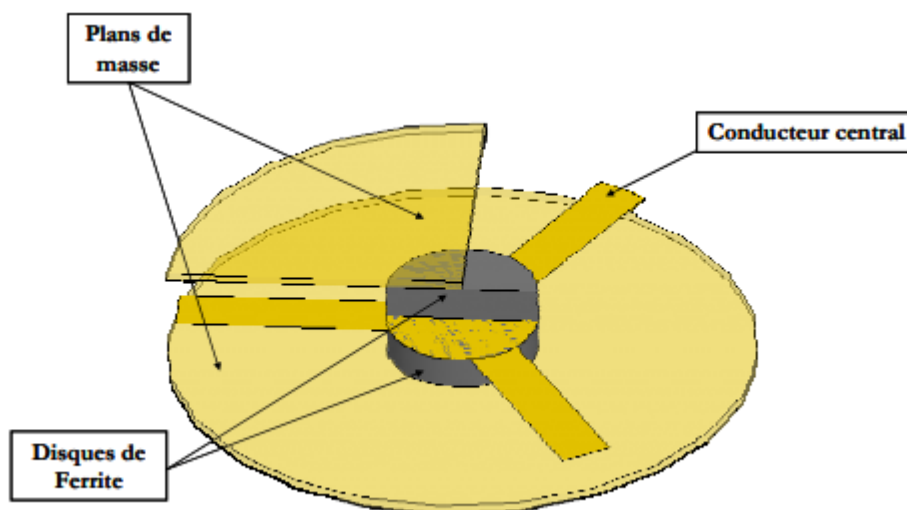


Figure II.4: Circulateur à jonction triplaque.

II.4 Principe de fonctionnement d'un circulateur

Les circulateurs réalisent une transmission d'ondes par substitution cyclique. En effet, lorsqu'on lui applique un champ magnétique transversal, il se crée dans la partie centrale un champ interne tel qu'une onde entrant par les canaux 1, 2 ou 3 ne peut sortir respectivement que par les canaux 2, 3 ou 1.

Un tel dispositif est utilisé pour deux fonctions essentielles dans les systèmes de télécommunication :

- Il permet d'assurer une fonction de commutation du signal radiofréquence dans tous les systèmes où la séparation des canaux d'émission et de réception est utile (radars, transmissions par satellite, téléphonie mobile, ...).

- La deuxième fonction est la fonction d'isolation inter-étages pour masquer une discordance entre deux éléments successifs d'une chaîne de transmission. Pour réaliser cette fonction, il suffit d'isoler l'un des ports en le reliant à une charge appropriée.

Les deux grandeurs les plus importantes pour un circulateur sont :

- L'affaiblissement d'insertion, qui doit être le plus faible possible (< -1 dB),
- Et une bonne isolation ($- 20$ dB) [61].

La figure II.5 donne la représentation d'un circulateur, où a_1 , a_2 et a_3 , sont les amplitudes des ondes incidentes dans le circulateur Y à trois voies et b_1 , b_2 et b_3 sont les amplitudes des ondes réfléchies aux trois ports.

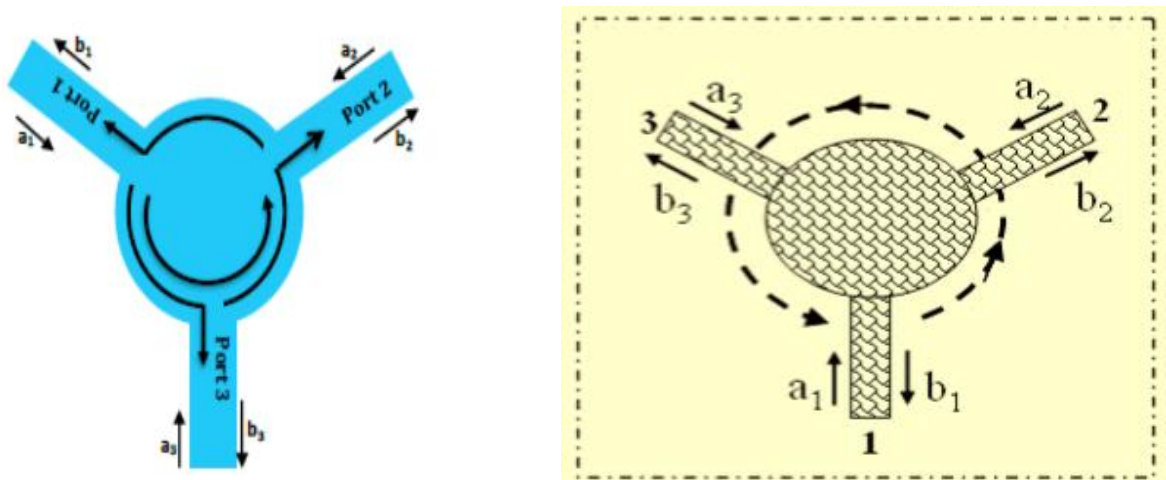


Figure II.5: Schéma de principe d'un circulateur en Y à trois ports.

II.4.1 La matrice S d'un circulateur

La matrice S d'un réseau à m-voies est une matrice carrée d'ordre m où les relations entre les ondes incidente et réfléchie sont décrites par : [62]

$$[b] = [S][a] \quad (II.1)$$

[a] et [b] sont les vecteurs représentant des signaux incidents et réfléchis. Pour un réseau à 3-

$$[a] = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} [b] = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.2})$$

Le circulateur se caractérise par sa matrice de paramètres S ou matrice de dispersion. Elle s'écrit :

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{31} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \quad (\text{II.3})$$

Notons que :

Les paramètres S₂₁, S₃₂ et S₁₃ sont des coefficients de transmission ; ils fournissent des informations sur les pertes d'insertion et illustrent le fonctionnement correct du dispositif.

Les paramètres S₁₂, S₂₃ et S₃₁ sont des coefficients d'isolement ; ils donnent des informations sur les défauts de commutation de puissance dans le circulateur.

Les autres paramètres S₁₁, S₂₂ et S₃₃ sont des coefficients de réflexion aux ports 1, 2 et 3 ; ils permettent d'évaluer les problèmes de désadaptation dans la structure [63].

Dans le cas idéal, la matrice S du circulateur est sous la forme suivante :

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

II.5 Les circulateurs en cristaux photoniques :

Les circulateurs à cristaux photoniques (PC), [64] ont fait l'objet d'études approfondies en raison de leurs excellentes performances et de leurs applications prometteuses. En 2005, un circulateur à cristaux photoniques à trois ports a été proposé pour la première fois en couplant une seule cavité à cristaux magnéto-photoniques (MPC) et en introduisant un réseau de trous d'air dans un grenat de fer et de bismuth (BIG) [65]. Ensuite, un type de cavité MPC soigneusement conçu a été utilisé pour réaliser des circulateurs en forme de Y et de W [66]. Des circulateurs de type T et de type croisé ont également été conçus [67]. Des circulateurs à trois et quatre ports pour la région sub-téraherz sont conçus en utilisant des MPC en silicium-ferrite [68]. L'isolation, la perte d'insertion et la bande passante sont les paramètres de performance les plus importants pour les circulateurs. Un circulateur magnétiquement accordable avec une isolation élevée de 65,2 dB est obtenu en

utilisant un réseau de tiges bidimensionnel (2D) [69]. Afin de réaliser un circulateur PC de type Y avec des pertes ultra-faibles, une structure plus compacte avec un seul poteau de ferrite en position centrale de la jonction du guide d'ondes a été fournie par nous [70].

II.5.1 Circulateur à cristal photonique de type T Al₂O₃ à réseaux carrés :

Un circulateur MPC à jonction Y de 30 mm avec une faible perte d'insertion de 0,062 dB est conçu en utilisant un réseau de tiges en treillis triangulaire. Sur la base du modèle de tige diélectrique de, un nouveau circulateur de type Y à trois ports basés sur un MPC en ferrite Al₂O₃ est considéré dans ce travail. En raison de la commodité et de la faisabilité de l'expérience micro-ondes, les auteurs réalisent des expériences pour valider le PBG des PCs et la fonction de circulateur dans le régime micro-ondes. Les bandes interdites des modes TE pour les PC à réseau triangulaire en Al₂O₃ sont calculées par la méthode d'expansion des ondes planes. Les caractéristiques du circulateur sont simulées à la fréquence de fonctionnement de 9,8 GHz qui se trouve dans la première bande interdite photonique (PBG). Les résultats numériques montrent que l'isolation et la perte d'insertion du circulateur sont de -28,56 dB et -0,02 dB, respectivement. À la fréquence de 9,83 GHz, la valeur expérimentale optimale de l'isolation atteint -61,11 dB. [71]

Afin de valider les résultats numériques du circulateur MPC conçu, les expériences micro-ondes sont réalisées à l'aide d'un analyseur de réseau vectoriel Agilent E8361C. À 9,83 GHz, l'isolation expérimentale optimale est réduite à -61,11 dB ; la perte d'insertion du circulateur est de -4,09 dB ; la bande passante est de 105 MHz. Le nouveau circulateur MPC en forme de Y est considéré et développé pour la première fois expérimentalement dans le régime micro-ondes dans ce court article.

II.5.2 Analyse théorique :

II.5.2.1 Conception du circulateur MPC :

Le circulateur MPC est composé en plaçant un échantillon non réciproque au point central de la jonction Y du guide d'ondes, comme le montre la figure (II.6. (a)). Le schéma structurel des cristaux photoniques à réseau triangulaire 7×8 (TLPC) est illustré à la figure (42.(b)).

Les MPC sont formés en introduisant un cylindre de ferrite de Ni-Zn (bleu) au centre des TLPC avec des tiges d'Al₂O₃ (rouge). Sous le champ magnétique DC externe, le cylindre de ferrite agit non seulement comme un résonateur, mais fournit également un angle de rotation Faraday de 120°. La constante de réseau des PCs est $a=8\text{mm}$. Le rayon des tiges d'Al₂O₃ est $r_0=3\text{mm}$ avec une permittivité relative $\epsilon_{\text{une}}=9$. Dans le guide d'ondes hexagonal partiellement transparent, les

tiges des PCM sont fixées aux plaques supérieure et inférieure. À l'extrémité du guide d'ondes, trois interfaces à bride ($22,86 \times 10,16$ mm) sont conçues pour connecter l'équipement de test.

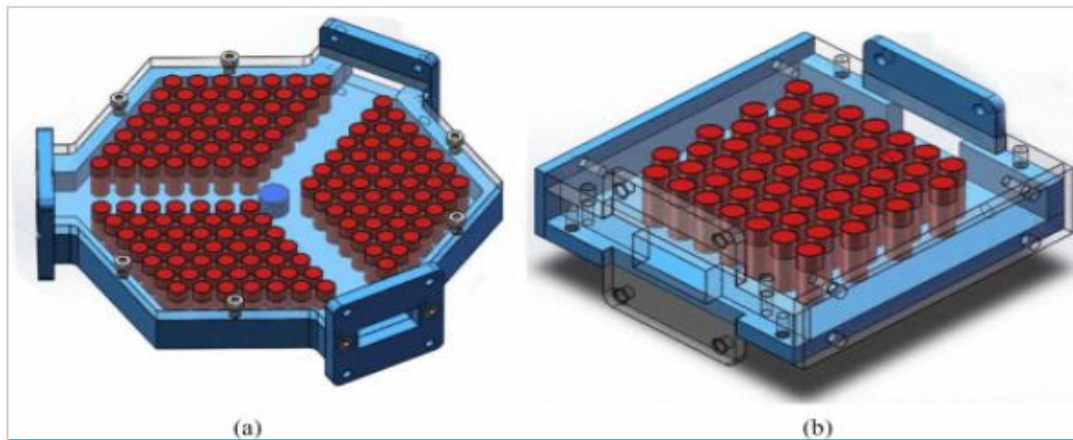


Figure II.6:(a) Schéma structurel du circulateur MPC dans un guide d'ondes partiellement transparent ; (b) Schéma structurel de 7×8 TLPC.

II.5.2.2 Structure de bande de mot TE par PCS :

La structure est d'abord examinée pour confirmer la bande interdite photonique (PBG) des TLPC. Comme le montre la figure II.6, l'ingrédient de base des TLPC est un réseau 7×8 de tiges triangulaires réparties dans l'air. La constante du système et le rayon de la tige du TLPC sont les mêmes que ceux du circulateur mentionné ci-dessus. La structure de bande des TLPC 2D est simulée avec une méthode d'expansion d'onde plane. L'analyse numérique est effectuée ici uniquement pour la polarisation TE. Les structures de bande TE des TLPCs Al_2O_3 sont montrées dans la figure II.6. Comme le montre la figure II.6, il y a trois PBG dans les TLPC dans la gamme de fréquences normalisées de 0 à 0,8 ($2\pi c / a$). Dans ce travail, les auteurs se concentrent sur la validation du premier PBG de $0,2380 \sim 0,2823$ ($2\pi c / a$). La fréquence centrale du premier PBG est de 9,76 GHz calculée par $0,26$ ($2\pi c / a$) avec la vitesse de la lumière $c = 3 \times 10^8$ m/s. En principe, les PCs interdisent la propagation des ondes électromagnétiques dans ces plages de fréquences PBG et renvoient les ondes électromagnétiques incidentes. Les auteurs ont réalisé une expérience pour valider le PBG des TLPC, comme le montre la figure II.6 (a). Les résultats expérimentaux montrent qu'il existe un PBG de $9,77 \sim 9,91$ GHz. À la fréquence centrale de 9,8 GHz, l'isolation des TLPC atteint -37,53 dB et environ 80 % de l'énergie est réfléchi vers le port d'entrée. Si une jonction de guide d'ondes à défaut de ligne est formée et qu'au point central se trouve un échantillon non réciproque tel qu'un aimant externe post-polarisé en ferrite, un circulateur avec une structure MPC 2D peut être réalisé dans la fréquence PBG.

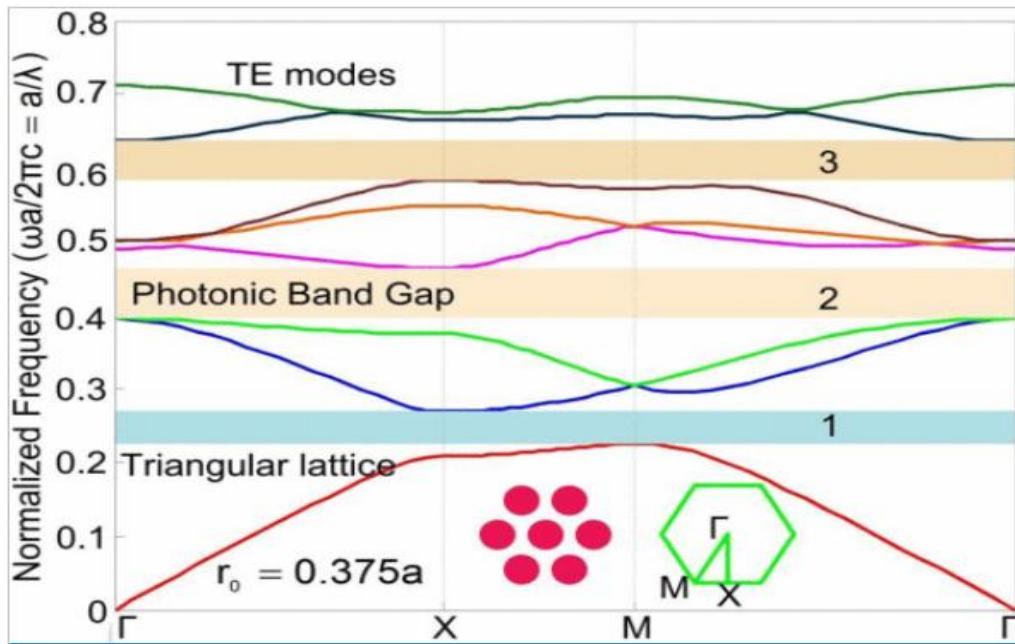


Figure II.7: Structures de bande TE des TLPCs Al₂O₃.

II.5.2.3 Propriétés gyromagnétiques de la ferrite :

Pour un échantillon de ferrite gyrotrope magnétisé dans la direction z avec des micro-ondes, le tenseur de perméabilité $[\mu_r]$ dans le système de coordonnées cartésiennes est [72] :

$$[\mu_r] = \mu_0 \begin{bmatrix} \mu & jk & 0 \\ -jk & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

Les éléments du tenseur ci-dessus sont :

$$\mu = 1 + \frac{\omega_0 \omega_m}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad (\text{II.5})$$

$$k = \frac{\omega \omega_m}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad (\text{II.6})$$

Où $\omega_0 = \mu_0 \gamma H_0$ est la fréquence de précession et $\omega_m = \mu_0 \gamma M_s$. Alors que H_0 est le champ magnétique de polarisation ; $\gamma = 1,759 \times 10^{11}$ C/Kg est le rapport gyromagnétique. $M_s = 2,39 \times 10^5$ A / m est la magnétisation de saturation.

Traditionnellement, la gamme de fréquences d'un circulateur et sa fréquence centrale sont déterminées en résolvant l'équation du tenseur de Maxwell dans la ferrite sous une polarisation

magnétique donnée avec les conditions limites données. En raison de la complexité du tenseur de perméabilité donné dans (II.1), les équations impliquées sont extrêmement complexes. Il est douteux que ces équations puissent être résolues sous une forme fermée. Pour un circulateur de guide d'ondes à jonction en Y avec un cylindre de ferrite, Owen [73] a montré que la fréquence centrale du circulateur est approximativement égale à la fréquence de résonance du cylindre de ferrite, comme s'il était traité comme un résonateur diélectrique. Suivant cette théorie, le cylindre de ferrite de la figure II.6 (a) est d'abord examiné comme un résonateur diélectrique et conçu dans la jonction du guide d'ondes PC. On obtient une formule simple pour déterminer la fréquence centrale d'un cylindre de ferrite magnétisé [74], dans laquelle la relation entre le rayon et la hauteur du cylindre de ferrite est donnée :

$$R = x / \left\{ \left(\frac{2\pi\sqrt{\varepsilon_F}}{299.7932} \right) - \left[\left(\frac{\pi}{l_F} \right) \times 1.5^2 \right] \right\}^{1/2} \quad (\text{II.7})$$

Où $\varepsilon_F = 13,6$ est la permittivité relative de la ferrite Ni-Zn ; l_F est la hauteur de la ferrite centrale de rayon R ; x est une valeur de compromis, pour assurer une taille appropriée du cylindre de ferrite pour la jonction du circulateur, x est choisi ici pour être 2,4. De cette façon, le cylindre de ferrite est conçu principalement sur la base de la fréquence centrale donnée. Puisque l'isolation TLPC atteint -37,53 dB à la fréquence de 9,8 GHz, comme mentionné ci-dessus, la fréquence centrale du circulateur est également choisie à 9,8 GHz. La hauteur du cylindre central en ferrite est calculée pour être de 8,13 mm avec le rayon $R=4.7\text{mm}$. [74]

II.5.3 Fonction du circulateur MPC:

Avant de valider expérimentalement le circulateur MPC, les propriétés externes du circulateur sont simulées à une fréquence de 9,8 GHz par la méthode des éléments finis (Comsol Multiphysics). Le champ magnétique continu externe $H_0 = 2,55 \times 10^5$ A / m est polarisé selon la direction z sur le pôle de ferrite. La région calculée est divisée en environ 112 000 cellules de grille et est entourée de couches parfaitement adaptées (PML) avec une double épaisseur de constante de réseau. L'isolation numérique et la perte d'insertion du circulateur sont illustrées à la figure II.7. Au centre de cette figure, les ports A, B et C représentent les trois ports du circulateur. Sous la polarisation du champ magnétique externe, la direction de propagation de l'onde électromagnétique présente une déviation de 120 degrés pour obtenir une circulation à 120 degrés. Par conséquent, l'onde électromagnétique lancée depuis le port A est presque totalement transmise au port B (le port de sortie) ; le port C est isolé.

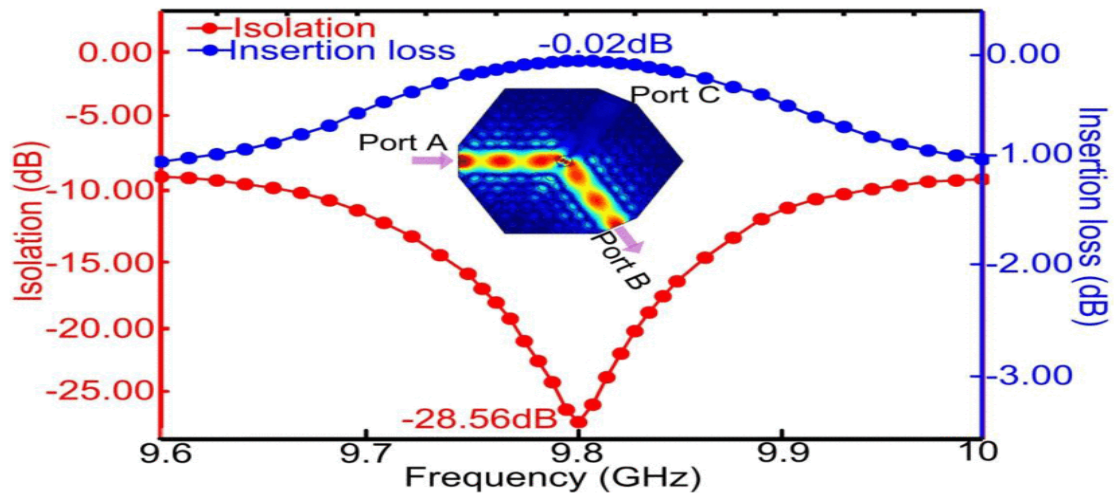


Figure II.8: Isolation numérique et perte d'insertion du circulateur.

Les paramètres caractéristiques externes du circulateur sont étudiés en changeant la fréquence de l'onde électromagnétique incidente. Lorsque le signal est lancé depuis l'un des trois ports (Port A, B et C), nous collectons l'énergie du signal au niveau des deux autres ports et calculons l'isolation et la perte d'insertion du circulateur. Les variations de la perte d'insertion et de l'isolation en fonction de la fréquence pour le circulateur MPC sont déjà illustrées à la figure II.8. À la fréquence centrale de 9,8 GHz, l'isolement atteint -28,56 dB et la perte d'insertion n'est que de -0,02 dB. Lorsque la fréquence diverge de la fréquence centrale, les caractéristiques de transmission du circulateur se détériorent progressivement avec l'augmentation du décalage de fréquence.

II.5.4 Circulateur 2D-MPCS en forme de Y :

Les expériences validées pour les circulateurs MPC sont divisées en deux étapes. Tout d'abord, le PBG des TLPC sera confirmé expérimentalement, comme le montre la figure II.9 (a). La méthode d'essai détaillée a été décrite de manière similaire dans, ce qui n'est pas répété ici. La figure II.9 (b) montre la vue de dessus de l'échantillon du circulateur MPC. Ensuite, les montages expérimentaux permettant de mesurer les caractéristiques de transmission du circulateur MPC sont illustrés à la figure II.9 (c) et (d). Le circulateur et l'analyseur de réseau vectoriel sont reliés au convertisseur coaxial par un connecteur SMA et un guide d'ondes. Sous l'action d'un aimant permanent (NdFeB), les caractéristiques de transmission du circulateur MPC sont mesurées dans la gamme de fréquences de 9,6 à 10 GHz, comme le montre la Figure II.10. [22]

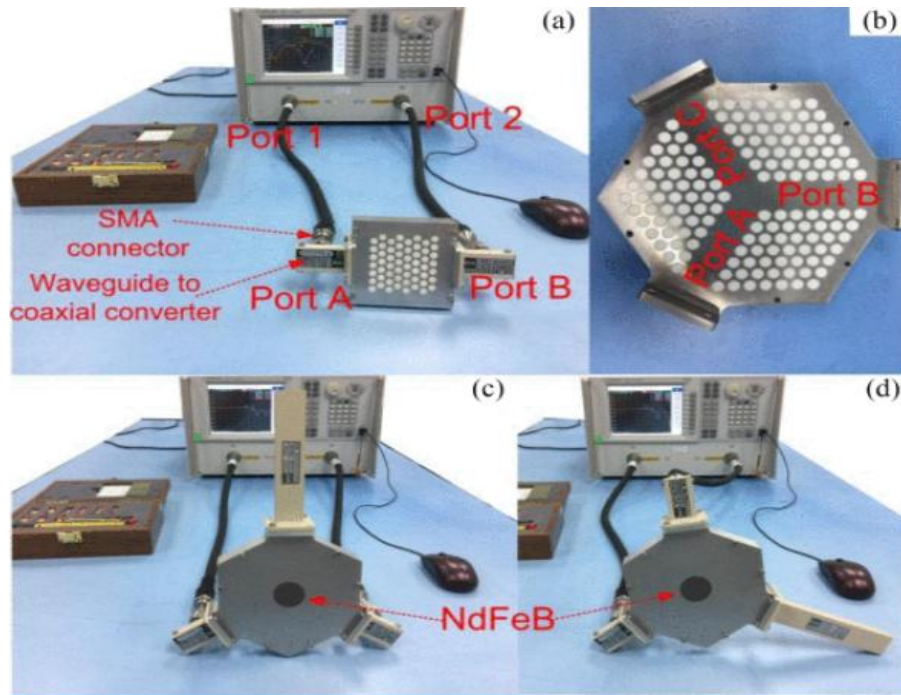


Figure II.9:(a) Montage expérimental pour mesurer le PBG des TLPC ; (b) vue de dessus du circulateur MPC ; (c) montage expérimental pour mesurer les caractéristiques de transmission des ports A et B du circulateur MPC ; (d) montage expérimental pour mesurer les caractéristiques de transmission des ports A et C du circulateur MPC.

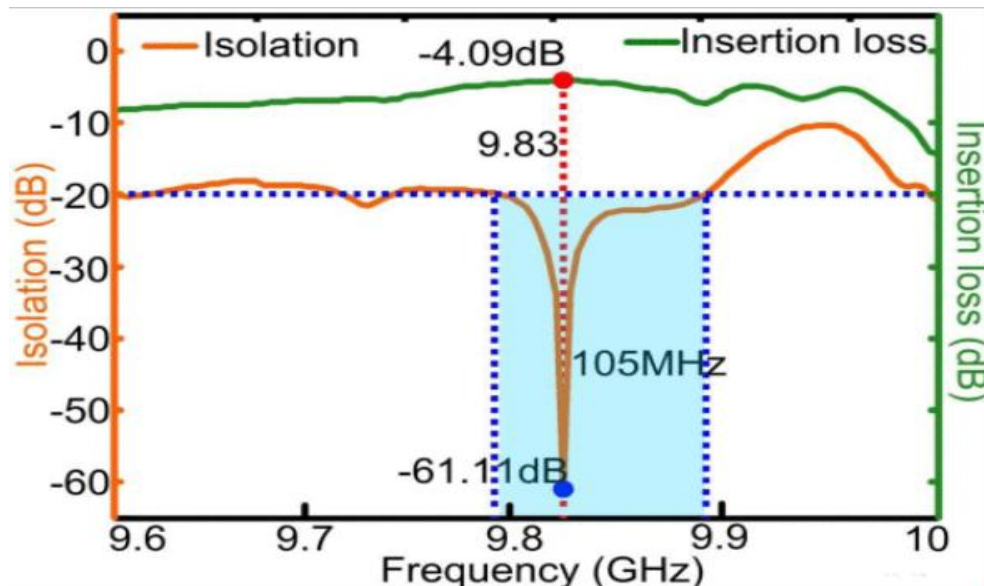


Figure II.10:Mesure de l'isolation et de la perte d'insertion du circulateur

Dans les expériences, le paramètre S_{21} représente la valeur logarithmique du rapport entre la puissance de transmission du port 2 et la puissance d'entrée du port 1. De même, S_{12} représente la caractéristique de transmission du port 2 au port 1. Dans la mesure conventionnelle de l'analyseur de réseau, les paramètres S sont respectivement exprimés comme suit :

$$S_{21} = 10 \log (P_{21}/P_1) \quad (\text{II.8})$$

$$S_{12} = 10 \log (P_{12}/P_2) \quad (\text{II.9})$$

Où P_1 et P_2 sont les puissances d'entrée du port 1 et du port 2. P_{21} est la puissance de transmission du port 1 au port 2 et P_{12} est la puissance de transmission du port 2 au port 1.

Dans la figure **II.9(c)**, le port 1 et le port 2 de l'analyseur de réseau vectoriel sont connectés au port A et au port B du circulateur. Lorsque la perte d'insertion du câble d'alimentation et de l'adaptateur est ignorée, l'isolation α_{BA} et la perte d'insertion τ_{BA} du circulateur sont exprimées comme suit :

$$\alpha_{BA} = S_{21} = 10 \log (P_{21}/P_1) \quad (\text{II.10})$$

$$\tau_{BA} = S_{12} = 10 \log (P_{12}/P_2) \quad (\text{II.11})$$

Lorsque les ondes électromagnétiques lancées depuis le port A sont transmises au port B (le port de sortie), le port C est isolé. L'isolation et la perte d'insertion mesurées du circulateur sont présentées sur la figure **II.10**. À la fréquence centrale de 9,83 GHz, la perte d'insertion mesurée τ_{BA} est de -4,09 dB ; l'isolation du port C au port A est de -61,11 dB. Comme le montre la figure **II.10**, la bande passante du circulateur est d'environ 105 MHz ($\alpha < -20$ dB). Les résultats expérimentaux sont en parfait accord avec les résultats numériques mentionnés ci-dessus. De plus, l'isolation expérimentale optimale de -61,11 dB est meilleure que la valeur numérique.

II.6 Applications en circulateurs:

II.6.1 Duplexeur :

Le circulateur peut être utilisé comme duplexeur RF pour partager la même antenne entre l'émetteur et le récepteur, qui sont accordés sur des fréquences différentes. Cette configuration permet des communications bidirectionnelles sur un seul canal. En utilisant un circulateur pour le branchement, un seul filtre peu coûteux est nécessaire à l'entrée du récepteur. Cela permet de réduire le nombre de composants et les coûts d'exploitation.

Comme le montre Figure II.11., en reliant un émetteur au port 1, une antenne au port 2 et un récepteur au port 3, une seule antenne est utilisée pour effectuer deux tâches. Le signal émis va directement au port de l'antenne et est isolé du récepteur. Tous les signaux reçus de l'antenne vont directement vers le récepteur et non vers l'émetteur en raison de la nature non réciproque du circulateur. [74]

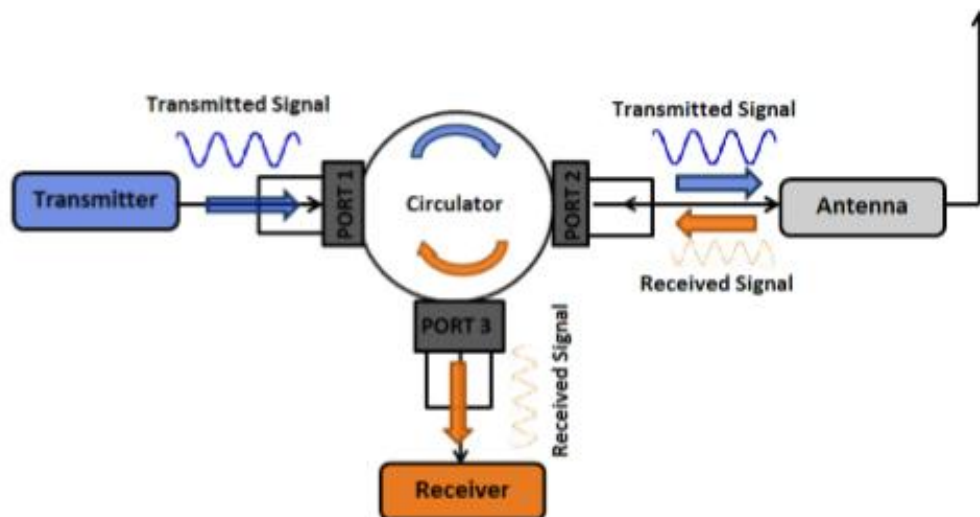


Figure II.11: Circulateur comme duplexeur RF

II.6.2 Isolation :

Pour les applications nécessitant une isolation plus élevée et une meilleure directivité, on utilise un circulateur à double jonction. Un circulateur à double jonction est une combinaison en série de deux circulateurs intégrés dans un seul boîtier. Comme le montre la Figure II.12., un double circulateur construit possède 4 ports avec les configurations possibles suivantes :

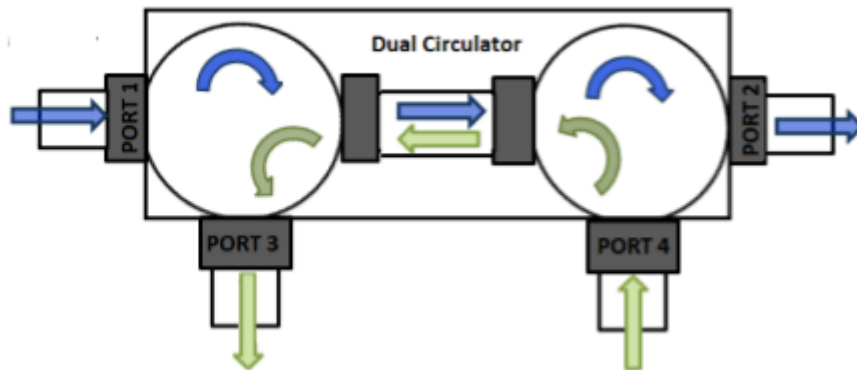


Figure II.12: Double circulateur

Le signal RF appliqué est forcé de circuler soit du (port 1 au port 2), soit du (port 3 au port 4), tandis que les (ports 3 et 4) ou les (ports 1 et 2) sont respectivement terminés par des charges externes adaptées. Lorsqu'il se déplace du (port 1 au port 2) ou du (port 3 au port 4), le signal transmis traverse deux jonctions de ferrite. De cette façon, une isolation très élevée est obtenue entre l'entrée et la sortie. L'isolation typique obtenue avec un double circulateur est de l'ordre de 40 à 50 dB. [75]

II.6.3 Amplificateur de réflexion :

Un amplificateur de réflexion est un type de circuit amplificateur hyperfréquence qui utilise des diodes à résistance différentielle négative, ces diodes peuvent amplifier les signaux et fonctionnent souvent mieux aux fréquences micro-ondes que les dispositifs à deux ports. Cependant, comme la diode est un dispositif à un port (deux bornes), 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 du signal connectée à un port, la diode polarisée connectée à un deuxième et la charge de sortie connectée au troisième, la sortie et l'entrée peuvent être découplées.

II.6.4 Combiner :

Le circulateur peut également être utilisé comme combineur pour plus d'un émetteur, par exemple pour des liaisons radio. La combinaison de liaisons radio s'avère difficile lorsque la fréquence est supérieure à 2 GHz [76]. Par exemple, pour une station comportant quatre émetteurs et quatre récepteurs (voir la figure II.13 (a)), une matrice de filtres haute fréquence est utilisée pour former le combineur. Par exemple, pour une station comportant quatre

émetteurs et quatre récepteurs (voir la figure II.13 (a)), une matrice de filtres haute fréquence est utilisée pour former le combineur.

La perte de chaque lter conduit à une perte totale relativement élevée, surtout pour l'émetteur 1 et le récepteur 1. De plus, les filtres ne sont pas indépendants les uns des autres. le réglage d'un filtre affecte les autres, ce qui rend la tâche difficile. Si certains des lters sont remplacés par des circulateurs (voir la figure II.13 (b)), les pertes peuvent être réduites et nous pouvons améliorer l'indépendance entre les lters lorsque l'accord est effectué [77].

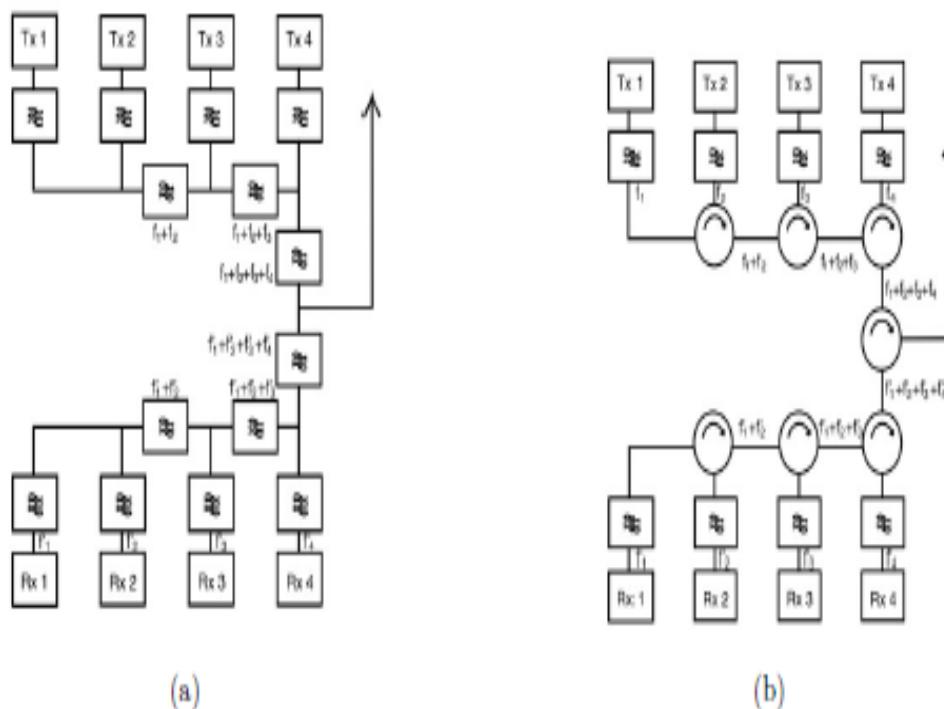


Figure II.13: Combinaison de réseaux pour les liaisons radio : (a) solution basée sur des lters ; (b) solution basée sur des circulateurs [78]

II.6.5 Quelques Domaines d'application :

Voici quelques domaines industriels desservis par les circulateurs :

- * Télévision et radiodiffusion - Liaisons radio et réseaux de télécommunication
- * Industries de l'aviation et de la navigation - Équipement militaire et systèmes radar
- * Systèmes de mesure en laboratoire - Chauffage industriel par micro-ondes.

II.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, comme nous venons de le voir, nous nous sommes intéressés aux circulateurs, à son principe et à ses différentes topologies.

Les circulateurs sont caractérisés par leur matrice de paramètres S ou matrice de distribution, dont les principales propriétés sont les pertes dans le sens de la transmission et l'isolation dans l'autre sens (sens de blocage).

Un circulateur MPC 2D en forme de Y est conçu et mesuré en utilisant un poteau de ferrite Ni-Zn et des TLPC. Le TLPC formé par le réseau de tiges en céramique Al₂O₃ a un PBG de 9,77 ~ 9,91 GHz. La fréquence centrale du circulateur est déterminée par la hauteur et le rayon du résonateur central en ferrite. Le circulateur MPC est d'abord développé dans la gamme de fréquences de 9,83 GHz. Les excellentes performances du circulateur démontrent que les MPC 2D sont une méthode réalisable pour développer des dispositifs non réciproques dans les bandes micro-ondes et millimétriques.

Chapitre III

Présentation des résultats de SIMULATION

Introduction :

La simulation par la méthode des éléments finis (FEM) est un outil informatique largement utilisé dans de nombreux domaines tels que la physique, la mécanique, la thermique ou l'électricité.

La simulation par éléments finis via COMSOL Multiphysics permet de prendre en compte plusieurs paramètres physiques, tels que la densité du matériau, le déplacement des particules et le potentiel électrique, lorsque des ondes acoustiques de surface se propagent le long de la surface d'un matériau piézoélectrique donné. Nous avons d'abord commencé par des calculs et des simulations sur une structure existante, afin de comparer les calculs (simulations) et les expériences. Plusieurs configurations ont été testées et seule celle qui était en parfait accord avec les résultats expérimentaux a été prise en compte.

Cette phase d'optimisation est cruciale car elle permet d'estimer la précision des simulations et de valider le modèle et la méthode avant de les utiliser pour simuler les réponses en fréquence des nouvelles structures que l'on souhaite concevoir.

Dans ce chapitre, nous présentons brièvement le logiciel de simulation COMSOL Multiphysics, basé sur la méthode des éléments finis. Les structures optimisées seront ensuite construites et testées afin de comparer les résultats expérimentaux avec les calculs théoriques. [79][80]

III.1 Présentation du logiciel COMSOL Multiphysics :

COMSOL Multiphysics est un progiciel dédié à la modélisation par éléments finis et à la simulation numérique de phénomènes multiphysiques décrits par des systèmes d'équations différentielles partielles (EDP). Il s'agit d'un logiciel multiplateforme : Windows, Mac et GNU/Linux. Il possède une interface graphique et interactive permettant à l'utilisateur de concevoir son modèle en 1D, 2D ou 3D. C'est un outil avancé et puissant qui contient de puissants solveurs permettant de traiter et de résoudre des problèmes de physique, de mécanique et de génie des procédés tout en arrivant rapidement au résultat. COMSOL permet d'optimiser les solutions, de coupler et de résoudre simultanément des équations issues de domaines multi-physiques. Un avantage très important de COMSOL Multiphysics est qu'il offre à l'utilisateur la possibilité de se concentrer sur le modèle et de ne pas passer du temps à résoudre des équations mathématiques qui nécessitent d'écrire plusieurs lignes de

programmation. Les étapes du processus de modélisation sur ce logiciel, dont une vue de l'interface graphique est présentée à la figure 50, se déroulent comme suit :

- ✓ Choisissez la dimension de la géométrie du modèle (1D, 2D et 3D).
- ✓ Choisir le domaine physique de l'étude (CA/CC, acoustique, mécanique des structures, transfert de chaleur...).
- ✓ Choisir le type d'étude pour le calcul (fréquence, temps, stationnaire, ...).
- ✓ Construire le modèle géométrique de l'appareil à étudier.
- ✓ Définir les propriétés physiques des matériaux et les conditions aux limites.
- ✓ Construire le maillage de la structure.
- ✓ Résoudre et afficher les résultats : Analyse des résultats et post-traitement.
- ✓ Résoudre et afficher les résultats : Analyse des résultats et post-traitement.

Notons que ce logiciel permet la simulation de plusieurs domaines physiques en même temps et pour la même étude [81] [82].

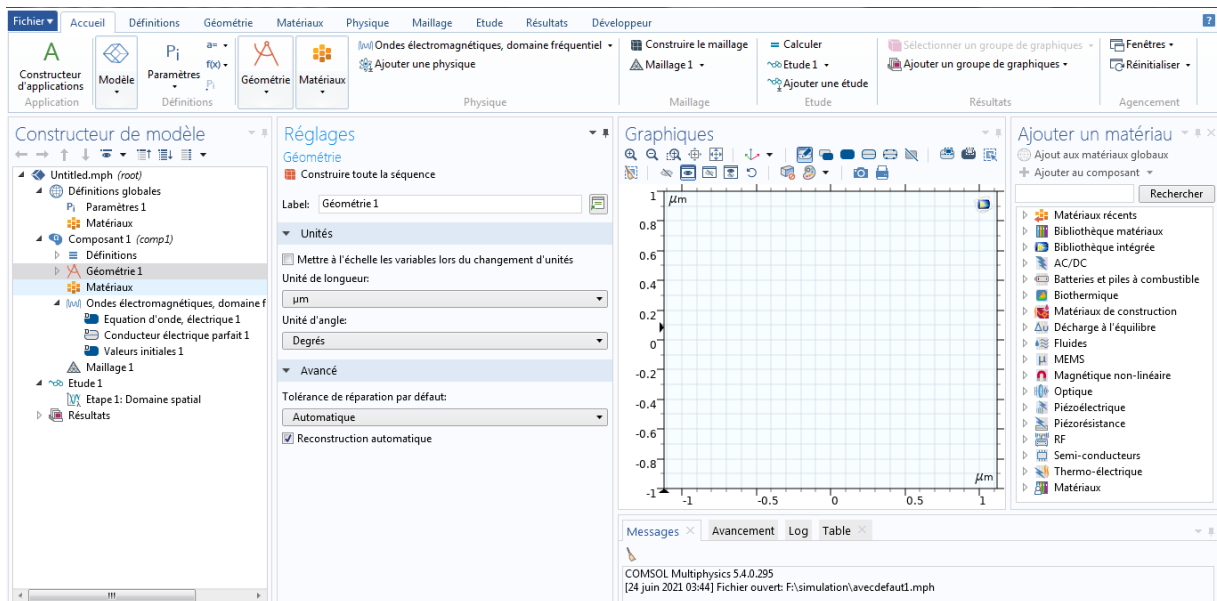


Figure III.1: Interface du logiciel COMSOL Multiphysics

III.2 Résultats des calculs et discussion :

Le but de ce chapitre est de déterminer les caractéristiques de transmission d'une structure de circulateur avec certaines spécifications de charge. Pour la réalisation de circulateurs à cristaux photoniques, nous nous intéressons aux guides pour la fabrication de coudes aigus ou de fonctions circulatrices à haut débit de transmission. Concernant notre projet, l'étude porte sur une structure photonique 2D constituée de bâtonnets de GaAs dans l'air.

Dans notre simulation, nous avons choisi les paramètres suivants :

a : L'espace entre le centre de deux motifs adjacents ($a=0,55 \mu\text{m}$).

K : le rayon normalisé de la tige (0.2)

r : le rayon des tiges ($r=0.132$)

III.2.1 Les guides d'ondes :

III.2.1.1 Cristal photonique 2D sans défaut :

e- Maille carrée :

L'étude porte sur une structure déconnectée en 2D constituée d'un réseau carré de tiges de GaAs. La figure III.2 illustre la structure d'un réseau CP-2D sans défaut à mailles carrées : le nombre de motifs dans le réseau est égal à 225 tiges cylindriques (dans la direction $x=15$ tiges et $y=15$ tiges). 2 illustre la structure d'un réseau CP-2D sans défaut à mailles carrées :

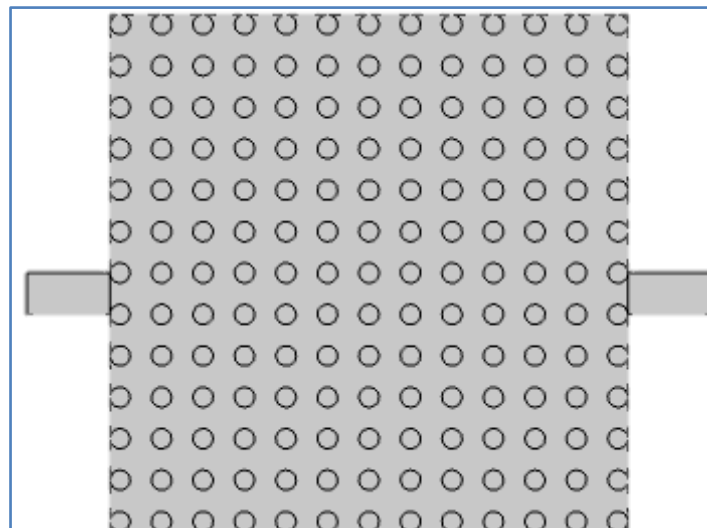


Figure III.2: Représentation schématique d'un CP-2D déconnecté sans défaut de motif carré.

- La figure III.2 montre la cartographie du champ électrique E_z le long de la structure.

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

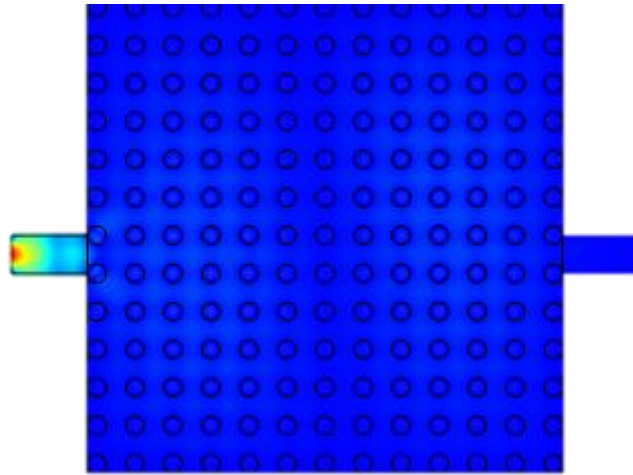


Figure III.3: Représentation de la propagation du champ électrique E_z dans un cristal photonique carré 2D sans défauts.

- La figure III.4 illustre la réponse spectrale en termes de transmission en fonction de la longueur d'onde sur la plage $[1,2, 1,8] \mu\text{m}$, où nous enregistrons une transmission quasi nulle.

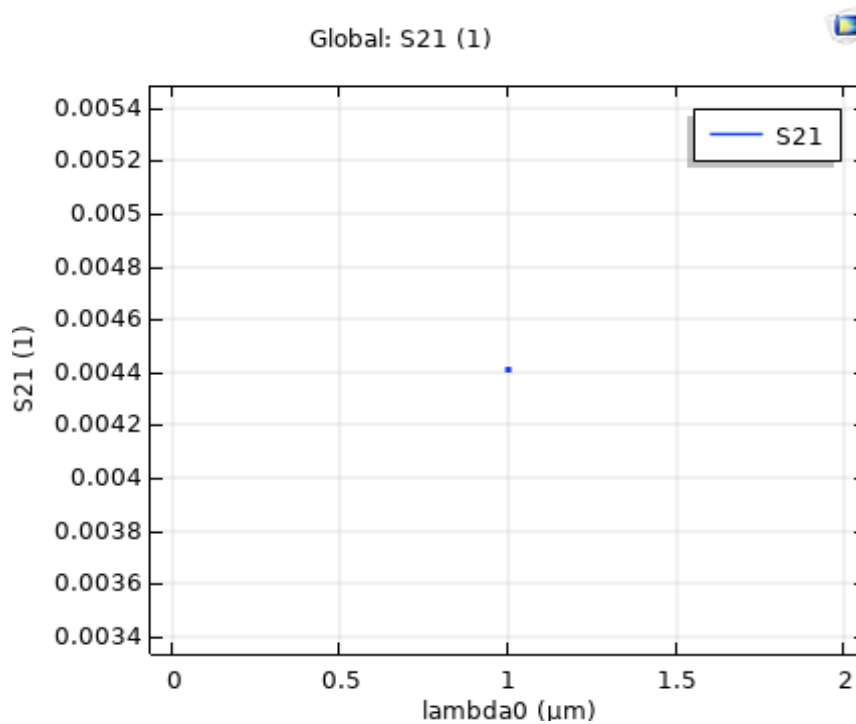


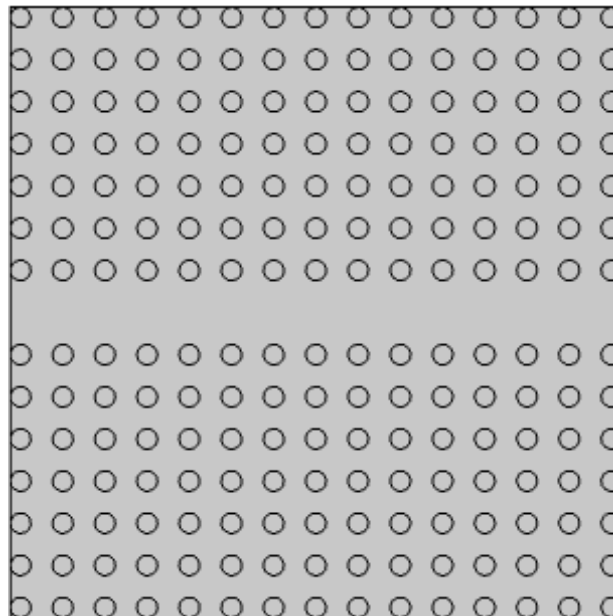
Figure III.4: Réponse spectrale de transmission d'un CP-2D déconnecté sans carré.

III.2.1.2 Cristal photonique 2D avec défaut :

En présentant un défaut linéaire (omission d'une ou plusieurs rangées de motifs élémentaires), on peut orienter la lumière dans une direction choisie. Celle-ci se propagera le long de ce guide avec une fréquence appartenant à la bande interdite photonique du cristal.

Ces défauts linéaires, également appelés défauts étendus, peuvent servir de guides d'ondes. A l'intérieur de ces défauts, des modes avec une fréquence appartenant au BIP peuvent exister. Ces modes électromagnétiques associés aux guides d'ondes sont des modes confinés et peuvent se propager le long du guide et avec des parois parfaitement réfléchissantes. De cette manière, on peut dévier le chemin de la lumière. Le phénomène de guidage est bien assuré dans ce cas.

f- Guides d'ondes carrés à rangée unique basés sur une maille carrée CP-2D :



($a=0.55$, $r=0.132$, $n=3.37$)

Figure III.5:Représentation schématique d'un CP-2D déconnecté avec défaut de motif carré.

- La figure III.5 illustre la distribution du champ E_z le long de la structure ou la propagation de l'onde électromagnétique injectée à l'entrée de la structure est clairement observée. En effet, la lumière suit le canal ou bien le défaut linéaire formé par une seule rangée.

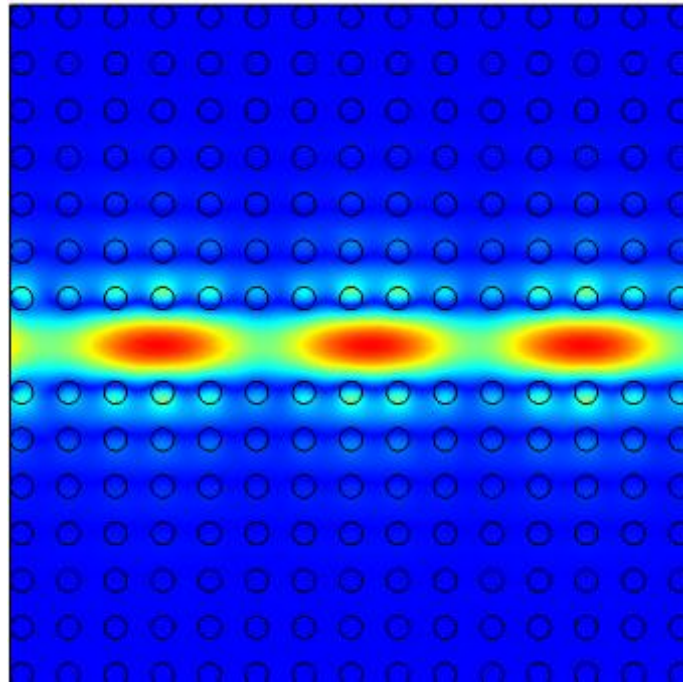


Figure III.6:Distribution du champ électrique E_z d'un guide d'ondes à une seule rangée basé sur un maillage carré déconnecté CP-2D (la longueur d'onde $1.8 \mu\text{m}$).

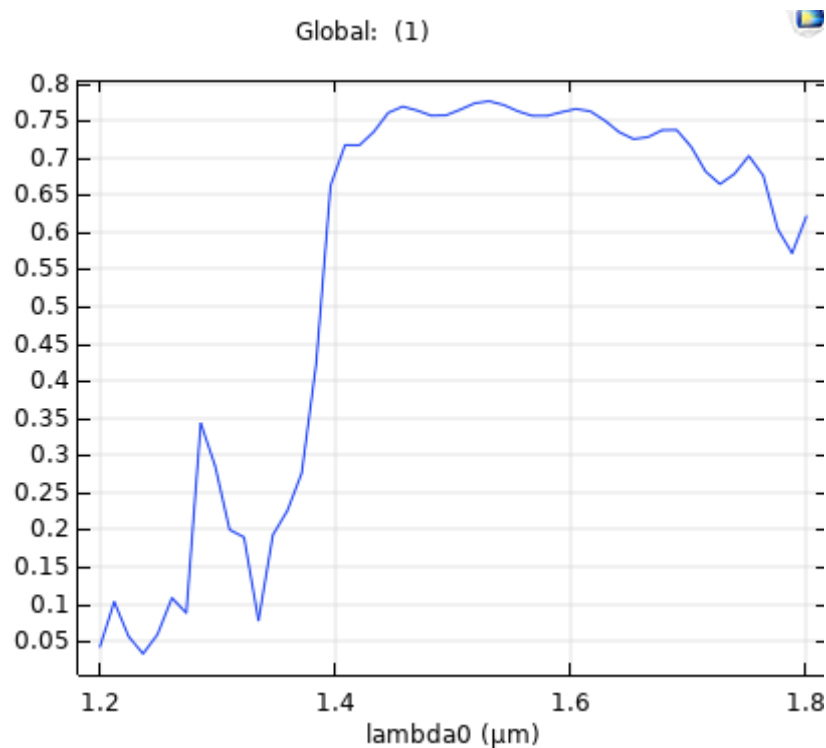


Figure III.7:Réponse spectrale en termes de transmission d'un guide d'ondes déconnecté basé sur CP-2D.

- La figure III.7 montre la réponse spectrale en termes de transmission d'un guide d'ondes à base de CP-2D à mailles carrées déconnectées obtenu par émission à une seule rangée [$1.2 \mu\text{m}$ - $1.8 \mu\text{m}$].

Selon la figure, on remarque que la réponse spectrale admet un maximum dans la bande de longueur d'onde [1,52-1,53] μm avec une puissance de 79%.

On explique ces maximums par la présence du mode guidé sans perte qui existe à ces longueurs d'onde. On conclut que l'introduction du défaut étendu ouvre une bande de transmise à l'intérieur du guide d'onde.

III.2.2 Circulateur avec trois ports micro-ondes :

Pour analyser le circulateur MPC à trois ports, nous utilisons la méthode des éléments finis pour calculer le système. La source lumineuse est lancée depuis l'un des trois ports, et nous recueillons les signaux lumineux aux deux autres ports, c'est-à-dire au port de sortie et au port isolé. En comparant les signaux collectés avec le signal d'entrée, la perte d'insertion et l'isolation de ce circulateur, définis comme « $10 \log(1/|T_{\text{out}}|^2)$ » et « $10 \log(1/|T_{\text{iso}}|^2)$ », sont calculés. Les symboles « T_{out} » et « T_{iso} » désignent les coefficients de transmission pour le port de sortie et le port isolé, respectivement. Dans les calculs suivants, le rayon des tiges diélectriques de l'arrière-plan est fixé à $r = 0.132 \mu\text{m}$. La transmission de lumière calculée dans une certaine gamme de fréquences est présentée à la figure III.9. Nous avons choisi un matériau en ferrite pour les tiges magnéto-optiques. La permittivité relative de matériau ferrite est donnée par $\epsilon_r=12.9$, et sa perméabilité relative prend la forme d'un tenseur de second rang sous un champ magnétique continu appliqué dans la direction z [5].

$$[\mu] = \begin{bmatrix} \mu_r & j\mu_k & 0 \\ -j\mu_k & \mu_r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{III.1})$$

$$\text{Où : } \mu_r = \frac{1 + \omega_m (\omega_0 + i\alpha\omega)}{[(\omega_0 + i\alpha\omega)^2 - \omega^2]} \quad \text{et} \quad \mu_k = \frac{\omega_m \omega}{[(\omega_0 + i\alpha\omega)^2 - \omega^2]} \quad (\text{III.2,3})$$

$$\text{Avec : } \omega_0 = \mu_0 \gamma H_0 \quad \text{et} \quad \omega_m = \mu_0 \gamma M_s \quad (\text{III.4,5})$$

$$\text{Et : } \gamma = 1.759 \times 10^{11} \text{ C/kg} \quad \text{et} \quad \alpha = 3 \times 10^{-5} \quad \text{et} \quad M_s = 2.39 \times 10^5 \text{ A/m}$$

Tout d'abord, le rayon des quatre tiges de ferrite est optimisé pour obtenir un coude de lumière à haute efficacité de 120° en étudiant les transmissions de lumière des ports 1 à 2 (cas I) et des ports 2 à 3 (cas II). Dans les deux cas, la cavité à couplage latéral a peu d'influence sur eux. Pour différents R , la perte d'insertion et l'isolation sont calculées par balayage de la

fréquence normalisée. Les valeurs obtenues La perte d'insertion la plus faible et l'isolation la plus élevée obtenues sont représentées pour différents R, comme le montre la figure III.8.

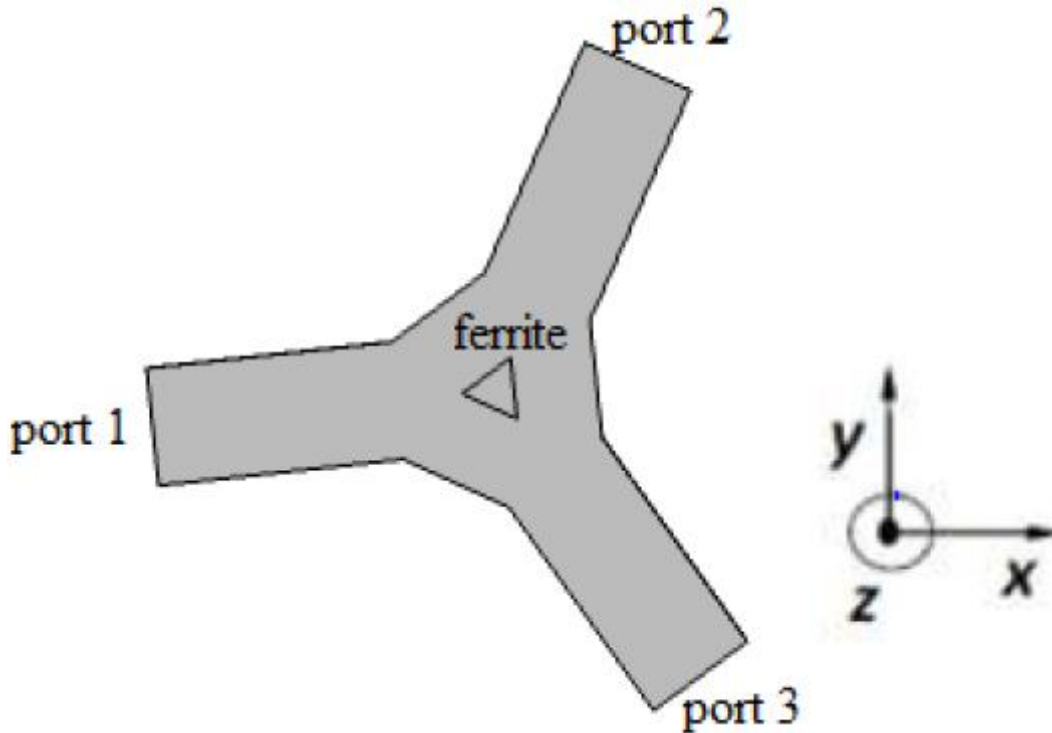


Figure III.8:Représentation schématique d'un circulateur micro-ondes à trois ports.

Après avoir choisi la fréquence de fonctionnement comme $\omega = 0,4132(2\pi c/a)$, nous ajustons les paramètres de la cavité à couplage latéral pour optimiser la transmission de la lumière des ports 3 à 1 (cas III).

$$T_{out} = \frac{j\left(\frac{\omega}{\omega_{res}} - 1\right) + \frac{1}{Q_0}}{j\left(\frac{\omega}{\omega_{res}} - 1\right) + \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{2Q_e}} \quad (\text{III.6})$$

$$R_{out} = \frac{\frac{1}{2Q_e}}{j\left(\frac{\omega}{\omega_{res}} - 1\right) + \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{2Q_e}} \quad (\text{III.7})$$

Où ω_{res} est la fréquence de résonance de la cavité à couplage latéral, Q_0 est le facteur de qualité dû aux pertes intrinsèques et Q_e est le facteur de qualité lié au couplage entre la cavité et le guide d'ondes. D'après les équations (2) et (3), nous pouvons trouver que lorsque les conditions de $\omega = \omega_{res}$ et $Q_e \gg Q_0$ sont satisfaites, le coefficient de transmission T_{out} est beaucoup plus grand que le coefficient de réflexion R_{out} . Selon l'analyse ci-dessus, afin d'obtenir une transmission de lumière à haute efficacité pour le cas III, la fréquence du

résonateur de la cavité à couplage latéral doit être modulée pour être $\omega = 0,4132(2\pi c/a)$ et une très grande valeur de Q_e/Q_o est nécessaire.

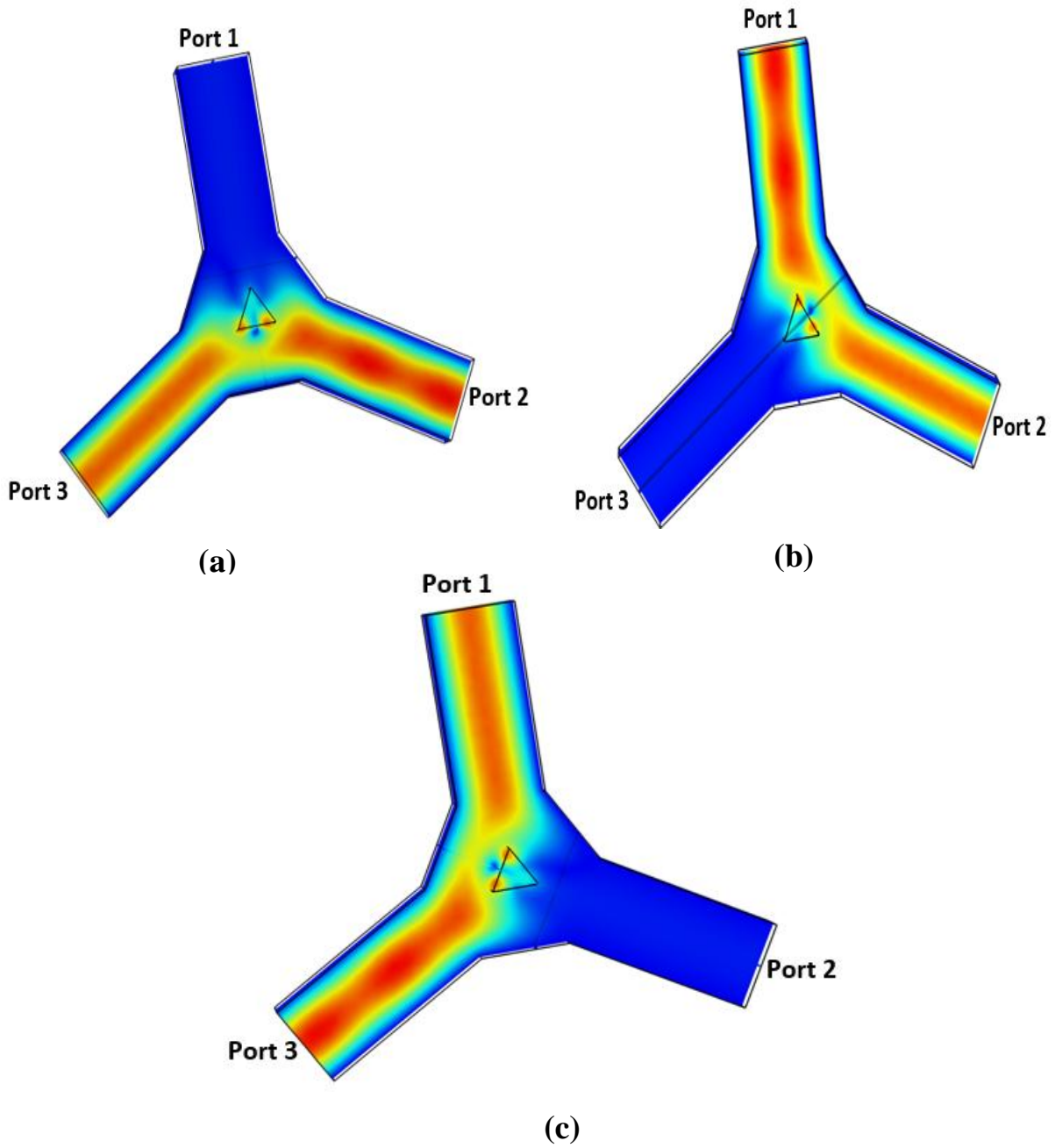


Figure III.9: Distributions du champ électrique E_z dans le circulateur MPC fonctionnant à la fréquence de $\omega = 0,4132(2\pi c/a)$ pour une lumière d'entrée lancée. (a) depuis le port 1, (b) du port 2, et (c) du port 3.

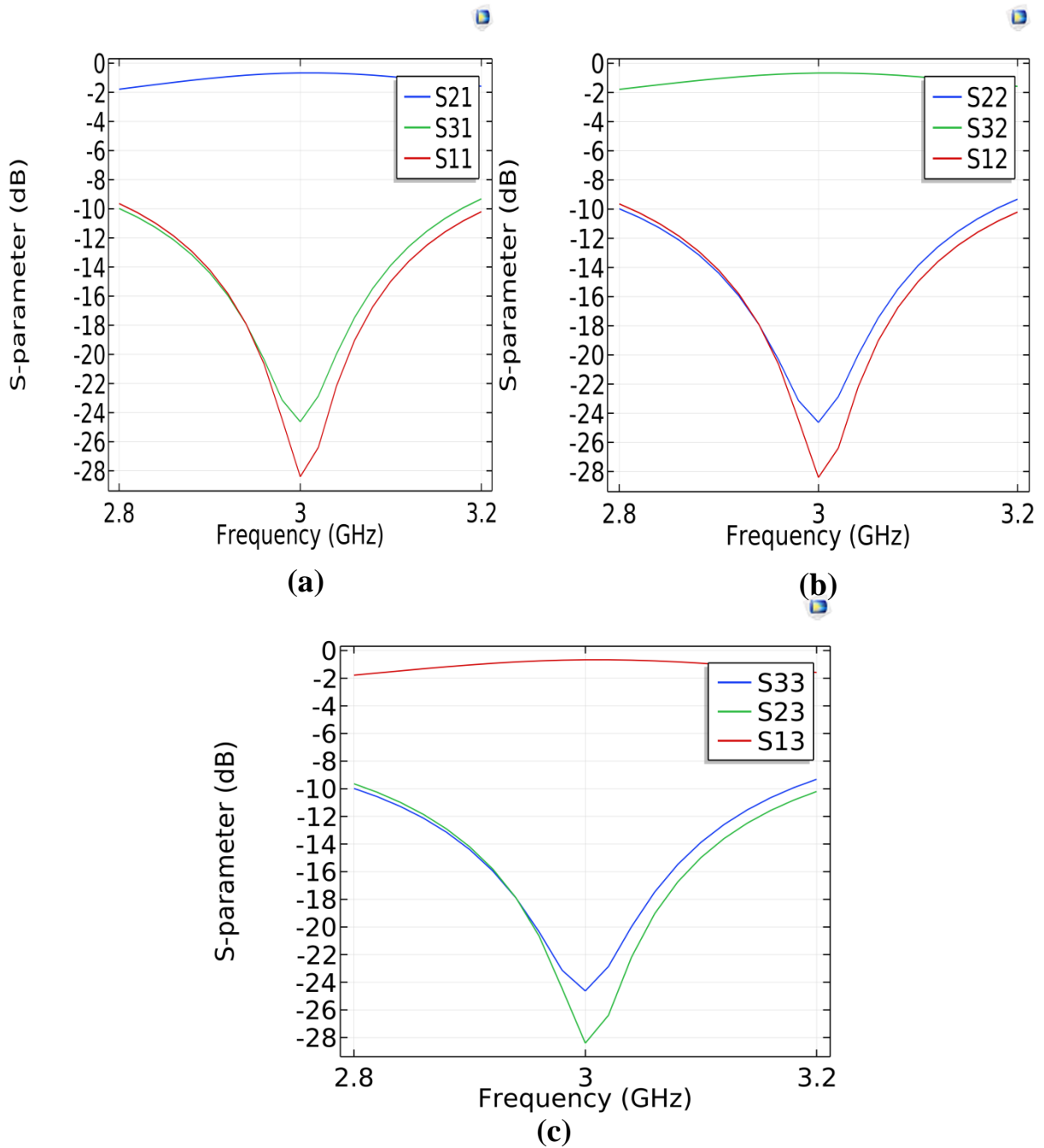


Figure III.10:Présentation de Paramètre S en fonction de la fréquence, (a) depuis le port 1, (b) du port 2, et (c) du port 3.

La perte d'insertion correspondante du circulateur est de 0.15 dB, et les isolations pour les différents ports isolés sont de 24.5 dB pour le port 2, 28.2 dB pour le port 3, comme le montrent les trois figures en médaillon figure III.10.

III.2.3 Circulateur à cristaux photoniques à 4 ports :

Nous présentons un circulateur optique à quatre ports basés sur des cristaux photoniques à réseau carré bidimensionnel rapporté. Il est simple en dehors de son cadre sommaire. La structure géométrique cristalline du circulateur permet des transmissions non réciproques à

90° d'ondes électromagnétiques avec des faibles pertes d'insertion et des niveaux d'isolation élevés grâce à la technologie des cristaux magnéto-optiques figure 60. Aussi, en comparaison modèles antérieurs, le circulateur à quatre ports proposés utilise une structure cristalline bidimensionnelle à réseau carré avec une section de ferrite cylindrique de l'angle de Faraday $\pi/4$. Ici, les cristaux photoniques bidimensionnels à réseau carré b avec un rayon de $r = 0,132 \mu\text{m}$, et un indice de réfraction de $n = 3,37$, est utilisé comme guide d'ondes de cristaux photoniques, qui est intégré dans l'air de l'indice de réfraction 1. La méthode des éléments finis est utilisée pour ce milieu anisotrope afin d'obtenir les éléments tenseurs dans cette simulation.

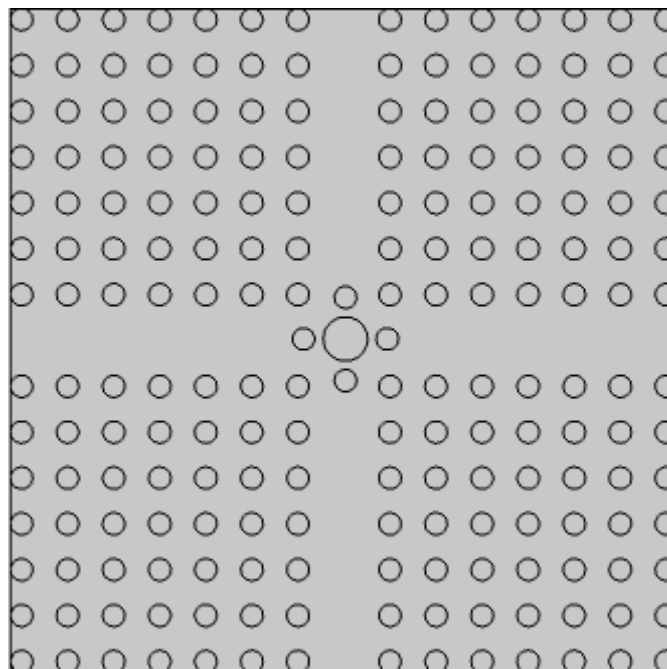


Figure III.11: Schéma de principe du circulateur proposé avec quatre cristaux de ferrite uniformes enchâssés dans l'air.

Les milieux gyroélectriques et gyromagnétiques possèdent une permittivité diélectrique et une perméabilité magnétique tensorielles, qui seront traitées séparément. Un matériau de ferrite entièrement magnétisé sous un champ magnétique statique externe est appelé un matériau gyromagnétique. Une onde électrique transversale (TE) ($E_x = E_y = 0, E_z \neq 0$) est donnée en entrée [91]

Le tenseur de perméabilité pour l'onde TE dans la structure PC doit être incorporé avec un milieu anisotrope effectif, ayant une valeur scalaire. Le milieu anisotrope est conçu à l'aide de l'élément off-diagonal 'k' et de l'élément on-diagonal ' μ_r ' du tenseur de perméabilité. Le

tenseur de perméabilité du matériau gyromagnétique, qui est magnétisé par un champ magnétique externe, peut être caractérisé par la matrice suivante :

$$[\mu] = \begin{bmatrix} \mu_r & jk & 0 \\ 0 & \mu_r & 0 \\ 0 & 0 & \mu_r \end{bmatrix} \quad (\text{III.8})$$

Les éléments tensoriels μ_r et k sont donnés par les équations suivantes [90] :

$$\mu_r = \mu_0 (1 + x_{xx}) \quad (\text{III.9})$$

$$k = -j \mu_0 x_{xy} \quad (\text{III.10})$$

$$x_{xx} = \frac{\omega_0 \omega_m (\omega_0^2 - \omega^2) + \omega_0 \omega_m \omega^2 \alpha^2}{(\omega_0 - \omega^2 (1 + \alpha^2))^2 + 4 \omega_0 \omega^2 \alpha^2} - j \frac{\alpha \omega \omega_m (\omega_0^2 + \omega^2 (1 + \alpha^2))}{(\omega_0 - \omega^2 (1 + \alpha^2))^2 + 4 \omega_0 \omega^2 \alpha^2} \quad (\text{III.11})$$

$$x_{xy} = \frac{2 \omega_0 \omega_m \omega^2 \alpha}{(\omega_0 - \omega^2 (1 + \alpha^2))^2 + 4 \omega_0 \omega^2 \alpha^2} + j \frac{\omega \omega_m (\omega_0^2 - \omega^2 (1 + \alpha^2))}{(\omega_0 - \omega^2 (1 + \alpha^2))^2 + 4 \omega_0 \omega^2 \alpha^2} \quad (\text{III.12})$$

Les éléments tensoriels sont minimisés comme suit

$$\mu_r = \mu_0 [1 + \omega_m (\omega_0 + i \alpha \omega)] / [(\omega_0 + i \alpha \omega)^2 - \omega^2] \quad (\text{III.13})$$

$$k = \mu_0 (\omega_m \omega) / [(\omega_0 + i \alpha \omega)^2 + \omega^2] \quad (\text{III.14})$$

Ici, les fréquences de résonance sont :

$$\omega_0 = \gamma H_0 \quad (\text{III.15})$$

$$\omega_M = \gamma M_S \quad (\text{III.16})$$

Où $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H m⁻¹ est la perméabilité du vide, γ est le rapport gyromagnétique ($1,759 \times 10^{-7}$ C kg⁻¹), $\epsilon_r = 12.9$ est la permittivité relative, $\omega = 2\pi f$ est la fréquence angulaire du signal lumineux d'entrée excité, $\alpha = 3 \times 10^{-5}$ est le facteur d'amortissement,

$M_S = 2,39 \times 10^5$ est la magnétisation de saturation, $c = 3 \times 10^8$ m s⁻¹ est la vitesse de la lumière et $H_0 = 3,05 \times 10^5$ A m⁻¹ est le champ magnétique externe appliqué [92].

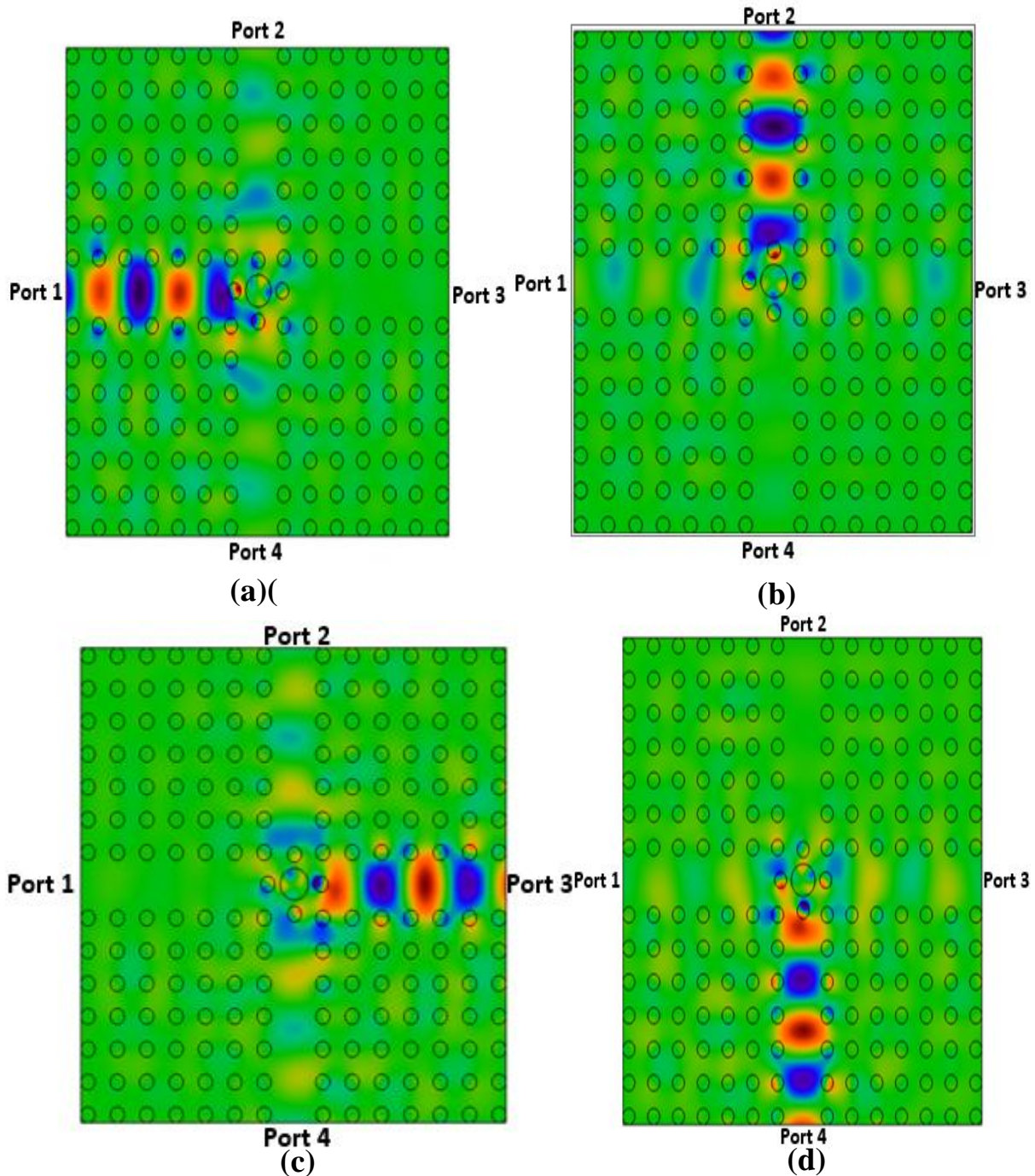
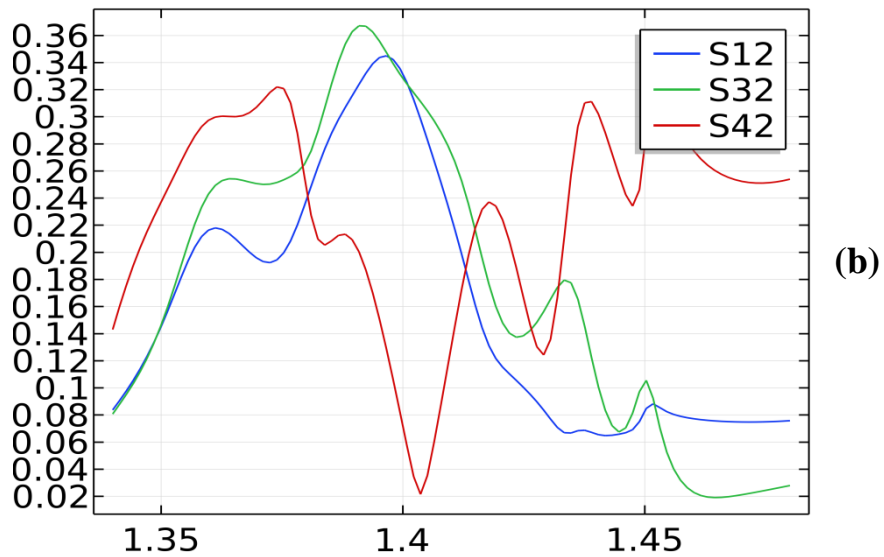
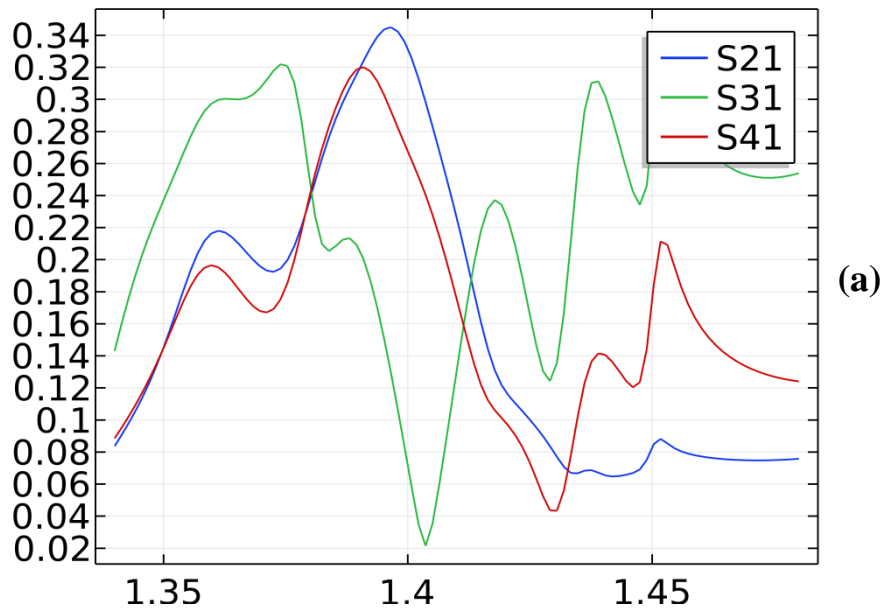


Figure III.12: Modèles de champ électrique du circulateur. (a)-(d) Les modèles de champ électrique à la fréquence normalisée sous le champ magnétique sont excités aux ports 1, 2, 3 et 4.

Sous l'influence du champ magnétique externe, les diagrammes de champ électrique de l'entrée excitée individuellement aux ports 1, 2, 3 et 4 sont présentés sur les figures **III.12.** (a)-(d), respectivement.

Les paramètres S du circulateur à quatre ports pour l'excitation des ondes électromagnétiques au port 1 sont calculés et tracés, comme dans les figures **III.13.** (a)-(d).

Ici, la composante S21 affiche un niveau élevé de puissance transmise et d'autres paramètres montrent la faible quantité de réflexion de la lumière. Les résultats avec les paramètres S désignent que la transmission maximale et la réflexion minimale entre les ports sont obtenus pour la fréquence de fonctionnement de $0,4151(2\pi c/a)$. [93]



(c)

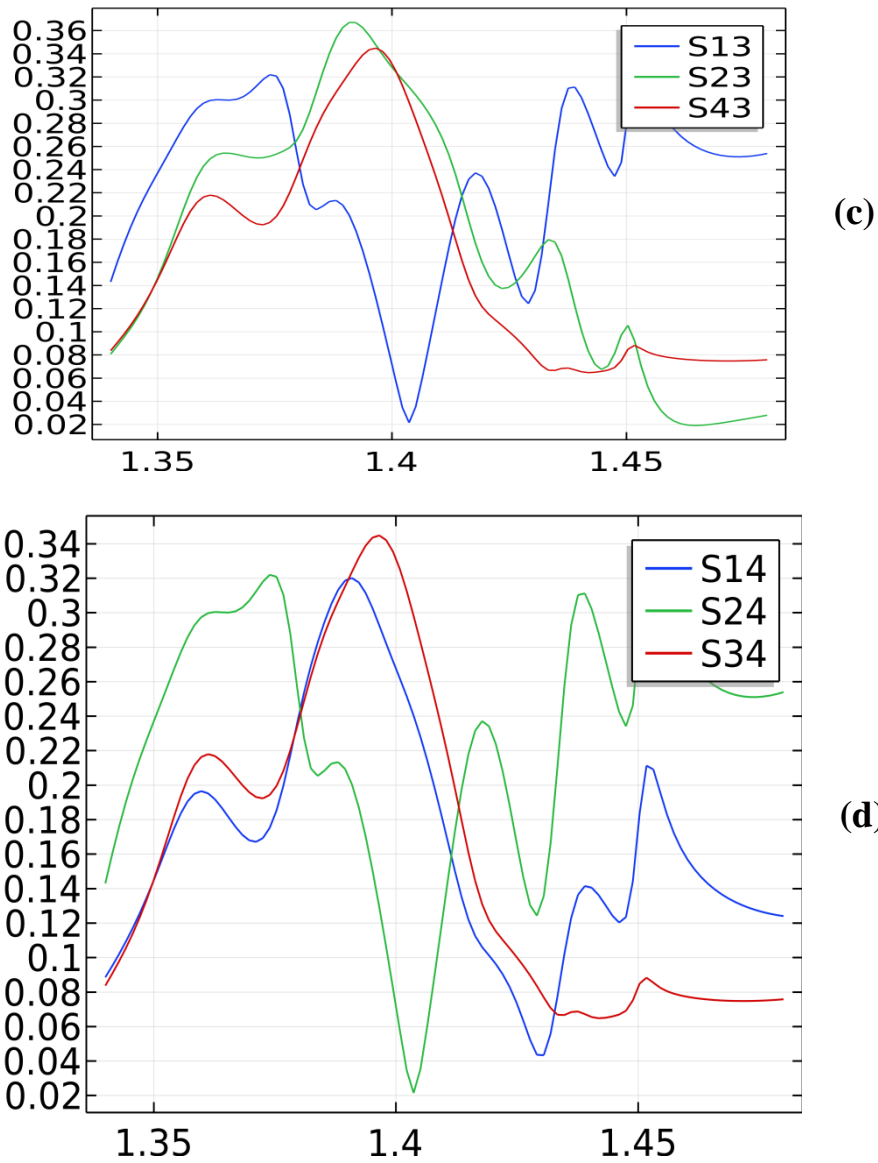
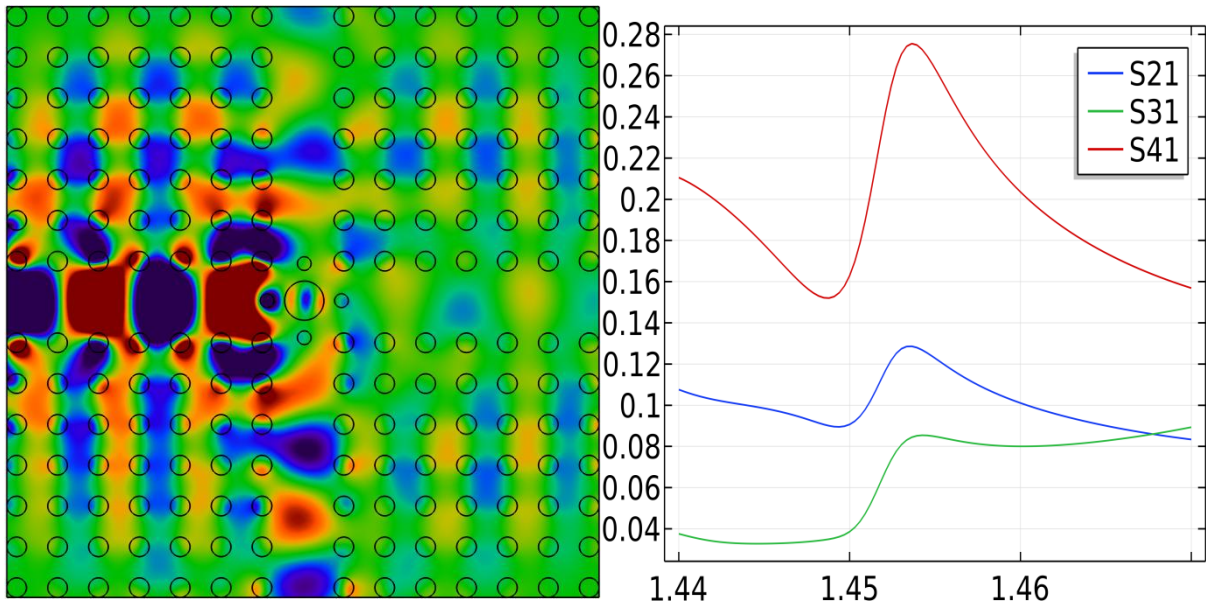
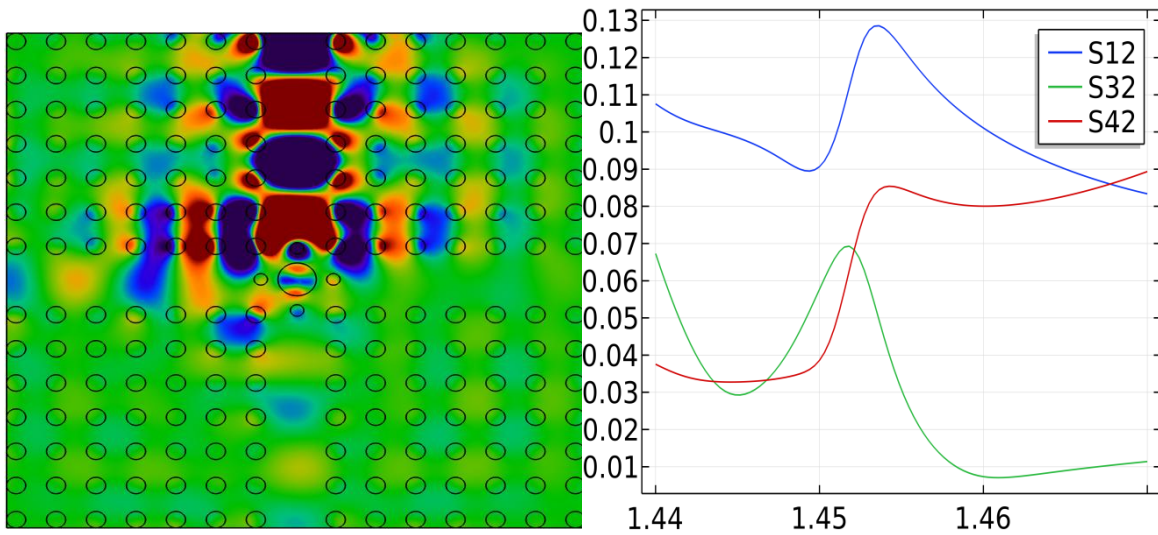


Figure III.13:Présentation de Paramètre S en fonction de la fréquence pour les ports 1,2,3, 4. Les paramètres S, qui contiennent l'information des ondes lumineuses transmises et réfléchies sont conceptuellement analysés et calculés. Ce dispositif est plus compact et peut être utilisé pour réaliser des fonctions de séparation et d'isolation contrôlables dans les circuits optiques.

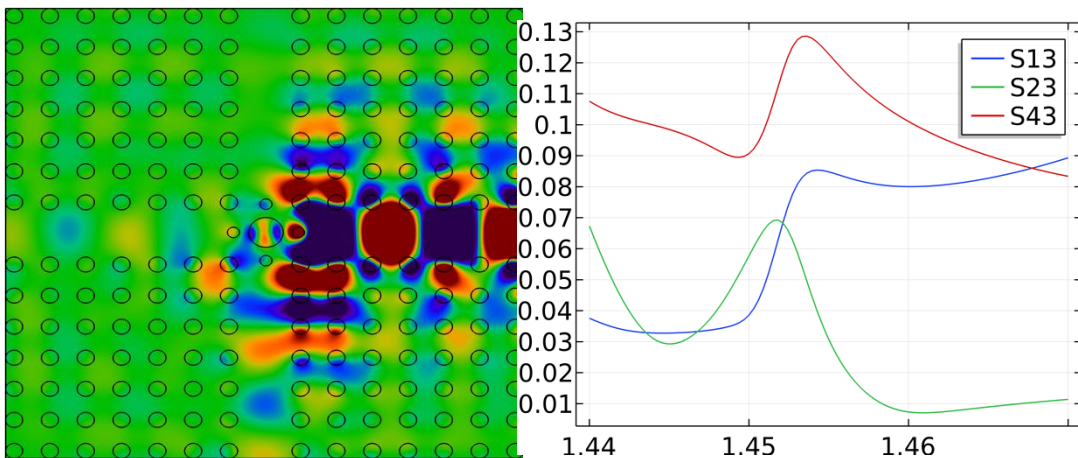
➤ L'excitation au niveau de port 1 :



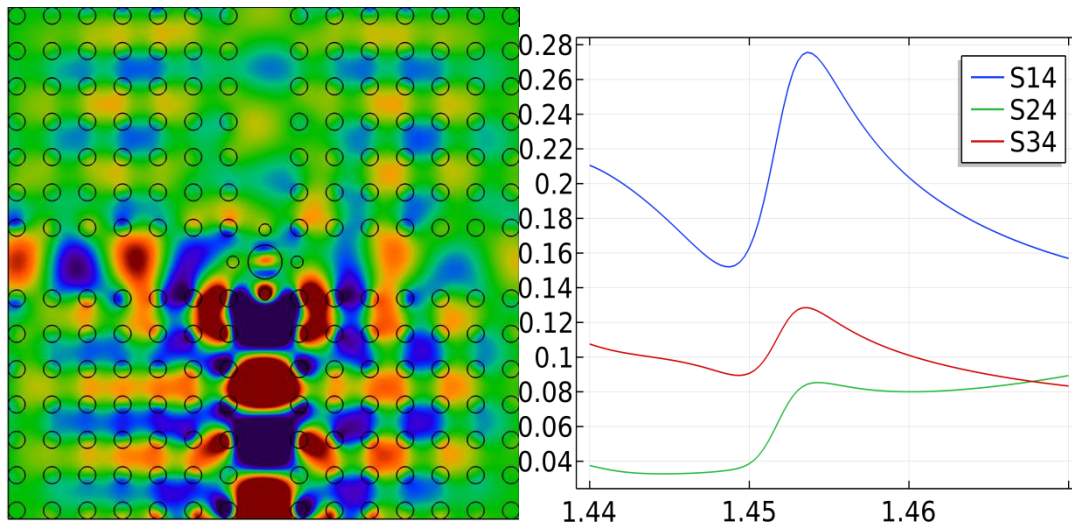
➤ L'excitation au niveau de port 2 :



➤ L'excitation au niveau de port 3 :



➤ L'excitation au niveau de port 4 :



III.3 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats de la simulation par le logiciel COMSOL de différents composants optiques basés sur des CP-2D planaires déconnectés gravés sur GaAs.

Nous avons tout d'abord réalisé des guides d'ondes à maille carrée W1KA et W3KA, puis nous avons conclu que l'introduction de défauts étendus assure un bon guidage de la lumière au sein de ses structures.

Pour terminer, nous avons conçu plusieurs circulateurs basés sur des cristaux photoniques 2D (3 ports et 4 ports), et simulé les différents résultats montrant que la position des longueurs d'onde dépend des valeurs du rayon relatif R de l'anneau intérieur. Par conséquent, en faisant varier le rayon, nous pouvons atteindre n'importe quelle fréquence située dans la bande interdite photonique.

Conclusion générale

Notre travail concerne la conception et l'étude d'un circulateur optique basé sur des guides d'ondes bidimensionnels, en utilisant le logiciel COMSOL.

Pour cela, nous avons d'abord présenté les concepts généraux sur les cristaux photoniques. Après les définitions et l'historique des premiers cristaux photoniques, nous avons décrit les différents types de cristaux photoniques. Puis nous avons cité leurs propriétés physiques et géométriques et les notions de bandes photoniques. Les notions de bandes photoniques nécessitent de prendre en compte le principe de la zone de Brillouin irréductible et leurs diagrammes de bandes issus de l'étude de la zone de Brillouin irréductible afin d'introduire les conditions de défauts dans les mécanismes de propagation des ondes optiques. L'utilisation d'un défaut dans les structures périodiques, qu'il soit linéaire ou local, va modifier le fonctionnement de la structure à cette fréquence puisqu'un seul mode peut se propager. Ces cristaux photoniques représentent une plateforme extrêmement intéressante pour les futures optiques intégrées miniatures car ils possèdent les qualités de confinement requises.

Le second chapitre est consacré à les circulateurs à cristaux photoniques. Tout d'abord, nous avons présenté les Principales caractéristiques d'un circulateur comme : l'isolation, la perte d'insertion, la bande passante... Après on a cité les types de circulateurs. De plus, nous avons représenté le Principe de fonctionnement d'un circulateur et comment Le circulateur se caractérise par sa matrice de paramètres S ou matrice de dispersion. Ensuite, nous avons expliqué la Conception du circulateur MPC et la structure de bande de mot TE par PCS. La dernière partie présente également quelques applications en circulateurs, notamment le Duplexeur, les isolateurs, l'amplificateur de réflexion et le combiner.

Dans le troisième chapitre, nous avons étudié les Cristaux photoniques déconnectés planaires 2D gravés sur GaAs. Nous avons d'abord présenté les structures à mailles carrées avec et sans défaut. Avec le logiciel ComsolMultiphysics, nous avons conçu et simulé deux topologies différentes de circulateurs basés sur des cristaux photoniques et micro-ondes bidimensionnels. Le circulateur proposé a une structure essentiellement basée sur des guides d'ondes.

Références bibliographiques :

- [1] LOMBARDET, Benoît, «étude et réalisation des cristaux photoniques pour l'optique intégrée,» *thèse de doctorat,École polytechnique fédérale de LAUSANNE*, n° %13254, 2005.
- [2] Hadjira, ABRI née BADAOU, «étude et conception des micro composants à base des cristaux photoniques bidimensionnels,» *thèse de doctorat,université de TLEMCEM*, Décembre 2012.
- [3] E. Yablonovitch, «Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics,» *Physical Review Letters* , vol. 58, n° %120, pp. 2059-2062, 1987.
- [4] S.John, «Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices,» *Physical Review Letters* 58, p. 2059, 1987.
- [5] E. Yablonovitch, T.J. Gmitter and K.M. Leung, «Structure de la bande photonique: Le cas cubique à face centrée utilisant des atomes non sphériques,» *Physical Review Letters*, vol. 67, n° %117, p. 2295, 1991.
- [6] OYHENART, Laurent, «Modélisation, réalisation et caractérisation de cristaux photoniques tridimensionnels,» *thèse de doctorat,université de BORDEAUX*, 13 Décembre 2005.
- [7] MASSAOUDI, Soumia, «Etude théorique et expérimentale des matériaux à bandes interdites photoniques bidimensionnels (BIP 2D) en Micro-Ondes: Application à l'ultraréfraction",» *thèse de doctorat,UNIVERSITE PARIS XI UFR SCIENTIFIQUE D'ORSAY*, 25 Février 2005.
- [8] GRAYDON, «Nature'snanosructurescolourwings and stones,» *Optol_ser Europe*, vol. 51, p. 31, juillet 1999.
- [9] M.Pomarède, «la couleur des oiseaux,» *pour la Science*,, n° %1261, p. 92, juillet 1999.
- [10] «wikipedia,» [En ligne]. Available: https://fr.wikipedia.org/wiki/Cristal_photonique. [Accès le 20 février 2020].
- [11] «chimie magique,» [En ligne]. Available: <https://www.chimiemagique.fr/?p=28>. [Accès le 20 février 2020].
- [12] MASSY, Sandrine, «Contribution à la réalisation de fonctions optiques à base de cristaux photoniques sur LiNbO",» *thèse de doctorat,Université de LIMOGES*, 2004.

- [13] INOUE, Kuon et OTHAKA, «cristaux photoniques: physique, fabrication et applications,» *Springer Science and Business Media*, 2004.
- [14] Sukhoivanov IA, Guryev IV, «Introduction to Photonic Crystals,» *springer, berlin, heidelberg*, vol. 152, 2009.
- [15] V. VIGNERAS, H. ROUSSEL, J.P. PARNEIX, W. TABBARA, «Modélisation et mesure de la réponse électromagnétique de structures BIP bidimensionnelles,» *JNM 2001 Poitiers*, 16-18 mai 2001.
- [16] Yablonovitch, T. J. Gmitter et K.M. Leung, «Photonic band structure: the facecentered-Cubic case employing non-spherical atoms,» *Physical Review Letters*, vol. 67, n° 12259-2298, p. 17, 1991.
- [17] L. Bigot, «Fibres à cristal photonique : 10 ans d'existence et un vaste Champ d'applications,» *Laboratoire de physique des lasers, atomes et molécules*.
- [18] S. Noda, K. Tomoda, N. Yamamoto, and A. Chutinan, «Full Three-Dimensional Photonic Bandgap Crystals at Near-Infrared Wavelengths,» *Science*, vol. 289, n° 15479, pp. 604-606, 2000.
- [19] P.R. VILLENEUVE, M. PICHE, «Photonic band gap in two-dimensional square lattices: Square and Circular rods,» *Physical Review B*, vol. 46, pp. 8565-8571, 1992.
- [20] M. PLIHAL, A.A. MARADUDIN, «Photonic band structure of two-dimensional systems: The triangular lattice,» *Physical Review B*, vol. 44, pp. 8565-8571, October 1991.
- [21] D. CASSAGNE, C. JOUANIN, D. BERTHO, «Hexagonal photonic band gap structures,» *Physical Review B*, vol. 53, pp. 7134-7141, March 1996.
- [22] ZELSMANN, Marc, «Cristaux photoniques en silicium sur isolant pour le guidage, le filtrage, l'émission et l'extraction de la lumière,» *thèse de doctorat, UNIVERSITE JOSEPH FOURIER, Grenoble I*, 1 novembre 2003.
- [23] GRILLET, Christian, «Microcomposants optiques à base de cristaux photoniques bidimensionnels pour l'optique intégrée,» *thèse de doctorat, Ecole Centrale de LYON*, 2003.
- [24] S. Kheffache, «Propagation d'ondes élastiques dans les cristaux phononiques bidimensionnels,» *thèse de doctorat, UNIVERSITE DE TIZI-OUZOU*, Septembre 2011.

- [25] D. Felbacq, E. Centeno, «Theory of diffraction for 2D photonic crystals with boundary,» *Optics Communications*, vol. 199, pp. 39-45, 2001.
- [26] C.Kittel, *Physique de L'état Solide*, paris: 7ème édition (Dunod), 2005.
- [27] F. Lallam, H. Abri Badaoui, M. Abri and A. Fedouch,, «Design of a Novel Photonic Crystal 1.31/1.55 μm Biband Filter for Near Infrared Application,» *Optica Applicata*, vol. 48, n° %13, pp. 341-348, 2018.
- [28] B. WILD, «Etude expérimentale des propriétés optiques des cristaux photoniques bidimensionnels et de leur accordabilité,» *thèse de doctorat,Ecole polytechnique fédérale de LAUSANNE*, 2006.
- [29] Joannopoulos, R. D. Meade, J. N. Win, «Photonic Crystal: Molding the Flow of Light,» *PRINCETON University*, 1995.
- [30] B. Rahima, «Etude du couplage dans les guides d'onde à cristaux photoniques,» *mémoire de magister,université de CONSTANTINE*, 11 Novembre 2009.
- [31] Fleming, S. Y. Lin et J. G., «a three-dimensional optical photonic crystal,» *IEEE Journal of Microwave Technologie* 17, p. 1944, 1999.
- [32] Joannopoulos, S. G. Johnson and J. D., «Three-dimensionally periodic dielectriclayered structure with omnidirectional photonic band gap,» *App.Phys.Lett*, vol. 77, n° %122, pp. 3490-3492, 2000.
- [33] D. R. Smith, S. Schultz, N. Kroll, M. Sigalas, K. M. Ho; Soukoulis, and M., «Experimental and theoretical results for a two-dimensional metal photonic band-gap cavity,» *Applied Physics Letters*, vol. 65, 1994.
- [34] F.Gadot, «Modélisation et caractérisation expérimentale de matériaux à Bandes Interdites Photoniques (BIP) en Micro-Ondes,» *thèse de doctorat,université de PARIS sud*, Janvier 1999.
- [35] K.Sakoda, «Optical Properties Of Photonic Crystals Manual,» *Springer Science and Business Media*, vol. 80, 2004.
- [36] «Wikipedia,» [En ligne]. Available: https://fr.wikiversity.org/wiki/Introduction_%C3%A0_la_science_des_mat%C3%A9riaux/D%C3%A9fautes_dans_les_cristaux. [Accès le 28 Février 2020].
- [37] J.M. LOURTIOZ, D. MAYSTRE, H. BENISTY, V. BERGER, J. M. GERARD, A.

- TCHELNOKOV, «Les cristaux photoniques ou la lumière en cage,» *Hermes-Science*, 2003.
- [38] K.S.Yee, «Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media,» *IEE Trans.Antennas Propag*, vol. 14, n° 11, pp. 302-307, mai 1996.
- [39] S. Sakamoto, S. Takuma, et H. Tachibana, «Visualization of sound reflection and diffraction using finite difference time domain method,» *Acoust. Sci. Technol*, vol. 23, n° 11, pp. 34-39, 2002.
- [40] Marklein, C. Bommaraju et R., «Optimally accurate second-order time-domain finitedifference scheme for acoustic, electromagnetic, and elastodynamic wave modeling: onedimensional case,» *IEEE Antennas Propag. Soc. Int. Symp.*, vol. 2, n° 15, pp. 1499-1502, 2004.
- [41] D.Botteldooren, «Acoustical finite- difference time- domain simulation in a quasi- Cartesian grid,» *J Acoust Soc*, vol. 95, n° 14, pp. 1924-1931, 1996.
- [42] S.Wang, «Finite- difference time- domain approach to underwater acoustic scattering problems,» *J Acoust Soc Am*, vol. 99, pp. 1924-1931, 1996.
- [43] J.-J. BONNEFOIS, «modélisation d'effets non linéaires dans les cristaux photoniques, application a la limitation optique,» *thèse de doctorat, université de PARIS*, 30 Novembre 2006.
- [44] P.Yeh, «Optical Waves in Layered Media,» *Wiley,New York*, 1988.
- [45] J.B.Pendry, «Calculating photonic band structure. Journal of physics: condensed matter 8,» *Journal of Physics:Condensed Matter*, vol. 8, n° 19, p. 1085, 1996.
- [46] J.B.Pendry, «Photonic band structures,» *Journal of modern optics* , n° 141, p. 209, 1994.
- [47] Bostan, Cazimir Gabriel, «CONCEPTION ET FABRICATION DE COMPOSANTS DE CRISTAUX PHOTONIQUES QUASI-2D BASÉS SUR LA TECHNOLOGIE SILICIUM-SUR-ISOLATEUR.,» *thèse de doctorat,Université de TWENTE*, 25 Février 2005.
- [48] F. F. a. Y. Lu, «Microwave and optical waveguide analysis by the Finite,» *Research studies press Ltd*, 1996.
- [49] G.L.Maile, «Three-Dimensional Analysis of Electromagnetic Problems by Finite-,» *Thèse de doctorat, université de CAMBRIDGE*, 1979.

- [50] Popov, E. G. Loewen and E., «Diffraction Gratings and Applications,» *MarcelDekker,New York*, 1997.
- [51] Maystre, D, «Electromagnetic study of photonic band gaps,» *Pure and Applied Optics*, vol. 3, p. 975, 1994.
- [52] M. Nevière, E. Popov et R. Reinisch, «Electromagnetic resonances in linear and nonlinear optics: Phenomenological study of grating behavior through the poles and zeros of the scattering operator.,» *the Optical Society of America*, vol. A12, p. 513, 1995.
- [53] d'Yerville, M. Le Vassor, «Losses of linear waveguides in photonic crystal slabs, Workshop on two-dimensional photonic crystals,» *Ascona,Suisse*, 2002.
- [54] Fatima, Benaïssa, «Etude et Simulation de la Propagation des Ondes Electromagnétiques,dans les guides à cristaux photoniques,» *magister en physique*, 2012-2013.
- [55] R. e. Al, «Novel applications of photonic band gap materials : Low loss bends and Q cavities,» *Journal of applied physics* 75, p. 4753, 1994.
- [56] C. Manolotou, M.J. Khan, Shanhui Fan, Pierre R. Villeneuve, H.A. Hauss, «Life fellow,» *Journal Of quantum electronics*, vol. 35, p. 1322, 1999.
- [57] FARHA, Robert Michael, «Etude d'une structure à cristal photonique «LOM» gravée dans un guide Ti : LiNbO3 dopé erbium pour l'émission de lumière à 1.55 μ m,» *thèse de doctorat,Université Pierre et Marie curie et Télécom et management Sud PARIS*, 2010.
- [58] S. Noda, K. Tomoda, N. Yamamoto, *A.Chutinan Science*, vol. 289, pp. 604-606, 2000.
- [59] H. Benisty, J.M.Lourtioz, A. Chelnokov, S. Combrie, et X.Checoury, «Recent advances toward optical devices in semiconductor based photonic crystals,» *App.Phys.Lett*, vol. 94, n° 15, pp. 997-1023, 2006.
- [60] Y. Akahane, T. Asano, B. S. Song, et S. Noda, «High-Q photonic nanocavity in a two-dimensional photonic crystal,» *Nature*, vol. 425, n° 16961, pp. 944-947, 2003.
- [61] H-Y. Ryu, H-G. Park, et Y-H. Lee, «Two-dimensional photonic crystal semiconductor lasers: Computational design, fabrication, and characterization,» *IEE Sel.Top.Quantum Electron*, vol. 8, pp. 891-908, 2002.
- [62] H-Y. Ryu, M. Notomi, et Y-H. Lee, «High-quality-factor and small-mode-volume hexapole modes in photonic-crystal-slab nanocavities,» *App.Phys.Lett*, vol. 83,

- n° % 121, p. 4294, 2003.
- [63] S. Fan, P. R. Villeneuve, J. D. Joannopoulos, and H. A. Haus, «Channel drop tunneling through,» *Phys.Rev.Lett*, vol. 80, pp. 960-963, 1998.
- [64] Jaskorzynska, M. Qiu and B., «A design of a channel drop filter in a two-dimensional triangular,» *Appl.Phys.Lett*, vol. 83, pp. 1074-1076, 2003.
- [65] M. Qiu, M. Mulot, M. Swillo, S. Anand, B. Jaskorzynska, A. Karlsson, M. Kamp, and A. Forchel, «Photonic crystal optical filter based on contra-directional waveguide coupling,» *App.Phys.Lett*, vol. 83, pp. 5121-5123, 2003.
- [66] S. Olivier, H. Benisty, C. Weisbuch, C. J. Smith, T. F. Krauss, and R. Houdré, «Coupled-mode theory and propagation losses in photonic crystal waveguides,» *Optic Express*, vol. 11, pp. 1490-1496, 2003.
- [67] S. Olivier, C. Weisbuch, and H. Benisty, «Fault-tolerant and compact add-drop filter proposal,» *Optics Letters*, vol. 28, pp. 2246-2248, 2003.
- [68] Emilie Schwoob, Henri Benisty, Claude Weisbuch, Lucio Martinelli, Helmut Heidrich, Klemens Janiak, Sebastian Golka, G-H Duan, O. Drisse, F. Pommereau, «proposition et validation optique d'un demultiplexeur tout cristaux-photoniques sur inp exploitant le guidage multimode,» *Laboratoire de physique de la Matière Condensée, Ecole Polytechnique*.
- [69] Farhad Mehdizadeh, Mohammad Soroosh, Hamed Alipour, «An optical demultiplexer based on photonic crystal ring resonators,» *Banaei*, 2016.
- [70] S. ARAFA, «Étude des composants à base de cristaux photoniques : Application dans le domaine du démultiplexage et de la détection,» *thèse de doctorat*, 2018.
- [71] LENGLE Kévin, «Traitement tout optique du signal à base de composants à cristaux photoniques en matériaux semi-conducteurs III-V,» *thèse de doctorat, université de RENNES*, 19 juin 2013.
- [72] A.Rostami, H. Alipour Banaei, F. Nazari, A. Bahrami, «An ultra compact photonic crystal wavelength division demultiplexer using resonance cavities in a modified Ybranch structure,» vol. 122, n° % 116, pp. 1881-1985, 2011.
- [73] L. Weijia, Y. Daquan, S. Guansheng, T. Huiping, J. Yuefeng, «Optimization transmission of photonic crystal coupled cavity and design of demultiplexer for wevelength division multiplexing application».

- [74] Nawal BENLADGHEM, «Conception des Démultiplexeurs en Cristaux Photoniques 2D pour les Système DWDM,» *thèse de doctorat*, 04 Juillet 2019.
- [75] FILALI Meryem, «Etude et Conception d'un démultiplexeur 8 canaux à cristaux photoniques bidimensionnels,» *thèse de doctorat, université MOHAMED BOUDIAF-M'SILA*, 17 juin 2018.
- [76] Faïda, BOUGRIOU, «Etude théorique des matériaux à bandes interdites photoniques bidimensionnels: Applications dans le domaine du guidage optique et la détection,» *thèse de doctorat*, 16 Décembre 2013.
- [77] MAHI Amel, MALACHE Hadjer, «Nouvelles Structures Des Démultiplexeurs En Cristaux Photoniques 2D Pour Les Systèmes Très Hauts Débits,» *mémoire de master, université de TLEMCEM*, 27 juin 2018.
- [78] Boudissa, Abdelali, «conception des filtres optiques a base des cristaux photonique pour application dans les routeurs optiques dans les réseaux de télécommunication optique,» *thèse de doctorat, université de CONSTANTINE*, 11 avril 2013.
- [79] T. Charvolin, E. Hadji, E. Picard, M. Zelsmann, M. Assous, B. Dal'Zotto, M. E. Nier, S. Tedesco, X. Letartre, P. Rojo-Roméo et C. Seassal, «Realization of two-dimensional optical devices using photonic band gap structures on silicon-on-insulator,» *Microelectronic Engineering* 61, p. 545, 2002.
- [80] S.Noda, A.Chutinan et M.Imada, «Trapping and emission of photons by a single defect in a photonic bandgap structure,» *Nature*, vol. 407, p. 608, 2000.
- [81] Abdelbasset Mounzar, Hadjira Badaoui, Mehadji Abri, «16-Channels wavelength efficient demultiplexing around 1.31/ 1.55 μm in 2D photonic crystal slab.,» *Optik*, vol. 193, p. 162685, 2019.
- [82] Vahid Fallahi, Masoud Mohammadi & Mahmood Seifouri, «Design of Two 8-Channel Optical Demultiplexers Using 2D Photonic Crystal Homogeneous Ring Resonators,» *Fiber and Integrated Optics*, 2019.
- [83] Fallahi.V, Seifouri.M and Mohammadi.M, «a new design of optical add/drop filters and multi-channel filters based on hexagonal PhCRR for WDM systems,» *Photonic Network Communications*, vol. 37, n° 11, pp. 100-109, 2019.
- [84] Rakhshani, Mohammed Reza, «Compact eight channel wavelength demultiplexer using modified photonic crystal ring resonators for CWDM applications,» *Spring nature* 2020, 13 janvier 2020.

- [85] Masoud Mohammadi , Mahmoud Seifouri, «A new proposal for a high-performance 4-channel demultiplexer based on 2D photonic crystal using three cascaded ring resonators for applications in advanced optical systems,» *Optical and Quantum Electronics*, vol. 51, n° 111, p. 350, 2019.
- [86] BENMALEK Nadra Manel, BENLADGHEM Nawal, «Conception des Démultiplexeurs en Cristaux Photoniques 2D pour les Système DWDM,» *mémoire*, 04 juillet 2019.
- [87] B. BOUHASSOUN, A. KADOUCI, «étude et simulation numérique des composants photoniques uni-dimensionnel,» *mémoire de Master, université de TLEMCEM*, 2018.
- [88] m. d. M. mohammed EL MOUFAKKIR, *études des propriétés optiques dans l'infrarouge lointain des hétérostructures à base de semi conducteurs GaAs/Algaas modèle de la fonction diélectrique.*, université Sidi Mohamed Ben Abdellah des science , Maroc, 2012.
- [89] A. SPIESSER, *Croissance épitaxiale et propriétés magnétiques d'hétérostructures de Mn₅Ge₃ sur Ge pour des applications en électronique de spin.*, Marseille II: Université de la méditerranée , 6 janvier 2011.
- [90] https://www.researchgate.net/publication/338411092_Efficient_synthesis_of_dual-band_selective_filters_using_evolutionary_methods_in_a_1D_photonic_crystal_slab_for_near-infrared_applications
- [91] t. Maxence HOFMAN, *Composant optique à base de cristaux photonique pour les applications de l'imagerie infrarouge.*, 23 Novembre 2011.
- [92] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0030402619305029>.
- [93] <https://link.springer.com/article/10.1007/s11082-021-03018-3>