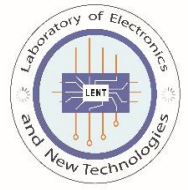




République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Oum el Bouaghi, Faculté des Sciences et Sciences Appliquées
Département de génie électrique



Ordre N°:

THESE

Présentée en vue de l'obtention du
Diplôme de Doctorat 3^{ème} cycle en Électronique
Option : **Microélectronique**

Présentée par :

ROUMAISSA DERDOUR

Intitulée :

ETUDE D'UNE STRUCTURE A CRISTAUX PHOTONIQUES POUR APPLICATION A DES PORTES LOGIQUES

Soutenue le : 02/05/2023

Devant le jury :

Président	Mr. Mohamed LASHAB	Prof	Université Oum El Bouaghi
Rapporteur	Mr. Souheil MOUETSI	Prof	Université Oum El Bouaghi
Co-Rapporteur	Mr. Mohamed Redha LEBBAL	Prof	Univ. Frères Mentouri - Constantine 1
Examineur	Mr. Mohamed BOUCHEMAT	Prof	Univ. Frères Mentouri - Constantine 1
Examineur	Mr. Skander ARIS	MCA	Univ. Frères Mentouri - Constantine 1
Examineur	Mr. Abdelaziz AIT KAKI	MCA	Université Oum El Bouaghi
Invité	Mr. Abdesselam HOCINI	Prof	Mohamed Boudiaf Université -Msila

Année académique 2022-2023

Travaux réalisés au Laboratoire d'Electronique et des Nouvelles Technologies (LENT),
Faculté des Sciences et Sciences Appliquées, Département de Génie Electrique,
Université Oum El Bouaghi, Pôle d'Ain El Beida. Algérie

Dédicace

A ma raison de réussite à mes parents

Roumaïssa

Remerciements

Je souhaite remercier en premier lieu mon directeur de thèse, **Mr. Souheil Mouetsi**, Professeur à l'Université d'Oum El Bouaghi et chef d'équipe de recherche « composants microélectroniques et systèmes optoélectroniques » au laboratoire d'électroniques et nouvelles technologies (LENT). Je lui suis également reconnaissante pour le temps conséquent qu'il m'a accordé, ses qualités pédagogiques et scientifiques, sa franchise et sa sympathie.

J'adresse de chaleureux remerciements à mon co-encadrant de thèse, **Mr. Lebbal Mohamed Redha**, Professeur à L'Université des Frères Mentouri, Constantine 1, pour son attention de tout instant sur mes travaux, pour ses conseils avisés et son écoute qui ont été prépondérants pour la bonne réussite de cette thèse. Je voudrais remercier le président de jury, **Mr. Mohamed Lashab**, Professeur à l'université d'Oum El Bouaghi et directeur de laboratoire de recherche d'Electronique et nouvelles technologies (LENT), pour l'intérêt qu'il a porté à mon travail.

J'associe à ces remerciements, **Mr. Mohamed Bouchemat**, Professeur à l'Université des Frères Mentouri, Constantine 1, **Mr. Skandar Aris** Maitre de conférences à l'Université des Frères Mentouri Constantine 1 et **Mr. Ait kaki Abdelaziz** maitre de conférences à l'Université d'Oum El Bouaghi, pour avoir accepté d'examiner mon travail.

J'adresse de sincères remerciements à **Mr. Abdesselam Hocini**, Professeur à l'Université de Mohamed Boudiaf, Msila, pour ses conseils, ses remarques, son ouverture d'esprit, sa franchise et sa gentillesse.

Je désire en outre remercier tous **les enseignants** et les **membres de l'administration** du pôle Universitaire de Ain Beida à Oum El Bouaghi pour leur sympathie, leur amitié. J'ai eu beaucoup de plaisir à travailler avec eux. Le cadre de travail était idéal.

Mes remerciements et mes reconnaissances sont aussi adressés à **mes collègues doctorants** et l'équipe du laboratoire de recherche d'Electronique et nouvelles technologies (LENT) que j'ai pu côtoyer durant toutes ces dernières années.

Enfin, j'adresse mes remerciements les plus sincères à mes chers **parents** pour leur patience, leurs encouragements et leur soutien, ainsi qu'à ma chère amie **Madjdoulinne Sarah Khelifi** et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

LISTE DES ACRONYMES

1D :	Unidimensionnels.
2D :	Bidimensionnels.
3D :	Tridimensionnels.
$\lambda :$	Longueur d'onde.
$\lambda_B :$	Longueur d'onde de Bragg.
$\lambda_0 :$	Longueur d'onde de résonance.
$\varepsilon :$	Permittivité diélectrique.
$\omega :$	Pulsation/fréquence normalisée.
a :	Période du cristal photonique.
BIP :	Bande Interdite Photonique (en anglais PBG).
c :	Vitesse de la lumière dans le vide.
CPh :	Cristaux Photoniques.
CIO :	Circuits Intégrés Optiques.
CW:	Continuous Wave
DOP:	Decomposition of Plane Waves
FDTD:	Finite-Difference Time-Domain method.
f :	Facteur de remplissage.
I :	l'intensité de la lumière.
n :	Indice de réfraction.
n_{eff} :	Indice effectif.
n₀ :	Indice de réfraction linéaire.
n₂ :	Coefficient non linéaire de Kerr.
PWE:	Plane Wave Expansion method.
Q :	Facteur de qualité.
r :	Rayon du cristal photonique.
TE :	Transverse Electric, polarisation TE.
TM :	Transverse Magnétique, polarisation TM.

LISTE DES FIGURES

Chapitre I : Généralité sur les cristaux photoniques

Figure I. 1 : Exemple de cristaux naturels : a) pierre opale, b) plume de paon et c) aile de papillon.....	4
Figure I. 2 : (a) Représentation schématique d'un miroir de Bragg, (b) Relation de dispersion d'un cristal photonique unidimensionnel (miroir de Bragg) à incidence normale.....	5
Figure I. 3 : Les différents types de cristaux photoniques : (1D), (2D), (3D).....	5
Figure I. 4 : Cristaux photoniques (1D), (2D) (3D).....	6
Figure I. 5 : Structure unidimensionnelle.....	5
Figure I. 6 : Structures bidimensionnelles : (a) connectée, (b) déconnectée.....	6
Figure I. 7 : (a) structure carrée, (b) structure triangulaire, (c) structure hexagonale.....	7
Figure I. 8 : (a) Représentation schématique de la Yablonovite, structure 3D de périodicité cfc. (b) Image MEB d'un CP3D « tas de bois » fabriqué par lithographie UV dans du silicium.....	8
Figure I. 9 : (a) structure tas de bois. (b) Diagramme de bande d'un BIP 3D.....	9
Figure I. 10 : Un cristal photonique unidimensionnel.....	10
Figure I. 11 : Défaut dans une structure périodique unidimensionnelle.....	12
Figure I. 12 : Défauts ponctuels : (a) Défaut lacunaire, (b) et (c) Défauts de substitutions.....	13
Figure I. 13 : Défaut de dimension du motif élémentaire.....	13
Figure I. 14 : Défaut de distance entre les motifs élémentaires.....	14
Figure I. 15 : Défaut de la permittivité relative des motifs élémentaires.....	14
Figure I. 16 : Défaut par vacuité.....	14
Figure I. 17 : Defaults dans une structure 3D d'un cristal photonique.....	15
Figure I. 18 : Guide d'onde linéaire à CPh 2D, (a)-Structure déconnectée formés de tiges diélectriques en l'air et (b)-Structure connectée formés de trous d'air piégés dans une matrice diélectrique.....	15
Figure I. 19 : Différents types de guide d'onde linéaire.....	16
Figure I. 20 : Guide d'onde 2D courbé : (a)- Guide à coude de 90° dans un réseau carré de tiges. (b) et (c)- Guides à coude de 120° dans un réseau triangulaire de tiges.....	17
Figure I. 21 : Un micro-résonateur 2D se compose de six guides d'ondes et six virages à 120°.....	17
Figure I. 22 : Résonateurs à cristaux photoniques ; (a) Un anneau quasi-carré, (b) Un anneau hexagonal, (c) Un anneau cercle.....	18
Figure I. 23 : Réponse spectrale d'un résonateur en anneau.....	19
Figure I. 24 : Guide à cristaux photoniques forme « Y ».....	19
Figure I. 25 : Guide à cristaux photoniques forme « T ».....	20
Figure I. 26 : a : Cavités rectangulaires, b : Cavités triangulaires, c : Cavités hexagonales.....	21
Figure I. 27 : Couplage Guide-Cavité d'un cristal photonique bidimensionnel.....	22

Chapitre II : Les portes logiques toutes-optiques

Figure II. 1: La structure « AND » proposée.....	34
Figure II. 1. 1 : a) propagation du signal dans la porte AND pour A=1 & B=1 , b) la transmission de sortie dans la porte AND pour A=1 & B=1.....	35
Figure II. 1. 2 : Transmission de sortie de la porte logique AND quand A=0, B=1 & A=1, B=0.....	36
Figure II. 1. 3 : Distribution de champ et transmission de sortie de la porte AND quand A = 1 et B = 1.....	37
Figure II. 2 : Diagramme de bande de la structure étudiée.....	38
Figure II.2.1: Structure schématique de la porte « OU » à deux entrées proposée.....	39
Figure II.2.2: Propagation du signal de la porte OU à deux entrées (a) A = 1, B = 0 et Y = 1, (b) A = 0, B = 1 et Y = 1 (c) A = 1, B = 1 et Y = 1.....	40
Figure II. 3 : Réseau triangulaire d'un CPh 2D composé des tiges de silicium dans l'air.....	41
Figure II. 3.1: La structure de la porte XOR utilisée.....	42
Figure II.3. 1 : Résultat obtenu dans le port de sortie quand l'entrée est (0 1).....	42
Figure II.3. 2 : Résultat obtenu dans le port de sortie quand l'entrée est (1 0).....	42
Figure II.3. 3 : Résultat obtenu dans le port de sortie quand l'entrée est (1 1).....	43
Figure II.3. 4 : La transmission dans la porte logique « XOR ».....	43
Figure II. 4 : La structure de la porte NOT proposée.....	45
Figure II.4.1 : Plage de niveau de transmission.....	45

Figure II.4.2 : Distribution du champ optique pour différents états pour la porte NOT proposée pour : (a) Biais = 1, Entrée = 0. (b) Biais = 1, Entrée = 1.	46
Figure II.4.3 : Courbe évolutive dans le temps de la porte « NOT » proposée pour : (a) Biais = 1, Entrée = 0. (b) Biais = 1, Entrée = 1.	46

Chapitre III : Outils de modélisation des structures à cristaux photoniques

Figure III. 1 : Les étapes de résolution de problèmes dans la méthode des éléments finis	53
Figure III. 2 : Réduction du domaine de calcul par la combinaison de la matrice de transfert et les conditions de Bloch-Floque.....	55
Figure III. 3 : Algorithme de la méthode FDTD.....	60
Figure III. 4 : La barre de menus du programme RSoft CAD	63
Figure III. 5 : La fenêtre de démarrage.....	64
Figure III. 6 : Nouvelle fenêtre pour réaliser un nouveau composant ou nouveau circuit.....	65
Figure III. 7 : (a) Arrang. de disposition de la rangée XZ, (b) Dispo. de rangée dans la fenêtre de CAD.	66
Figure III. 8 : Fenêtre des paramètres globaux du circuit.....	66
Figure III. 9 : L'éditeur du Tableau de symboles.....	67
Figure III. 10 : Profil d'indice de la structure à cristaux photoniques 2D.....	67
Figure III. 11 : La fenêtre de paramètres de simulation de BandSolve.	68
Figure III. 12 : La fenêtre de paramètres de simulation de FullWave.....	68
Figure III. 13 : Guide d'onde droit W1.	69
Figure III. 14 : Diagramme des bandes pour les modes TE et TM.....	70

Chapitre IV : Résultats et interprétations

Figure IV. 1 : (a) structure à réseau hexagonal. (b) la bande interdite en polarisation TM.	74
Figure IV. 2 : (a) : La structure de la cavité H1 pour un défaut de substitution, (b) : La transmission de la cavité H1 pour un défaut de substitution.....	76
Figure IV. 3 : Cavité pour $r = 0,5 * R$. (b) : la transmission de la cavité modifié.....	77
Figure IV. 4 : (a) : Cavité pour $r = 0,4 * R$. (b) : la transmission de la cavité modifié.....	77
Figure IV. 5 : (a) : la variation de la longueur d'onde en fonction du rayon de la cavité (b) la transmission d'une cavité en fonction du même paramètre.	78
Figure IV. 6 : (a) : la cavité avec un indice $n = 1.54$ $r = 0.4 * R$ (b) : Trans. de la cavité H ₁ modifiée.....	80
Figure IV. 7 : (a) : la cavité avec un indice $n = 1.63$ et $r = 0.5 * R$ (b) : Trans. de la cavité H ₁ modifiée.....	81
Figure IV. 8 : La variation de l'intensité en fonction de l'indice de réfraction	81
Figure IV. 9 : La jonction-Y proposée.....	82
Figure IV. 10 : La transmission dans le port de sortie (Port C) de la jonction-Y proposé.....	83
Figure IV. 11 : Propagation de l'onde dans la jonction-Y étudiée	84
Figure IV. 12 : La transmission dans les deux ports A et B de la jonction-Y.....	85
Figure IV. 13 : La structure de la jonction-Y optimisée	86
Figure IV. 14 : La transmission dans les deux ports A et B de la jonction-Y optimisée	87
Figure IV. 15 : La structure optimisée de la jonction- Y avec deux cavités	88
Figure IV. 16 : La transmission obtenue dans le port de sortie port C de la structure optimisée.	88
Figure IV. 17 : la porte logique optique « AND » proposée.....	89
Figure IV. 18 : La propagation de la lumière, (a) A=1, B=0 ;(b) A=0, B=1 and (c) A=1, B=1.....	91
Figure IV. 19 : La structure de la porte OR proposée.....	92
Figure IV. 20 : La bande interdite de la structure en mode TE	93
Figure IV.21 : Diagramme de trans. de puiss. pour la porte logique OR tout optique sans microcavités	94
Figure IV. 22 : Symbole de la porte logique « OR »	94
Figure IV. 23 : La distribution du champ optique de la porte logique « OR » pour (a) A= 1, B = 0 (c) A = 0, B = 1 ;(e) A = 1, B = 1; (b), (d), (f) : diagramme de transfert de puissance	95
Figure IV. 24 : Structure de base du diviseur optique proposé	97
Figure IV. 25 : La structure du diviseur optique sans cavités	97
Figure IV. 26 : La structure du diviseur optique avec deux cavités	98

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre II : Les portes logiques toutes-optiques

Tableau II. 1 : La table de vérité de la porte logique «AND».....	33
Tableau II. 2 : Résumé sur l'opération logique pour la porte AND	36
Tableau II. 3 : La table de vérité de la porte logique " OU "	37
Tableau II. 4 : La table de vérité de la porte logique « XOR ».....	40
Tableau II. 5 : La table de vérité de la porte logique NOT.....	44
Tableau II. 6 : La puissance optique en sortie pour la porte logique NOT tout optique.....	45

Chapitre IV : Résultats et interprétations

Tableau IV. 1 : La variation de la long. d'onde et de la trans.en fonction du rayon de trou au centre.	78
Tableau IV. 2 : La table de vérité de la porte « AND » avec les résultats obtenus	90

TABLE DES MATIERES

Dédicace.....	i
Remerciements	ii
Liste des acronymes.....	iii
Liste des figures.....	iv
Liste des tableaux	vi
Introduction generale	1
Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques.....	4
I. 1. Introduction :.....	4
I. 2. Définition :.....	6
I.2.1 Analogie Electron- photon.....	7
I. 3. Les types des cristaux photoniques :.....	4
I. 3. 2. 1. Domaines d'utilisation des cristaux photoniques bidimensionnels :.....	6
I. 3. 2. 2. Les familles des cristaux photoniques bidimensionnelles :.....	6
I. 4. Caractéristiques géométriques et physiques d'un cristal photonique :.....	9
I. 4. 1. Le contraste d'indice	9
I. 4. 2. La période a :.....	10
I. 4. 3. Le facteur de remplissage f :.....	10
I. 5. Le cristal avec défaut :.....	11
II. 5. 1. Les défauts ponctuels :.....	12
II. 5. 2. Les défauts étendus :.....	13
I. 6. Guides d'onde à cristaux photoniques.....	15
I. 6. 1. Autres formes des guides à cristaux photoniques :.....	17
I. 6. 1. 1. Micro-résonateurs :.....	17
I. 6. 1. 2. Guide d'onde forme Y :.....	19
I. 6. 1. 3. Guide d'onde forme « T » :.....	20
I. 7. Les cavités à cristaux photoniques	21
I. 8. Couplage guide-cavité :.....	22
I. 9. Conclusion :.....	23
I. 10. Reference du chapitre I :.....	24
Chapitre II : Les portes logiques toutes-optiques	28
II. 1. Introduction :.....	28
II. 2. Comparaison entre portes logiques électroniques et portes logiques tout-optiques :.....	29
II. 3. Application des portes logiques tout-optiques :.....	31
II. 4. Techniques et concepts des portes logiques tout optiques :.....	32
II. 5. 1. Porte AND "ET" :.....	33
II. 5. 2. Porte OR "OU" :.....	37
II. 5. 3. Porte XOR :.....	40
II. 5. 4. Porte NOT "NON" :.....	44
II. 5. Conclusion :.....	47
II. 6. Références du chapitre II.....	

Chapitre III : Outils de modélisation des structures à cristaux photoniques	52
III. 1. Introduction :	52
III. 2. Méthode des éléments finis (FEM) :	52
III. 3. Méthode de matrice de transfert (TMM) :	54
III. 4. Méthode de décomposition en ondes plane (PWM) :	56
III. 5. Méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD) :	58
III. 6. Présentation du logiciel RSoft CAD	61
III. 6. 1. Le simulateur « FullWave »	62
III. 6. 2. Le simulateur « BandSolve »	62
III. 6. 3. Fenêtre de programme de CAD.....	63
III. 6. 4. Exemple de création d'un nouveau circuit :	64
III. 6. 5. Structure d'un cristal photonique	65
III. 7. Conclusion :	71
III. 8. Références du chapitre III :	72
Chapitre IV : Résultats et interprétations	73
IV. 1. Introduction :	73
IV. 2. Conception d'une jonction-Y à base des cristaux photoniques pour application à des portes logiques optiques :	74
IV. 2. 1. Conception de la jonction-Y tout optique :	74
IV. 2. 2. Procédures et méthodes :	75
IV. 2. 3. Résultats de la simulation :	82
IV. 2. 3. 1. Etude de la transmission dans la jonction-Y :	83
IV. 2. 3. 2. Optimisation de la transmission dans la jonction-Y par couplage avec une seule cavité :	85
IV. 2. 3. 3. Optimisation de la transmission dans la jonction-Y par couplage avec deux cavités :	87
IV. 2. 4. Conception et simulation des portes logiques tout-optique AND/OR :	89
IV. 3. Autre application de la jonction-Y (Le diviseur optique) :	96
IV. 4. Conclusion :	99
IV. 5. Références du chapitre IV :	100
Conclusion générale.....	102
Résumé.....	104

INTRODUCTION GENERALE



INTRODUCTION GENERALE

L'avancement de la technologie dans le domaine des semi-conducteurs a permis de contrôler les propriétés conductrices de certains matériaux et parmi ces matériaux on a les cristaux photoniques (CPh) ou matériaux à bandes interdites photoniques (BIP) dont il existe trois types de cristaux photoniques : unidimensionnels, bidimensionnels et tridimensionnels. Ces substances sont de nouvelles découvertes dans la littérature scientifique et ont été nommées par analogie avec les structures électroniques et leur *bande interdite* d'énergie [1].

Les dispositifs optiques intégrés sont des composants optiques miniaturisés qui sont intégrés sur une seule puce de silicium ou d'autres matériaux semi-conducteurs. Ces dispositifs sont conçus pour manipuler, traiter et détecter la lumière en utilisant des principes optiques tels que la réflexion, la réfraction, la diffraction et l'interférence [2]. Ces dispositifs optiques intégrés comprennent des composants tels que des guides d'ondes optiques, des modulateurs optiques, des diviseurs de faisceaux, des réseaux de Bragg, des filtres optiques, des détecteurs optiques et des sources de lumière. Ces composants peuvent être utilisés pour transmettre des données à haute vitesse sur de longues distances avec une faible atténuation du signal et une grande bande passante, elles sont utilisées dans de nombreuses applications, notamment les télécommunications optiques, les capteurs optiques, la spectroscopie, l'imagerie médicale, la science des matériaux et la technologie de l'information quantique [3]. L'utilisation de la technologie des dispositifs optiques intégrés permet de miniaturiser et d'intégrer plusieurs fonctions optiques sur une seule puce, ce qui permet de réaliser des systèmes optiques plus compacts, plus rapides et plus efficaces, tout en réduisant les coûts de fabrication [4][5].

Les avantages des circuits intégrés optiques comprennent une faible consommation d'énergie, une grande capacité de traitement de l'information et une compatibilité avec les technologies de fabrication de semi-conducteurs existantes [6].

Les portes logiques tout optiques sont des dispositifs qui utilisent la lumière pour réaliser des opérations logiques dans les circuits optiques, sans avoir recours à des composants électroniques. Ces portes logiques sont souvent utilisées dans les systèmes optiques de traitement de l'information pour réaliser des fonctions de logique numérique à haute vitesse et à large bande passante.

Elles peuvent être réalisées en utilisant des composants optiques tels que des fibres optiques, des guides d'ondes optiques, des détecteurs optiques et des modulateurs optiques. Les opérations logiques sont effectuées en manipulant les propriétés de la lumière, telles que l'amplitude, la phase

et la polarisation [7]. Les portes logiques tout optiques sont utilisées dans diverses applications, telles que les réseaux optiques à haute vitesse, les systèmes de traitement optique du signal, les systèmes de traitement optique de l'image, les systèmes de traitement optique du son, et les systèmes de traitement optique de données. Les avantages des portes logiques tout optiques comprennent une vitesse de traitement élevée, une bande passante large, une faible consommation d'énergie et une immunité aux interférences électromagnétiques [8][9].

Dans cette thèse il y a quatre chapitres distincts. Le premier chapitre aborde les concepts fondamentaux des cristaux photoniques. Cette section présente la théorie des cristaux photoniques, explore l'analogie entre les électrons et les photons pour mieux comprendre l'origine de la bande interdite photonique. Les diagrammes de bandes, les cartes de bandes ainsi que la condition nécessaire pour l'ouverture d'une bande interdite photonique sont également expliqués.

Ensuite, le deuxième chapitre est consacré pour la présentation d'un état de l'art sur les portes logiques optiques qui comprend les avancées récentes dans la conception et la mise en œuvre de portes logiques tout optiques pour le traitement de l'information avec des exemples d'applications qui éclaircissent l'évolutions et les avancées dans la conception, la fabrication et l'optimisation des performances de ces composants optiques.

Dans le troisième chapitre, les techniques et les approches de modélisation des structures à cristaux photoniques sont présentées, notamment la méthode des ondes planes PWM qui permet de déterminer la bande interdite photonique, ainsi que la méthode des FDTD, couramment utilisée pour analyser et optimiser les composants optiques. Nous nous sommes concentrés sur une brève description de l'outil informatique disponible dans notre laboratoire de recherche, à savoir le logiciel RSoft CAD, qui utilise les deux méthodes de résolution PWM et FDTD.

Finalement, le quatrième chapitre est dédié aux résultats et simulations de la structure proposée en commençant par la conception et l'étude d'une structure à base des CPh et modifier ses propriétés pour améliorer ses performances en termes de vitesse, de fiabilité, de consommation d'énergie et de taille, puis on a couplé la structure étudiée avec des dispositifs à base des CPh comme les microcavités pour éliminer les pertes et améliorer sa transmission.

A la fin on a appliqué la structure optimisée dans des portes logiques toutes optiques dont on a prouvé que la structure étudiée peut vraiment réagir comme des portes logiques électroniques classique. Et nous avons terminé notre travail par une conclusion générale.

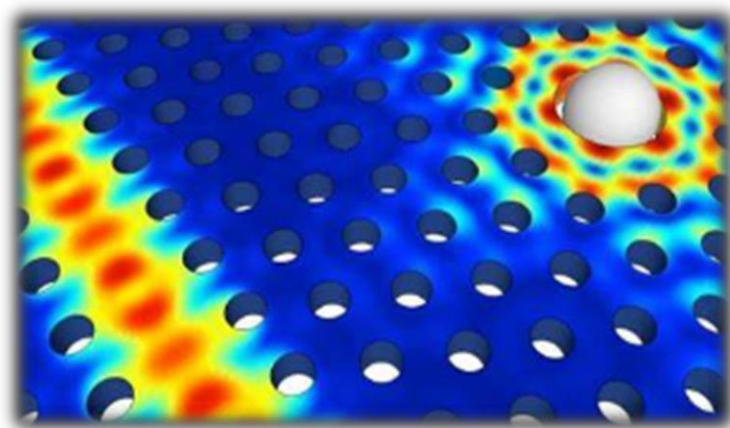
Références de l'introduction générale

- [1]. E. Yablonovitch, "Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics," *Phys. Rev. Lett.*, vol.58, p. 2059-2062, 1987.
- [2]. S. John, "Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices," *Phys. Rev. Lett.*, vol.58, p. 2486-2489, 1987
- [3]. Alduino and M. Paniccia, "Interconnects: Wiring electronics with light," *Nature Photonics*, vol. 1, pp. 153-155, 2007
- [4]. Li-Hsiang Wang, Su-Hua Yang, "Nano Photo Electric Material Structures-Photonic Crystals," *IEEE 2nd International Symposium on Next-Generation Electronics (ISNE)* – pp. 450-451, February 25-26, 2013, Kaohsiung, Taiwan.
- [5]. M. Pirzadi, A. Mir, D. Bodaghi, "Realization of Ultra-Accurate and Compact All Optical Photonic Crystal OR Logic Gate", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 28, pp. 2387–2390, 2016.
- [6]. Hussein, H. M. E., Ali, T. A., & Rafat, N. H, "A review on the techniques for building all-optical photonic crystal logic gates," *Optics & Laser Technology*, vol. 106, pp. 385–397, 2018.
- [7]. Delphine NEEL, « Etude en champ proche optique de guides à cristaux photoniques sur SOI », thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon ,2006.
- [8]. L. P. Caballero, M. L. Povinelli, J. C. Ramirez, P. S. Guimarães, and O. P. V. Neto, "Complementary photonic crystal integrated logic devices," *Optics Letters*, vol. 45, no.19, pp. 5502–5505, 2020
- [9]. S. Kumar and M. Sen, "Integrable all-optical not gate using nonlinear photonic crystal mzi for photonic integrated circuit," *JOSA B*, vol. 37, no. 2, pp. 359–369, 2020



Chapitre I

**Généralités sur les cristaux
photoniques**



Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques

I. 1. Introduction :

Avec le développement d'instruments pour l'observation et la mesure de petites structures, en particulier toutes sortes de microscopes électroniques, il a été constaté que les cristaux photoniques naturels sont disponibles dans la structure de nombreux matériaux naturels. Parmi ces matériaux naturels, les ailes de papillon, de nombreuses roches minérales, en particulier un groupe particulier appelé opale, moules, et de nombreuses créatures marines. La figure (I.1) montre un exemple de cristaux naturels dans lesquels la structure périodique est clairement reconnaissable [1].

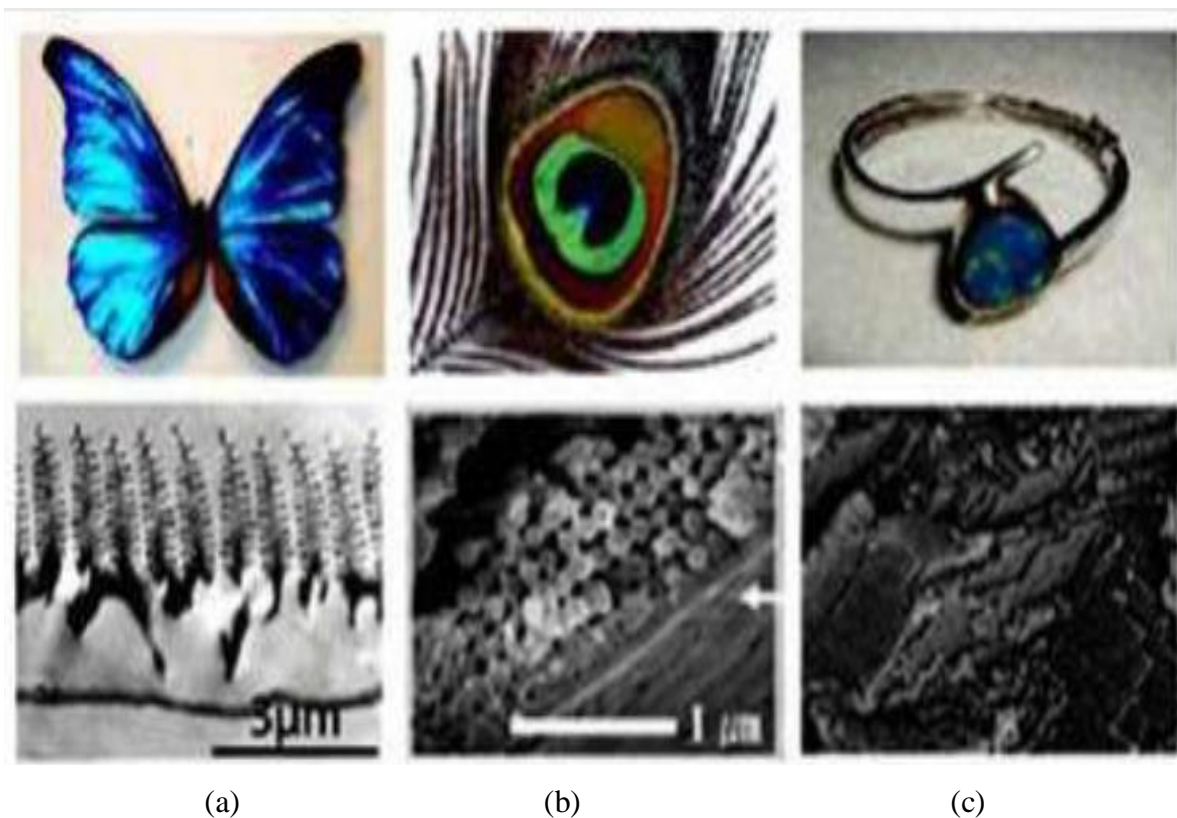


Figure I. 1 : Exemple de cristaux naturels : a) pierre opale, b) plume de paon et c) aile de papillon

Le BIP (en anglais PBG : Photonic Band Gap) est la Bande Interdite Photonique des matériaux composés d'un assemblage périodique de deux ou plusieurs matériaux diélectriques ou métalliques qui présentent des bandes de fréquence pour lesquelles la propagation des ondes électromagnétiques est interdite. La périodicité peut être unidimensionnelle (miroir de Bragg) (Figure (I.2)) [2], bidimensionnelle ou encore tridimensionnelle.

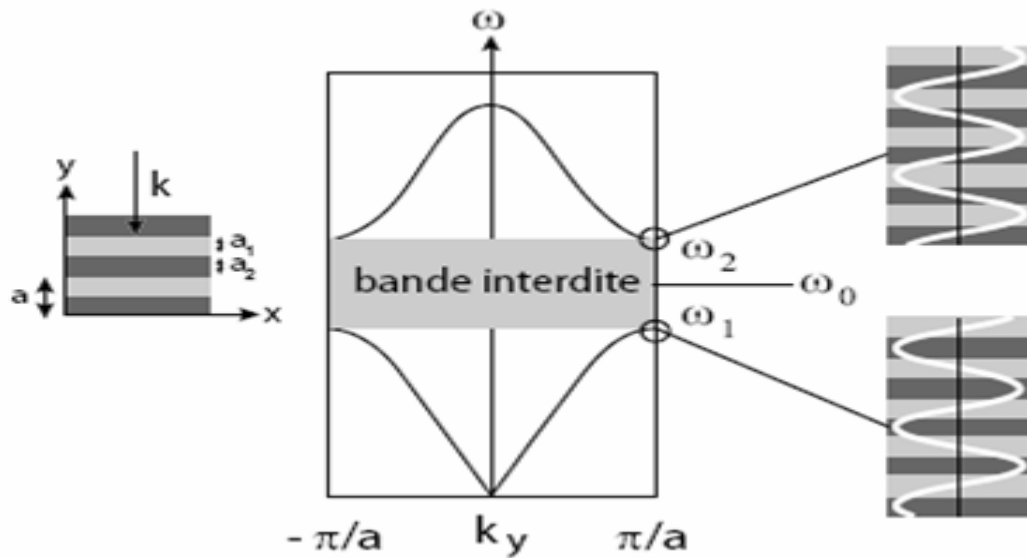


Figure I. 2 : (a) Représentation schématique d'un miroir de Bragg, (b) Relation de dispersion d'un cristal photonique unidimensionnel (miroir de Bragg) à incidence normale

Ces propriétés uniques ont conduit au développement de nombreuses applications, notamment dans les domaines de la photonique intégrée, de l'optique non linéaire et de la télécommunication.

La majorité des applications des cristaux photoniques repose sur leurs bandes interdites photoniques. La création de défauts dans les structures à cristaux photoniques est souvent une étape nécessaire pour obtenir des propriétés optiques désirées [3]. Les défauts peuvent être introduits intentionnellement ou se produire naturellement lors de la fabrication des cristaux photoniques, ces défauts dans une structure périodique peuvent servir à contrôler la propagation de la lumière, modifier les propriétés optiques de la structure, la création de sites actifs tels que les sites de dopage et l'élimination des pertes dans les structures périodiques [4]. Dans un guide à cristaux photoniques, les défauts peuvent être introduits pour créer des fonctions optiques avancées.

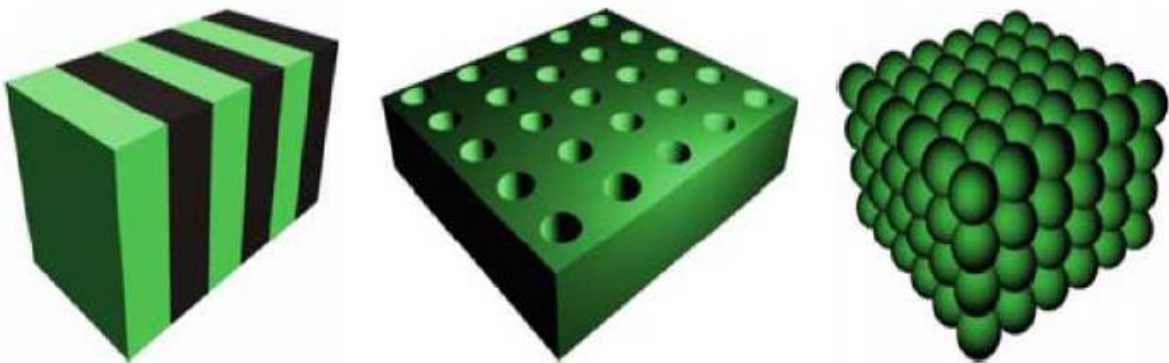


Figure I. 3 : Les différents types de cristaux photoniques : Unidimensionnels (1D), Bidimensionnels (2D), Tridimensionnels (3D)

I. 2. Définition :

Les cristaux photoniques sont des matériaux artificiels qui ont des propriétés optiques périodiques dues à leur structure en réseau. Ils sont conçus pour contrôler la propagation de la lumière à des longueurs d'onde spécifiques en exploitant les phénomènes de diffraction et d'interférence. Les cristaux photoniques peuvent être fabriqués à partir d'une variété de matériaux, tels que des polymères, des cristaux liquides ou des métaux, et sont utilisés dans de nombreux domaines de l'optique, tels que les technologies de communication optique, les capteurs optiques, les cellules solaires, les lasers et les affichages [5].

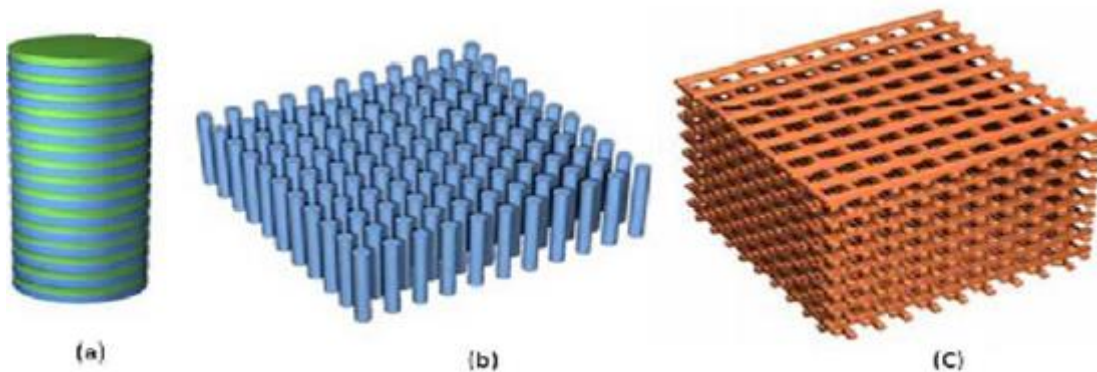


Figure I. 4 : Cristaux photoniques unidimensionnels (1D), bidimensionnels (2D) et tridimensionnels (3D)

La variation périodique de l'indice optique suivant les différentes directions entraîne l'apparition de gammes de fréquence pour laquelle la lumière ne peut alors plus se propager (Bande interdite photonique), cette dernière est une gamme d'énergies interdites pour les ondes électromagnétiques (comme la lumière) qui tentent de se propager à travers le matériau. Cette gamme d'énergies est généralement située entre les bandes permises, où la propagation de la lumière est autorisée.

La largeur de la bande interdite est importante pour les applications des cristaux photoniques car elle détermine les longueurs d'onde de la lumière qui peuvent être réfléchies ou transmises par le matériau. Les cristaux photoniques avec de larges bandes interdites sont utiles pour la fabrication de miroirs optiques hautement réfléchissants et de filtres optiques sélectifs. Les cristaux photoniques avec des bandes interdites étroites sont utiles pour la fabrication de guides d'ondes optiques à faible perte et d'autres dispositifs optiques à haute efficacité [6].

I.2.1 Analogie Electron- photon :

La similitude entre les équations de propagation de l'électromagnétisme et l'équation fondamentale de la mécanique quantique, peut être utilisée pour expliquer les différentes propriétés optiques des matériaux, en particulier les cristaux photoniques bidimensionnels qui sont d'intérêt. Cette similitude entre l'électron et le photon peut être expliquée de manière simple en établissant un lien entre les équations de Maxwell qui décrivent les ondes électromagnétiques et l'équation de Schrödinger qui est utilisée pour traiter les fonctions d'onde électronique.

$$\nabla^2 \psi(\mathbf{r}) = (-2m/\hbar^2) (E - U(\mathbf{r})) \psi(\mathbf{r}) \quad (\text{I.1})$$

Où U est l'énergie de l'électron, m sa masse :

En régime linéaire l'équation de propagation d'une onde électromagnétique monochromatique dans un matériau $\epsilon(\mathbf{r})$ était :

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r})) = (\omega^2/c^2) \epsilon(\mathbf{r}) \mathbf{E}(\mathbf{r}) \quad (\text{I.2})$$

L'équation (I.2) spécifie les valeurs énergétiques possibles pour un électron se propageant librement dans un potentiel, ainsi que les fonctions d'onde associées. D'autre part, l'équation I.15 définit les fréquences possibles d'une onde se propageant dans le matériau en l'absence d'excitation extérieure, ainsi que les amplitudes des champs associés. Les valeurs propres sont représentées par l'énergie E de l'électron et la fréquence ω de l'onde électromagnétique. Cette similitude entre les deux systèmes entraîne des propriétés analogues pour eux

I. 3. Les types des cristaux photoniques :

I. 3. 1. Les cristaux photoniques unidimensionnels :

Les cristaux photoniques unidimensionnels sont des structures périodiques qui modulent la propagation de la lumière dans une seule direction. Ils sont constitués d'une série de couches alternées de matériaux avec des indices de réfraction différents, ce qui crée une bande interdite dans laquelle les photons ne peuvent pas se propager.

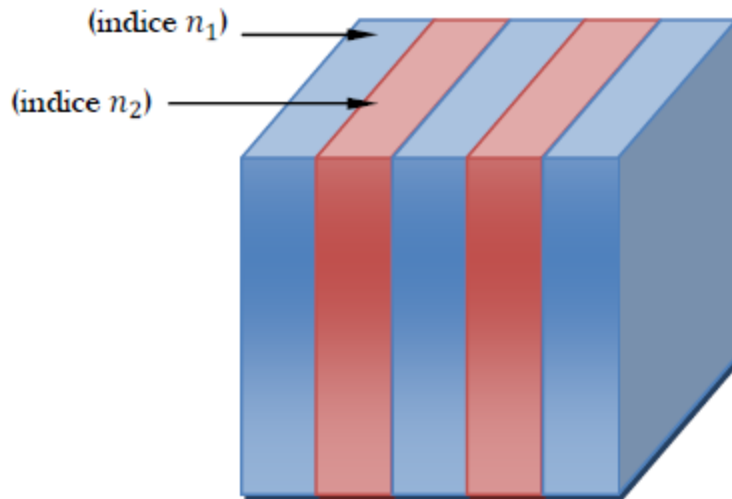


Figure I. 5 : Structure unidimensionnelle

Ces cristaux photoniques unidimensionnels ont des propriétés optiques intéressantes, notamment des modes de résonance qui peuvent être utilisés pour la détection de gaz, la spectroscopie, l'imagerie médicale et d'autres applications. Ils peuvent également être utilisés pour créer des guides d'ondes optiques et des filtres optiques.

Les cristaux photoniques unidimensionnels peuvent être fabriqués à partir de différents matériaux, tels que le silicium, le germanium, le gallium arsénite, le nitrure de silicium et d'autres matériaux. Les méthodes de fabrication comprennent la lithographie, la gravure ionique réactive et d'autres techniques de micro-fabrication [7].

I. 3. 2. Les cristaux photoniques bidimensionnels :

Les cristaux photoniques bidimensionnels (2D) sont des structures périodiques qui sont utilisées pour contrôler la propagation de la lumière dans un plan bidimensionnel. Ils sont composés de deux couches périodiques, généralement de tailles différentes, qui sont empilées l'une sur l'autre. Les cristaux photoniques bidimensionnels présentent des propriétés optiques intéressantes, telles que la création de bandes interdites fortes et étroites, la localisation de la lumière à des échelles nanométriques, la modification des propriétés de polarisation de la lumière et la création d'effets optiques non linéaires.

Il existe deux types de structures des cristaux photoniques 2D structure déconnectée et structure connectée.

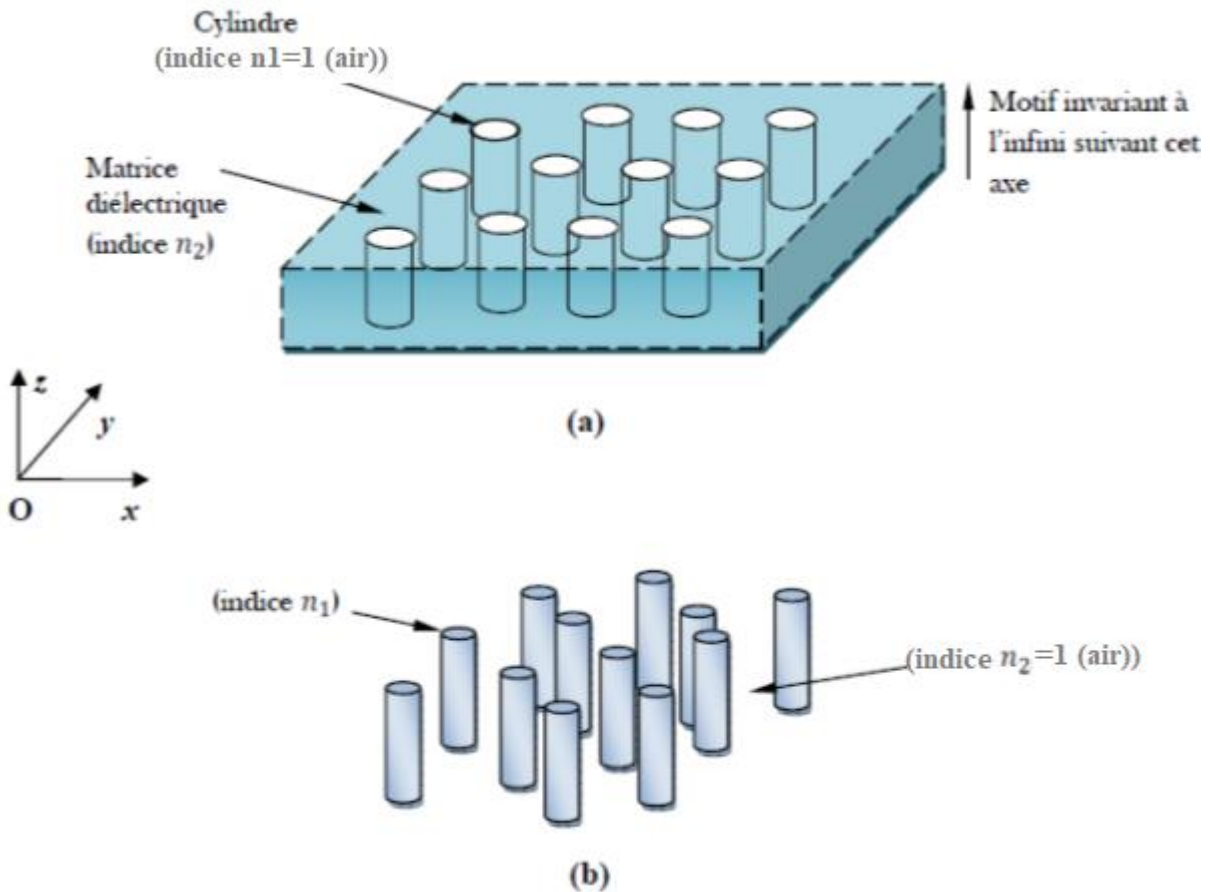


Figure I. 6 : Structures bidimensionnelles : (a) connectée, (b) déconnectée

I. 3. 2. 1. Domaines d'utilisation des cristaux photoniques bidimensionnels :

Les cristaux photoniques bidimensionnels sont utilisés dans de nombreuses applications optiques, telles que la fabrication de dispositifs optiques pour la communication optique, la création de détecteurs optiques sensibles, la fabrication de cellules solaires efficaces et la création de guides d'ondes optiques pour la manipulation de la lumière à l'échelle nanométrique. En raison de leur structure bidimensionnelle, les cristaux photoniques 2D sont également plus faciles à fabriquer que les cristaux photoniques tridimensionnels, ce qui les rend intéressants pour les applications commerciales.

I. 3. 2. 2. Les familles des cristaux photoniques bidimensionnelles :

Les structures 2D sont des cristaux dont la permittivité diélectrique est périodique dans les deux dimensions et reste invariante dans la troisième dimension. Elles possèdent plusieurs types mais les plus utilisées se regroupent principalement suivant trois familles :

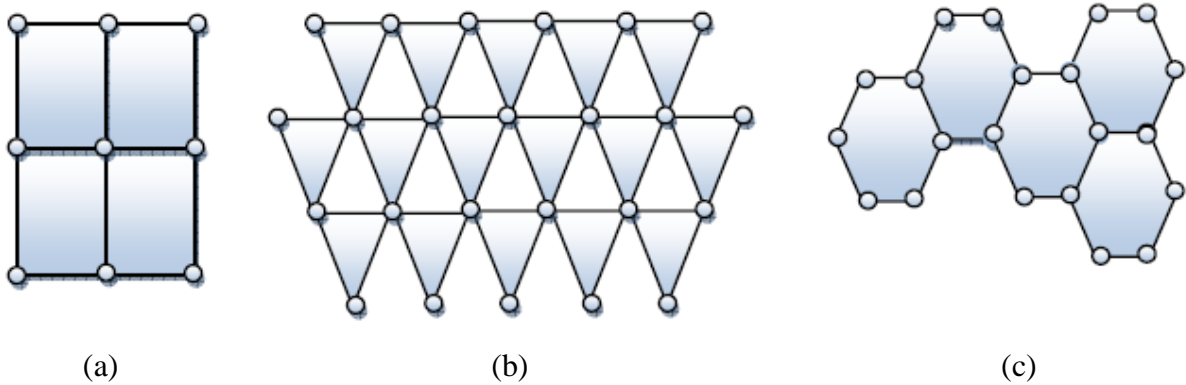


Figure I. 7 : (a) structure carrée, (b) structure triangulaire, (c) structure hexagonale.

Chacun de ces types ayant des propriétés optiques spécifiques :

- **Les cristaux photoniques hexagonaux :** Ce type de cristal photonique est basé sur une structure périodique hexagonale de sphères ou de cylindres. Les cristaux photoniques hexagonaux ont des propriétés optiques intéressantes, telles que des bandes interdites larges et des modes de résonance à haute énergie.
- **Les cristaux photoniques carrés :** Ce type de cristal photonique est basé sur une structure périodique carrée de sphères ou de cylindres. Les cristaux photoniques carrés ont des propriétés optiques similaires aux cristaux photoniques hexagonaux, mais avec des bandes interdites plus étroites.
- **Les cristaux photoniques en nid d'abeille :** Ce type de cristal photonique est basé sur une structure périodique de cellules hexagonales remplies de matériaux diélectriques. Les cristaux photoniques en nid d'abeille ont des propriétés optiques intéressantes, telles que des bandes interdites larges et des modes de résonance à faible énergie.
- **Les cristaux photoniques clonaux :** Ce type de cristal photonique est basé sur une structure périodique de colonnes cylindriques. Les cristaux photoniques clonaux ont des propriétés optiques intéressantes, telles que des bandes interdites larges et des modes de résonance à haute énergie.
- **Les cristaux photoniques de type inverse :** Ce type de cristal photonique est basé sur une structure périodique de trous dans un matériau diélectrique. Les cristaux photoniques de type inverse ont des propriétés optiques intéressantes, telles que des bandes interdites larges et des modes de résonance à haute énergie.

I. 3. 3. Les cristaux photoniques tridimensionnels :

Les cristaux photoniques tridimensionnels sont des structures périodiques qui modulent la propagation de la lumière dans les trois directions de l'espace. Ils sont constitués d'une série de couches alternées de matériaux avec des indices de réfraction différents, créant ainsi des bandes interdites dans les trois directions.

Ces CPh tridimensionnels ont des propriétés optiques remarquables, notamment la présence de bandes interdites larges et la capacité à confiner la lumière dans l'espace tridimensionnel. Ils sont utilisés dans de nombreuses applications optiques et photoniques, notamment dans les lasers, les cellules solaires, les capteurs optiques et les guides d'ondes optiques [8].

L'utilisation de cristaux photoniques tridimensionnels est nécessaire pour obtenir une bande interdite omnidirectionnelle.

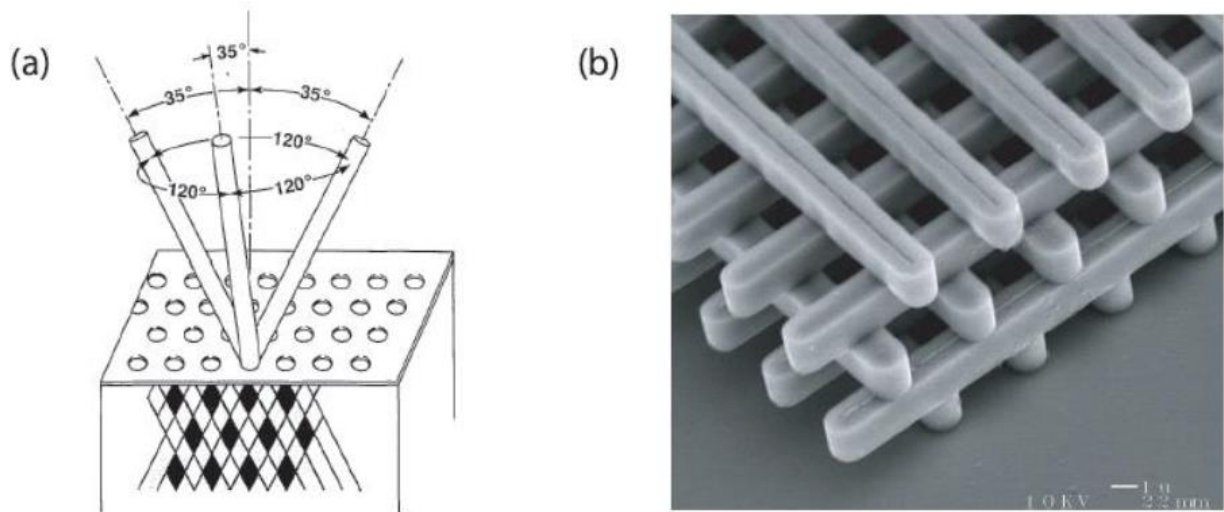


Figure I. 8 : (a) Représentation schématique de la Yablonovite, structure 3D de périodicité cfc. (b) Image MEB d'un CP3D « tas de bois » fabriqué par lithographie UV dans du silicium

Il existe également différents types de cristaux photoniques tridimensionnels, tels que les cristaux photoniques à réseau de diamant, les cristaux photoniques à réseau de bismuth et les cristaux photoniques à réseau de bois. Chaque type de cristal photonique tridimensionnel a des propriétés optiques spécifiques et des applications potentielles dans l'optique et la photonique [9].

La structure périodique des Tas de bois à base des cristaux photoniques tridimensionnels est réalisée en déposant par couches successives des rubans de silicium polycristallin dans des tranches de silice, elle se fait plan sur plan. Après avoir construit la structure, la silice est retirée pour obtenir un cristal photonique tridimensionnel Si/Air dont le contraste d'indice est suffisant pour ouvrir une bande d'énergie interdite omnidirectionnelle [10].

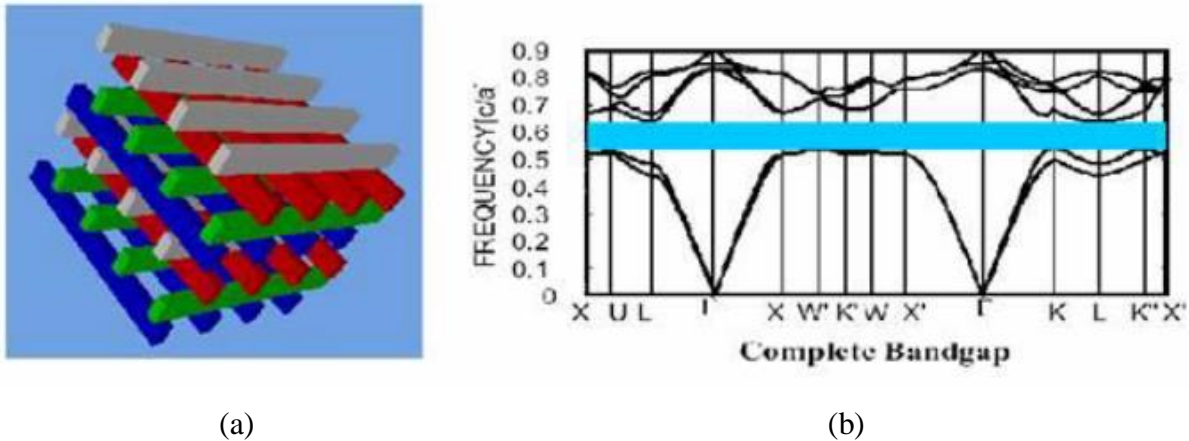


Figure I. 9 : (a) structure tas de bois. (b) Diagramme de bande d'un BIP 3D

La lumière qui pénètre dans ces canaux est guidée le long des ponts transversaux, ce qui crée des bandes interdites dans les directions de propagation.

Les cristaux photoniques à réseau de bois sont intéressants pour leur grande périodicité, leur taille de pores variable, leur homogénéité, leur grande surface spécifique et leur structure modulable. Ils ont des propriétés optiques remarquables telles que des bandes interdites larges et la capacité de confiner la lumière dans l'espace tridimensionnel. Ils sont également biodégradables et non toxiques, ce qui les rend utiles dans des applications biologiques telles que la biologie cellulaire et la médecine

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

Les cristaux photoniques sont caractérisés par les différents matériaux qui les composent : le système cristallin selon lequel ces matériaux sont organisés et les volumes relatifs qu'ils occupent dans la cellule élémentaire du cristal [11].

I. 4. 1. Le contraste d'indice

Le contraste d'indice dans un cristal photonique bidimensionnel est une mesure de la différence de l'indice de réfraction entre les deux couches périodiques qui composent la structure. L'indice de réfraction est une mesure de la vitesse de la lumière dans un matériau donné, et il est souvent utilisé pour décrire la manière dont la lumière se propage dans les matériaux optiques [12] :

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_{substrat} - \varepsilon_{trou} \quad (I.3)$$

$\varepsilon_{substrat}$: permittivité du matériau de haut indice.

ε_{trou} : permittivité du matériau de bas indice.

I. 4. 2. La période a :

Pour un cristal photonique unidimensionnel, la période a est :

$$a = a_1 + a_2 \quad (\text{I.4})$$

a_1 : l'épaisseur de la couche de permittivité ϵ_1

a_2 : l'épaisseur de la couche de permittivité ϵ_2 (figure I. 9).

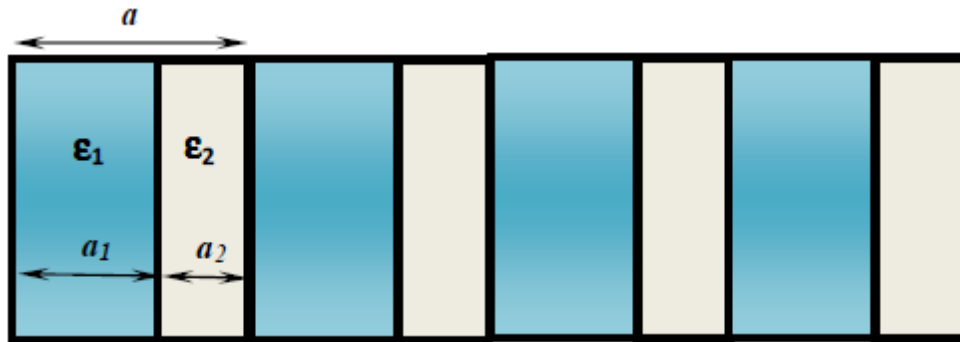


Figure I. 10 : Un cristal photonique unidimensionnel

Dans les cristaux photoniques bidimensionnels, le contraste d'indice est une propriété importante qui détermine la largeur de la bande interdite, c'est-à-dire la gamme d'énergies où la propagation de la lumière est interdite. Un contraste d'indice élevé est généralement associé à une bande interdite large et forte, ce qui signifie que la lumière ne peut pas se propager à travers la structure à certaines longueurs d'onde.

Le contraste d'indice est influencé par de nombreux facteurs, tels que la composition chimique des matériaux utilisés pour la structure, la taille et la forme des nanostructures qui composent la structure, et les méthodes de fabrication utilisées pour créer la structure. En général, les cristaux photoniques bidimensionnels avec un contraste d'indice plus élevé sont plus difficiles à fabriquer, mais ils peuvent offrir des propriétés optiques plus avancées et des performances supérieures dans des applications spécifiques [13].

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

Le facteur de remplissage dans un cristal photonique est une mesure de la proportion de l'espace occupé par le matériau qui compose la structure. Dans un cristal photonique, la structure périodique est généralement composée de deux matériaux différents : un matériau de base et un matériau qui remplit certains espaces de la structure.

Le facteur de remplissage est important car il détermine la quantité de matériau nécessaire pour créer la structure périodique. Un facteur de remplissage élevé signifie qu'une plus grande quantité de matériau est nécessaire pour remplir les espaces de la structure, ce qui peut avoir un impact sur le coût de production et les propriétés optiques de la structure.

Un facteur de remplissage faible peut également avoir un impact sur les propriétés optiques de la structure, notamment en affectant la largeur de la bande interdite [14].

$$f = N \frac{A_{tige}}{A_{maille_élémentaire}} \quad (I.5)$$

Pour le réseau unidimensionnel, le facteur de remplissage est le rapport entre l'épaisseur de la couche diélectrique de haut indice et la période du réseau.

$$f = \frac{e_H}{e_H + e_L} \quad (I.6)$$

En général, quand le facteur de remplissage est élevé, la différence d'indice de réfraction entre les régions occupées par le matériau et les régions vides est grande, ce qui conduit à des effets plus importants sur la propagation de la lumière. Ce type est très difficile à fabriquer [15].

Cependant, il convient de noter que le facteur de remplissage ne doit pas être confondu avec la densité de matériau dans un cristal photonique. Même si le facteur de remplissage est faible, il est possible que le matériau occupe une grande partie de l'espace dans le cristal photonique en raison de la taille des atomes ou des molécules. Par conséquent, il est important de considérer à la fois le facteur de remplissage et la densité de matériau lors de la conception de cristaux photoniques pour des applications optiques spécifiques [15].

I. 5. Le cristal avec défaut :

Les défauts dans un cristal photonique peuvent avoir un impact important sur ses propriétés optiques et peuvent être classés en deux catégories principales : les défauts ponctuels et les défauts linéaires [16].

Les défauts dans la périodicité des cristaux photoniques sont inévitables, et leur impact dépend de la taille, de la forme, de la nature et de l'emplacement du défaut. Il est important de comprendre comment les défauts affectent les propriétés optiques de la structure pour pouvoir les utiliser de manière efficace ou les éviter si nécessaire [17].

Un défaut dans la périodicité peut créer des niveaux d'énergie dans la bande interdite, qui peuvent permettre la propagation de la lumière à des longueurs d'onde spécifiques. Ces niveaux d'énergie sont généralement appelés états de défaut, et ils sont souvent associés à une modification des propriétés de propagation de la lumière dans la structure. Parmi ces défauts on trouve [18] :

- Un défaut diélectrique : ajouter du matériau diélectrique en plus.
- Un défaut d'air (de point) : supprimer du matériau diélectrique.
- Les défauts étendus : sont obtenus en modifiant les cylindres ou les trous sur plusieurs sites voisins.
- Défaut de cavité (ponctuel) : collecter de l'énergie dans des micro-résonateurs.
- Défaut guide d'ondes (linéaire) : le guider dans Guides d'ondes.
- L'omission localisée de trous, grâce à laquelle on peut obtenir des microcavités résonnantes.
- L'omission d'une ou plusieurs rangées de trous. Le défaut jouera alors le rôle de guide d'onde.

II. 4. 1. Les défauts ponctuels :

Les défauts ponctuels sont des défauts localisés qui peuvent affecter l'indice de réfraction local du matériau. Les exemples de défauts ponctuels incluent les lacunes d'atomes, les atomes interstitiels et les impuretés. Ces défauts peuvent modifier la dispersion de l'indice de réfraction dans leur voisinage immédiat, créant ainsi des niveaux d'énergie discrets dans la bande interdite du cristal photonique. Ces niveaux d'énergie discrets peuvent perturber la propagation de la lumière à travers le cristal photonique, en modifiant la réflexion, la transmission et la diffusion de la lumière. Dans un cristal photonique unidimensionnel 1D le fait de rompre la périodicité de la structure ou d'introduire un défaut on peut confiner la lumière dans un plan défaut [19].

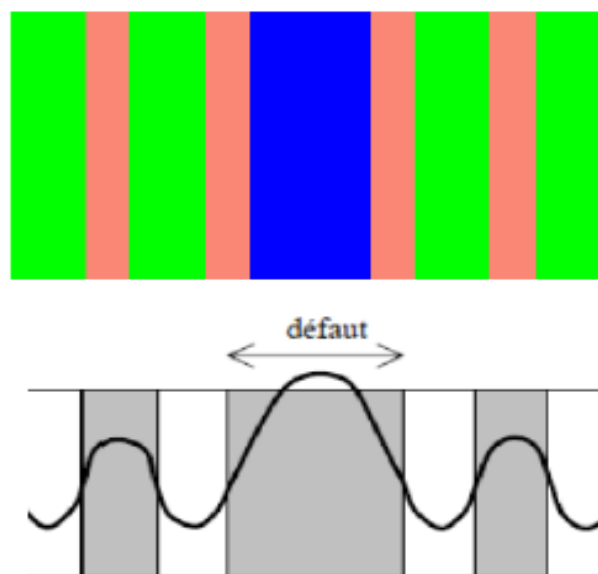


Figure I. 11 : Défaut dans une structure périodique unidimensionnelle

Il existe multiples manières de créer des défauts ponctuels dans les cristaux photoniques comme le montre la figure suivante :

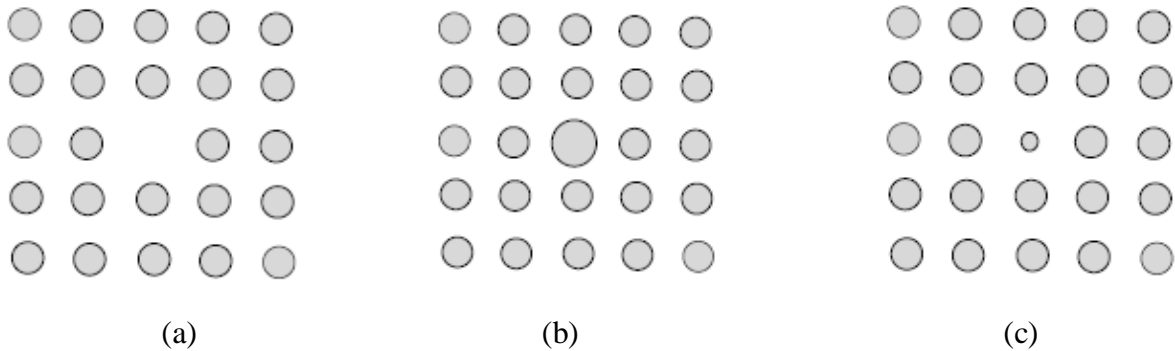


Figure I. 12 : Défauts ponctuels : (a) Défaut lacunaire, (b) et (c) Défauts de substitutions.

II. 4. 2. Les défauts étendus :

Les défauts linéaires sont des défauts qui sont étendus dans une direction particulière du cristal photonique. Les exemples de défauts linéaires incluent les dislocations, les joints de grain et les fissures. Ces défauts peuvent perturber la régularité de la structure périodique du cristal photonique, créant ainsi des états de modes locaux de la lumière dans la bande interdite. Ces états de modes locaux peuvent affecter la propagation de la lumière dans le cristal photonique, en perturbant la diffusion, la transmission et la réflexion de la lumière.

Dans des cristaux 2D on peut localiser la lumière dans un défaut linéaire en modifiant les dimensions des motifs élémentaires ou bien la distance entre ses motifs élémentaires ou par l'élimination de certains motifs élémentaires [20].

a) Dimensions des motifs élémentaires :

On peut modifier la taille du motif élémentaire qui compose le cristal photonique pour changer la périodicité de la structure BIP.

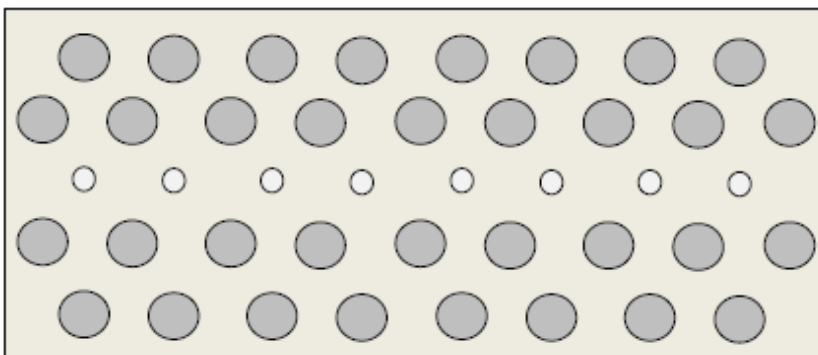


Figure I. 13 : Défaut de dimension du motif élémentaire

b) Distance entre les motifs élémentaires :

On peut aussi modifier l'espace qui existe entre les motifs élémentaires des réseaux cristallins

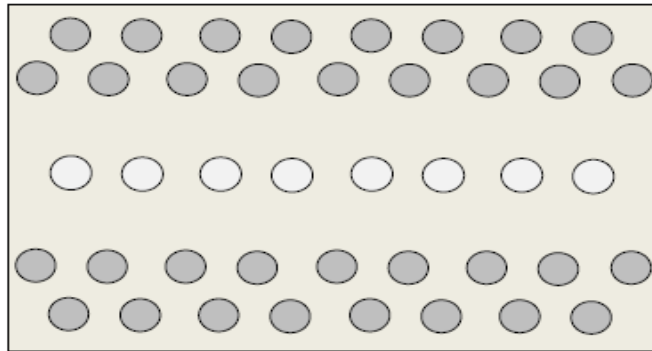


Figure I. 14 : Défaut de distance entre les motifs élémentaires

c) Valeur de la permittivité relative des motifs élémentaires :

Il est possible de modifier localement la nature du matériau et plus concrètement en agissant sur la valeur de la permittivité relative.

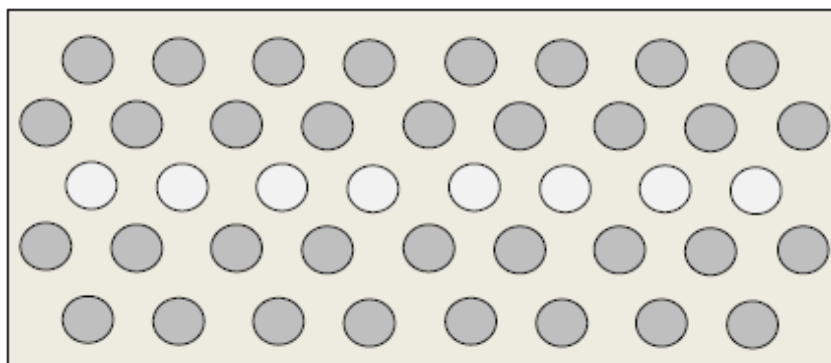


Figure I. 15 : Défaut de la permittivité relative des motifs élémentaires

d) Défaut par vacuité :

Le défaut par vacuité correspond à l'élimination de motifs élémentaires qui se trouvent remplacés par la permittivité du substrat

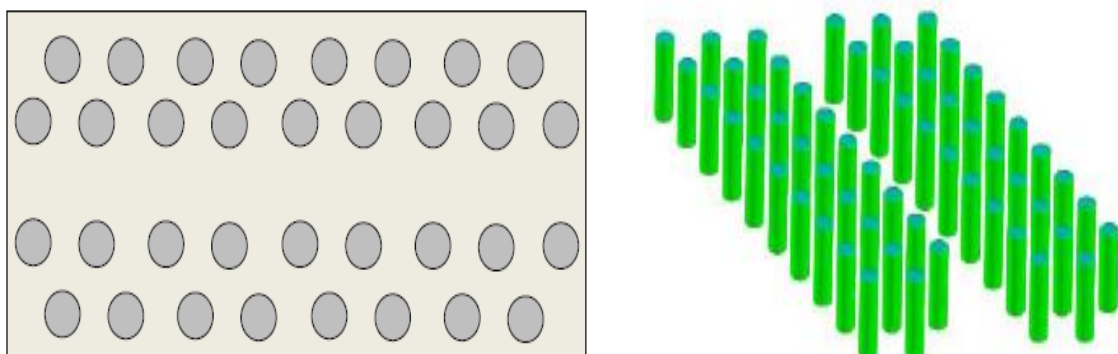


Figure I. 16 : Défaut par vacuité

Pour les cristaux photoniques tridimensionnels on peut piéger la lumière dans un seul point du cristal « cage de photon » ou l'énergie se collecte dans des micros résonateurs (Défaut de cavité) ou guider dans guides d'ondes (Défaut de Guide d'ondes) [21].

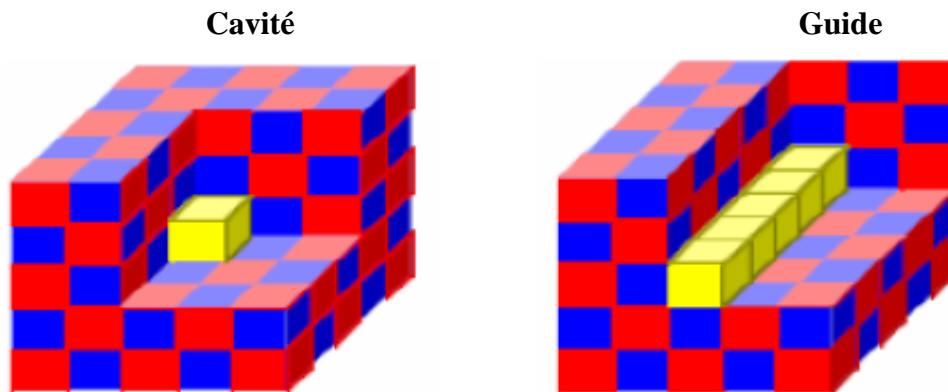


Figure I. 17 : Defaults dans une structure 3D d'un cristal photonique

I. 6. Guides d'onde à cristaux photoniques

Les guides d'ondes à cristal photonique sont des structures optiques qui utilisent les propriétés des cristaux photoniques pour contrôler la propagation de la lumière le long d'une direction spécifique. En général, les guides d'ondes à cristal photonique sont constitués d'une couche périodique de nanostructures qui créent une bande interdite pour la propagation de la lumière dans certaines directions [22]. Ces guides présentent plusieurs avantages tels que : le confinement fort de la lumière, un faible rayon de courbure, des ondes lentes ou une forte dispersion chromatique et beaucoup d'autres avantages qui facilite les réalisations des dispositifs dans les circuits intégrés et les dispositifs de la télécommunication.

Dans un cristal photonique bidimensionnel les guides sont nécessaires pour le confinement de la lumière dans le plan de la périodicité en piégeant celle-ci dans le défaut linéique dont le guidage est assuré par réflexion totale interne [23].

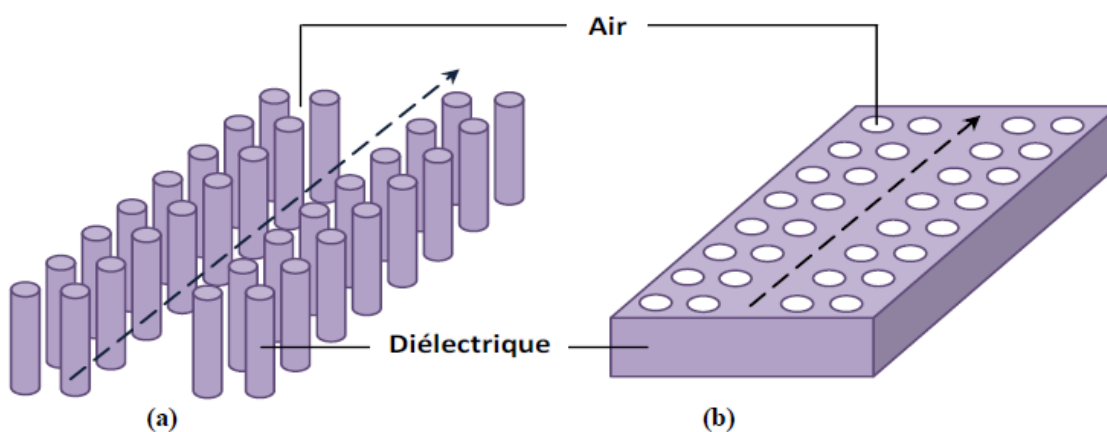


Figure I. 18 : Guide d'onde linéaire à CPh 2D, (a)-Structure déconnectée formée de tiges diélectriques en l'air et (b)-Structure connectée formée de trous d'air piégés dans une matrice diélectrique

L'intérêt des guides d'ondes à cristaux photoniques par rapport aux guides d'ondes classiques à base de matériaux diélectriques c'est qu'ils présentent [24] :

- Une fonction de guidage optique plus robuste comparée aux guides d'ondes conventionnel, car les lignes d'interconnexion occupent la majeure partie de la surface d'un circuit en silicium ; leur densification intervient au même titre que la réduction de la taille des composants dans l'accroissement des performances du circuit.
- Une application emblématique des guides relevant du phénomène dit d'onde lente
- Des pertes par diffraction hors du plan de propagation moins importantes
- Une facilité d'effectuer un grand nombre de guides en parallèle ou en série vu que les motifs du cristal se répètent à l'identique de façon périodique
- Des parois du guide à base des cristaux photoniques se comportent comme des parois parfaitement réfléchissantes

La figure ci-dessous représente les différentes sortes de géométries de guides optiques. Si la variation d'indice de réfraction en fonction de la profondeur est abrupte, on parle de guides à saut d'indice, si elle varie graduellement avec la profondeur ce sont des guides à gradient d'indice [25].

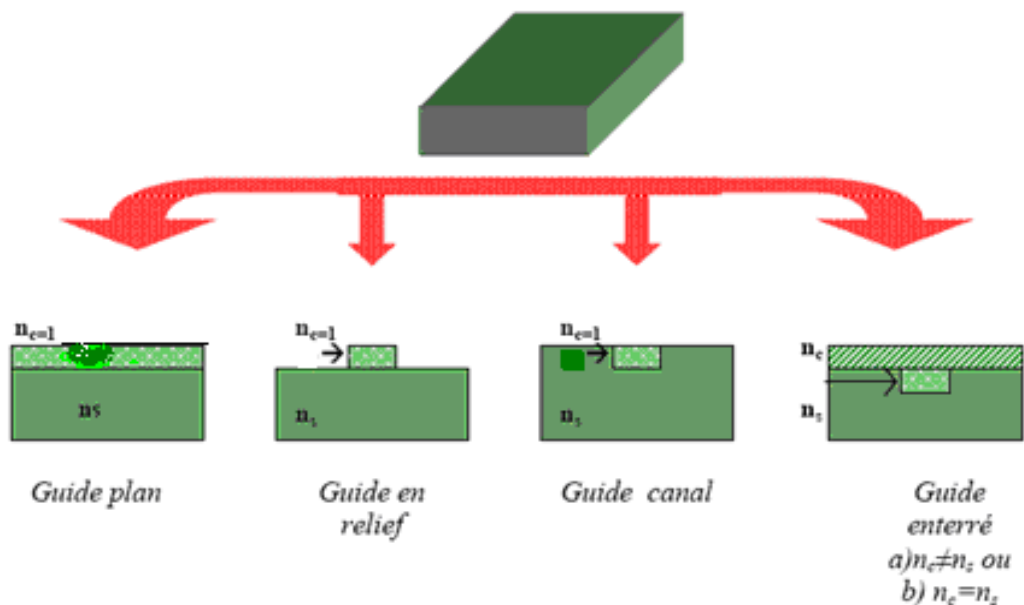


Figure I. 19 : Différents types de guide d'onde linéaire

Les guides d'ondes à cristal photonique à fort contraste d'indice sont souvent fabriqués à partir de matériaux inorganiques, tels que le silicium, le germanium, ou des semi-conducteurs III-V, qui présentent des contrastes d'indice élevés. Les nanostructures périodiques sont créées dans ces matériaux à l'aide de techniques de lithographie avancées, telles que la lithographie par faisceau d'électrons ou la gravure ionique réactive [26].

Contrairement aux guides d'ondes courbes conventionnels, les guides d'ondes courbes à cristal photonique tirent parti des propriétés de la bande interdite pour guider la lumière de manière efficace. Ils sont réalisés en supprimant des tiges ou des trous dans des directions de symétrie du cristal [27]. La courbure du guide d'onde est importante car elle permet de réaliser des fonctions optiques avancées, telles que la réfraction de la lumière ou la formation de faisceaux. La courbure peut être contrôlée de différentes manières, par exemple en modifiant la périodicité de la structure ou en utilisant des techniques de gravure sélective pour retirer une partie de la structure.

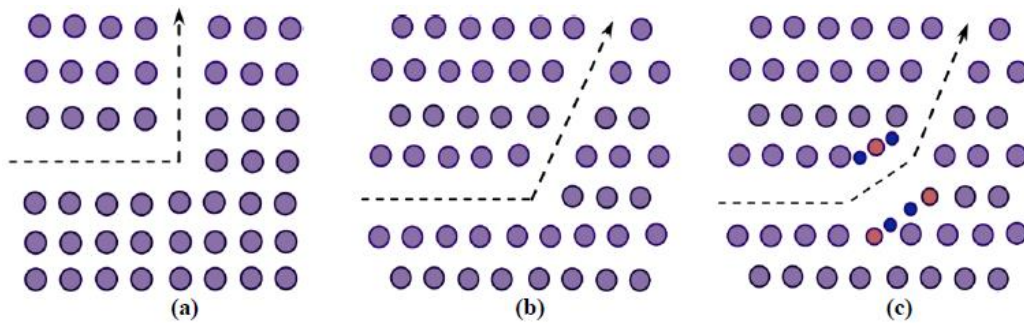


Figure I. 20 : Guide d'onde 2D courbé : (a)- Guide à coude de 90° dans un réseau carré de tiges. (b) et (c)- Guides à coude de 120° dans un réseau triangulaire de tiges.

I. 6. 1. Autres formes des guides à cristaux photoniques :

I. 6. 1. 1. Micro-résonateurs :

Les micro-résonateurs à cristal photonique sont des structures optiques qui combinent les propriétés de confinement de la lumière des micro-résonateurs avec les avantages des cristaux photoniques [28]. Tels que la bande interdite et le contrôle précis de l'indice de réfraction.

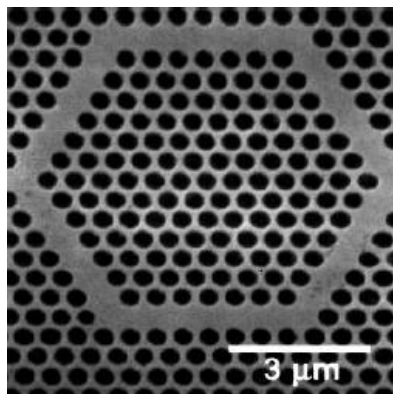


Figure I. 21 : Un micro-résonateur 2D se compose de six guides d'ondes et six virages à 120°

Les micro-résonateurs à cristal photonique peuvent prendre différentes formes, telles que des microdisques, des microsphères, des microtubes ou des microcavités. La géométrie et les propriétés optiques de ces structures peuvent être ajustées pour répondre aux besoins de différentes applications, notamment en optique intégrée, en communications optiques, en capteurs optiques et en métrologie.

Il existe plusieurs types de résonateurs à cristal photonique, chacun ayant des propriétés et des applications uniques. Voici quelques exemples :

- **Résonateurs à anneaux** : Ce type de résonateur se compose d'un anneau de cristal photonique qui permet à la lumière de circuler autour de l'anneau en créant une résonance optique. Les résonateurs à anneaux sont souvent utilisés dans les filtres optiques, les modulateurs optiques et les détecteurs optiques.
- **Résonateurs à micro disques** : Ces résonateurs sont des structures en forme de disque avec des diamètres allant de quelques microns à quelques centaines de microns. La lumière circule autour du disque, créant une résonance optique. Les résonateurs à micro disques sont couramment utilisés dans les lasers, les filtres optiques et les détecteurs optiques.
- **Résonateurs à cavité à deux dimensions** : Ce type de résonateur utilise une cavité 2D pour créer une résonance optique. Les cavités 2D sont formées par des plaques minces de matériaux photoniques périodiques qui confinent la lumière dans les deux dimensions. Les résonateurs à cavité à deux dimensions sont utilisés pour les lasers, les filtres optiques, les détecteurs optiques et les guides d'ondes optiques [29].
- **Résonateurs à défauts ponctuels** : Ces résonateurs utilisent des défauts ponctuels dans une structure cristalline pour créer une résonance optique. Les défauts ponctuels sont des régions de la structure cristalline où la périodicité est interrompue. Les résonateurs à défauts ponctuels sont couramment utilisés dans les filtres optiques, les détecteurs optiques et les guides d'ondes optiques [30].

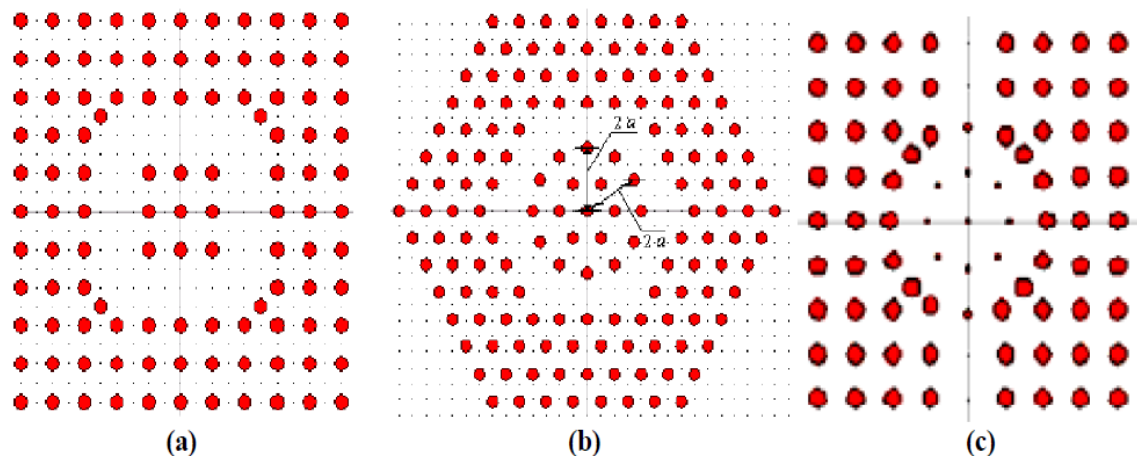


Figure I. 22 : Résonateurs à cristaux photoniques ; (a) Un anneau quasi-carré, (b) Un anneau hexagonal, (c) Un anneau cercle.

Le facteur de qualité (Q) est un paramètre important pour décrire la performance d'un résonateur à cristal photonique. Le facteur de qualité est une mesure de l'efficacité de la résonance optique dans le cristal photonique. Plus le facteur de qualité est élevé, plus la résonance est étroite et plus l'efficacité de la résonance est grande [31].

$$Q = E/P \quad (I.5)$$

Cette expression peut aussi être interprétée sous forme Lorentzienne.

$$Q = \lambda_r / \Delta\lambda = \omega r / \Delta\omega \quad (I.6)$$

λ_r : est la longueur d'onde centrale de résonance

$\Delta\lambda$: est la largeur à mi-hauteur du pic

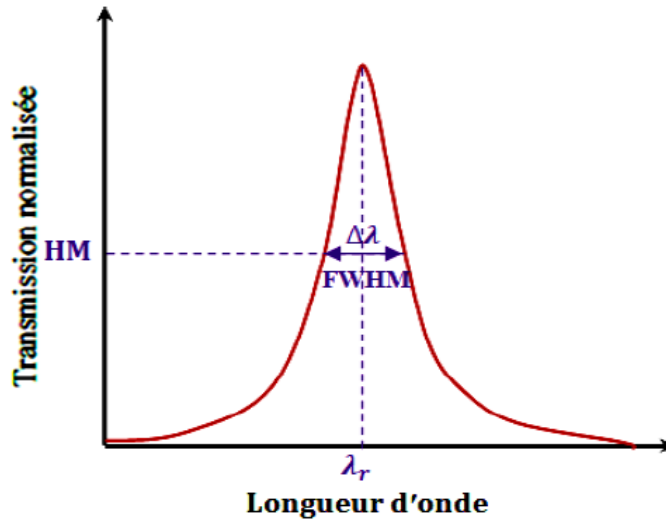


Figure I. 23 : Réponse spectrale d'un résonateur en anneau

Le facteur de qualité est déterminé par la résistance du matériau à la dissipation d'énergie dans la cavité optique. Plus la dissipation d'énergie est faible, plus le facteur de qualité est élevé. Dans les résonateurs à cristal photonique, la dissipation d'énergie est principalement due à l'absorption et à la diffusion de la lumière par les défauts du matériau ou les impuretés.

I. 6. 1. 2. Guide d'onde forme Y :

Le guide d'onde de la forme Y est obtenu par le couplage entre trois guides dont deux sont courbés et l'autre est un guide linéaire.

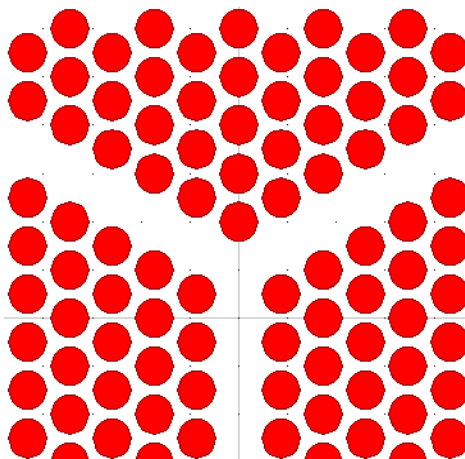


Figure I. 24 : Guide à cristaux photoniques forme « Y »

I. 6. 1. 3. Guide d'onde forme « T » :

Le guide d'onde à cristaux photoniques forme « T » s'obtient par un couplage entre deux guides linéaires.

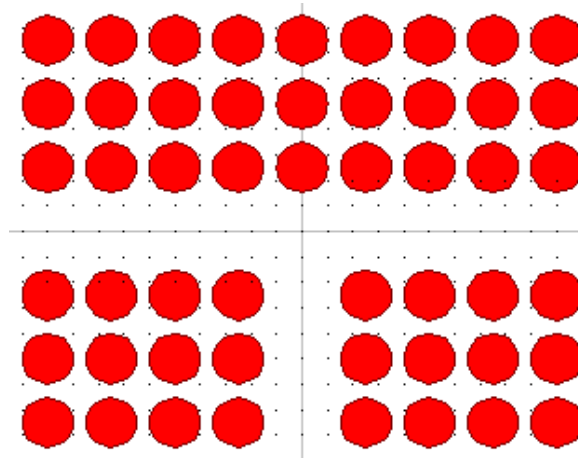


Figure I. 25 : Guide à cristaux photoniques forme « T »

Les guides d'ondes à cristaux photoniques ont plusieurs avantages par rapport aux guides d'ondes optiques conventionnels. Par exemple :

- **Bande passante large** : Les guides d'ondes à cristaux photoniques ont une bande passante large par rapport aux guides d'ondes conventionnels. Cela est dû à la dispersion lente des CPh, qui permet de minimiser les effets de dispersion et de propagation des modes.
- **Forte confinement de la lumière** : Les guides d'ondes à cristaux photoniques permettent un confinement plus fort de la lumière que les guides d'ondes conventionnels. Cela est dû à la présence de la structure périodique du cristal photonique qui peut confiner la lumière dans les dimensions transversales.
- **Flexibilité de la conception** : Les guides d'ondes à cristaux photoniques offrent une grande flexibilité de conception par rapport aux guides d'ondes conventionnels. Les propriétés optiques du cristal photonique peuvent être ajustées en modifiant la géométrie et la périodicité de la structure, permettant ainsi une grande variété de designs pour des applications spécifiques.
- **Faible perte de propagation** : Les guides d'ondes à cristaux photoniques ont généralement une faible perte de propagation par rapport aux guides d'ondes conventionnels. Cela est dû au fort confinement de la lumière dans le cristal photonique, ce qui réduit les pertes par rayonnement.
- **Potentiel pour des dispositifs intégrés** : Les guides d'ondes à cristaux photoniques peuvent être facilement intégrés avec d'autres composants optiques à base de cristal photonique

I. 7. Les cavités à cristaux photoniques

Une cavité à cristaux photoniques est une structure optique qui est utilisée pour confiner la lumière à l'intérieur d'un petit volume. Elle est généralement constituée d'un cristal photonique avec une bande interdite bien définie, qui est sculpté pour former une cavité ou un micro-résonateur. Les cavités à CPh sont largement utilisées dans les domaines de l'optique et de la photonique, notamment pour la réalisation de lasers, de détecteurs optiques et de dispositifs de traitement optique de l'information [32]. Dans ces applications, il est nécessaire de réaliser des cavités à cristaux photoniques ayant à la fois un facteur de qualité (Q) élevé et un volume modal (V) petit.

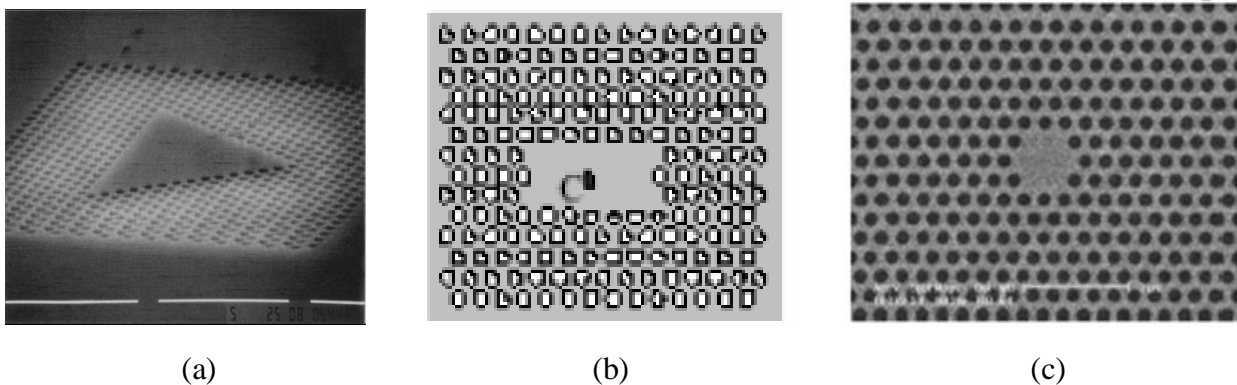


Figure I. 26 : a : Cavités rectangulaires, b : Cavités triangulaires, c : Cavités hexagonales

Les cavités optiques sont caractérisées par trois grandeurs [32] :

- La première caractérise la position et l'existence des modes de résonance dans la bande interdite photonique ; c'est la longueur d'onde de résonance λ_0 ,
- La seconde caractérise la capacité du résonateur à stocker des photons résonants, c'est le facteur de qualité Q du mode de résonance.
- La dernière grandeur qui reflète l'aptitude de la cavité à stocker spatialement un mode de résonance, c'est le volume modal V .

Les cavités à cristaux photoniques peuvent être conçues pour avoir des modes de résonance optique, qui sont des états de lumière confinée à l'intérieur de la cavité. Les modes de résonance peuvent avoir des fréquences de résonance particulières, qui dépendent de la géométrie de la cavité et des propriétés optiques du cristal photonique. Les modes de résonance peuvent être utilisés pour amplifier ou atténuer la lumière, pour le filtrage des longueurs d'onde, pour la mesure de la lumière ou pour la génération de photons individuels.

I. 8. Couplage guide-cavité :

Le couplage guide-cavité dans un cristal photonique se réfère à l'interaction optique entre un guide d'onde et une cavité optique dans un cristal photonique. Le guide d'onde est une structure qui permet la propagation de la lumière le long d'une direction spécifique, tandis que la cavité optique est une structure qui permet la résonance de la lumière à l'intérieur d'un petit volume. Le couplage entre ces deux structures peut être utilisé pour manipuler et contrôler la propagation de la lumière dans un cristal photonique, ouvrant ainsi des possibilités pour des applications en optique et en photonique [33]. Dans le cas du couplage guide-cavité, le guide d'onde est généralement utilisé pour exciter le mode de résonance de la cavité optique. Lorsque la lumière est injectée dans le guide d'onde, elle peut être confinée à l'intérieur de la cavité optique et y résonner plusieurs fois avant de se propager hors de la cavité. Ce phénomène peut être utilisé pour amplifier, filtrer ou détecter la lumière dans le cristal photonique [34].

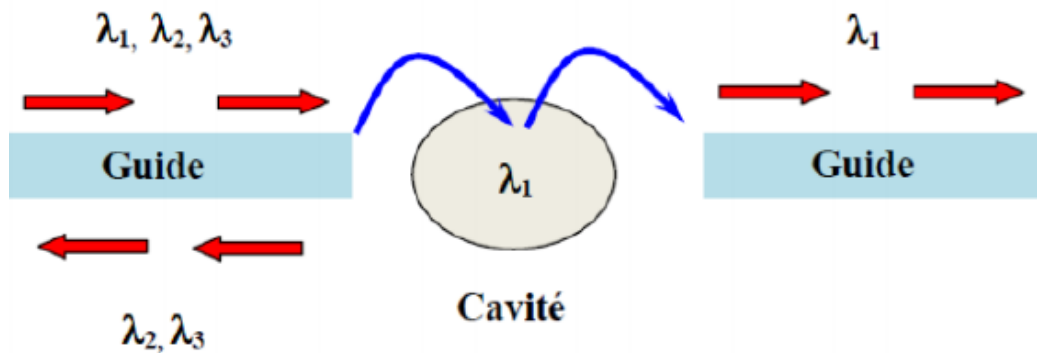


Figure I. 27 : Couplage Guide-Cavité d'un cristal photonique bidimensionnel

Le couplage guide-cavité peut être contrôlé en modifiant la géométrie et les propriétés optiques de la cavité et du guide d'onde. Par exemple, en ajustant la distance entre la cavité et le guide d'onde, il est possible de modifier l'interaction optique entre les deux structures et de modifier la fréquence de résonance de la cavité. De même, en changeant les propriétés de la cavité, il est possible de modifier les modes de résonance de la cavité et de contrôler la direction de la lumière émise.

Le couplage guide-cavité dans un cristal photonique est une technique importante en optique et en photonique, avec des applications dans de nombreux domaines tels que la communication optique, la détection de la lumière et la génération de photons uniques [35][36].

I. 9. Conclusion :

La structuration périodique des matériaux à l'échelle de dimensions proches des longueurs d'ondes des photons est connue sous le nom de phénomène de diffraction. Lorsqu'un faisceau de lumière rencontre un matériau périodiquement structuré, les ondes lumineuses sont déviées et diffractées, produisant des motifs d'interférence caractéristiques. Cette technique est utilisée en optique pour contrôler et manipuler la propagation de la lumière.

La périodicité est la caractéristique clé des cristaux photoniques, qui permet de contrôler la propagation de la lumière de manière précise en créant des bandes de photonique. Cette périodicité peut être obtenue de différentes manières en fonction des propriétés optiques recherchées et des contraintes de fabrication

Dans ce chapitre nous avons défini le principe des cristaux photoniques, les notions de base d'une structure à bande interdite photonique, les différentes propriétés des cristaux photoniques. Nous avons aussi introduit les caractéristiques des cristaux photoniques et leurs dispositifs optiques. Ensuite nous avons abordés le couplage entre les dispositifs photoniques guides couplés avec des cavités.

Dans les chapitres suivants, nous concentrons sur les structures photoniques bidimensionnelles qui sont très importantes dans la réalisation des circuits d'optique intégrée, la création des capteurs optiques, dans les filtres optiques, les cellules solaires, Les Lasers, Les méta-matériaux.

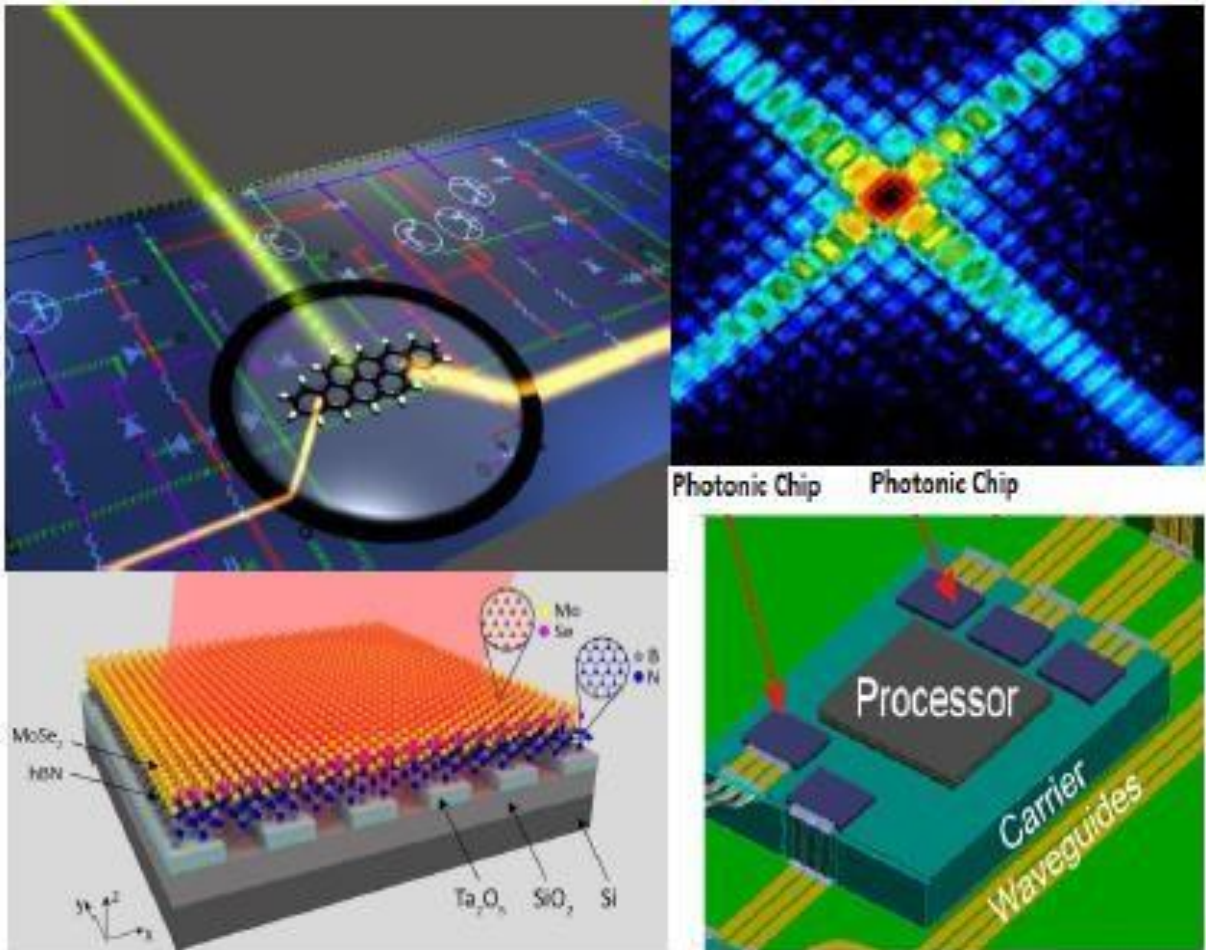
I. 10. Reference du chapitre I :

- [1]. A. Fedouche, H. A. Badaoui, M. Abri, “An ultra-compact 1×5 and 1×10 beam-splitters in photonic crystal slab”, *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, DOI: 10.1016/j.ijleo.2017.11.168
- [2]. A. Benmerkhi, “Optimisation du confinement de la lumière dans des cavités à cristaux Photoniques“ Thèse de doctorat, Université des frères Mentouri Constantine 01 (Algérie), 2012
- [3]. A. Avoine, “Etude optique de cristaux photoniques : opales et cavités 2D“. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI (France),(2011)
- [4]. B. Wild, “Etude expérimentale des Propriétés optiques des cristaux photoniques bidimensionnels et de leur accordabilité », Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (Suisse), 2006.
- [5]. W. Barbara, “Etude expérimentale des propriétés optiques des cristaux photoniques bidimensionnels et de leur accordabilité”, Thèse de doctorat, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (2006).
- [6]. D Bernier, “Propriétés de superprisme des cristaux photoniques sur substrats SOI pour le demultiplexage en longueur d’onde“. These de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris,(2008)
- [7]. C. An Hu, J. WeiLiu, C. JangWu, T. JerYang et S. LinYang, “Effects of superconducting film on the defect mode in dielectric photonic crystal heterostructure”, *Solid state communications*, DOI: 10.1016/j.ssc.2012.12.022
- [8]. C. Caloz and T. Itoh, "Electromagnetic metamaterials: transmission line theory and microwave applications", John Wiley & Sons, Inc. DOI: 10.1002/0471754323
- [9]. D. Ahn, C. S. Kim, J. S. Park and K. Y. Kang, “A coupled line type waveguide bandpass filter“, *IEEE Microwave Theory and Techniques Symposium*, DOI: 10.1109/EUMA.2001.338914
- [10]. D. Felbacq et E. Centeno, “Theory of diffraction for 2D photonic crystals with a boundary”, *J. Optics Communications*, DOI: 10.1016/S0030-4018(01)01560-7
- [11]. Y. Desieres, “Conception et études optiques de composants micro-photoniques sur matériaux III-V à base de structures a bande interdite de photon“. Thèse de doctorat, Lyon, INSA, (2001)
- [12]. F. Amal, H. A Badaoui, A. Mehadji, “Ultra Highly Efficient 1×3 and 1×6 Splitters for Terahertz Communication Applications“, *IEEE Photonics Technology Letters* 28 (13), DOI: 10.1109/LPT.2016.2554103
- [13]. H. Z. Wang, Weimin Zhou, J. P. Zheng, “A 2D rods-in-air square-lattice photonic crystal optical switch”, *Journal of OptiK, Light Electron Opt*, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.67.2295>
- [14]. J. D. Joannopoulos, S.G. Johnson, N. J. Winn, R. D. Meade, “Photonic Crystals- Molding the flow of light”, These de doctorat, Princeton University Press, 2008.
- [15]. J. O. Vasseur, P. A. Deymier, B. Djafari-Rouhani, Y. Pennec and A-C. H ladky-Hennion, “Absolute forbidden bands and waveguiding in two-dimensional phononic crystal plates“, *Phys. Rev. B* 77, 085415 (2008).
- [16]. K. Ishizaki, M. Koumura, K. Suzuki, K. Gondaira, and S. Noda, “Realization of three-dimensional guiding of photons in photonic crystals”, *Nature Photonics*, vol. 7, no. 2, p. 133, 2013
- [17]. M.Lourtioz. “Les cristaux photoniques ou la lumière en cage“, thèse de doctorat, Hermes science publications, Paris (France), 2003.
- [18]. M. Danaie, R. Nasirifar, A. Dideban, “Design of adjustable T-shaped and Y-shaped photonic crystal power splitters for TM and TE polarizations”, *Turk J Elec Eng & Comp Sci*, Vol. 25: 4398-4408,2017
- [19]. M. Lee et P.M. Fauchet, “Two dimensional silicon photonic crystal based biosensing platform for protein detection”, *J. Optics Express*, vol. 15. 4530–4535, 2007.
- [20]. M. Mahfuzur Rahman, H. Mamun, S. Ullah, “Design of a Low-Loss Y-Splitter for Optical Telecommunication using a 2D Photonics Crystal”, *International Journal of Computer Applications*, vol. 60, 0975-8887, 2012

- [21]. M. Masruf Khan, “Nano structure based power splitter design by using 2D photonic crystals”, *Journal of Modern Science and Technology*, Vol. 1, DOI: 176-187, 2013
- [22]. M. Zahravi, M. Zahravi, H. Alipour-Banaei, “All-Optical switching in ultrashort photonic crystal couplers modified Y-branch structure”, *Journal of Optical Communications*, doi: 36, 2015
- [23]. S. Mazoyer, “Lumière lente dans les guides a cristaux photoniques réels”. Thèse de doctorat, Université Paris Sud - Paris XI (France), 2011.
- [24]. A. Murtaza, B. Momeni, A. Adibi, “Systematic design of wide-bandwidth photonic crystal waveguide bends with high transmission and low dispersion”, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 28, doi: 1707-1713, 2010.
- [25]. N. Matsuda, H. Takesue, W. J. Munro, E. Kuramochi and M. Notomi, “Photonic quantum information devices using coupled-resonator optical waveguides”, *NTT Technical Review*, vol. 12, 2014
- [26]. H T Nielsen., P. Lodahl, “Quantum Electrodynamics in Photonic Crystal Waveguides”, *Quantum photonics*, Technical University of Denmark (DTU), Kgs. Lyngby, Denmark, 2011
- [27]. O. L. Berman et R. Y. Kezerashvili, “Graphene-based one-dimensional photonic crystal”, *IOP Publishing journal*, vol. 24, No. 1, 2011
- [28]. O. Levi, M. M. Lee, J. Zhang, V. Lousse, S. R. J. Brueck, S. Fan and J. S. Harris, Sensitivity analysis of a photonic crystal structure for index of refraction sensing, *Proc. of SPIE 6447*, 64470 (2007).
- [29]. R. Bendjelloul, “Etude et caractérisation de circuits photoniques à base de cristaux photoniques de micro piliers : Application aux filtres à base de résonateurs”, thèse de Doctorat, Université de frères Mentouri, Constantine (Algérie) 2017.
- [30]. R. Lord (1887) XVII. “On the maintenance of vibrations by forces of double frequency, and on the propagation of waves through a medium endowed with a periodic structure“. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* <https://doi.org/10.1080/14786448708628074>
- [31]. A. Stein, Schrodin RC (2001). “Colloidal crystal templating of three-dimensionally ordered macroporous solids: materials for photonics and beyond“. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. [doi.org/10.1016/S1359-0286\(01\)00022-5](https://doi.org/10.1016/S1359-0286(01)00022-5)
- [32]. T. Suganya and S. Robinson, “Design of 2D photonic crystal based force sensor using paralleloid ring resonator”, *Journal on Microelectronics*, vol. 03, 2017.
- [33]. W. JEGJ, Vos WL (1998). “Preparation of Photonic Crystals Made of Air Spheres in Titania“. *Science*. doi.org/10.1126/science.281.5378.802
- [34]. E. Yablonovitch (1987). “Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics“. *PhysRev Lett*. doi.org/10.1103/PhysRevLett.58.2059
- [35]. E. Yablonovitch, Gmitter T, Leung K (1991). “Photonic band structure: The face-centered-cubic case employing nonspherical atoms“. *Phys Rev Lett* 67:2295–2298.
- [36]. Y. Desieres, “Conception et études optiques de composants micro photoniques sur matériaux III-V à base de structures à bande interdite de photon“, Thèse de doctorat, L’institut national des sciences appliquées de Lyon (France), décembre 2001

Chapitre II

Les portes logiques toutes-optiques



Chapitre II : Les portes logiques toutes-optiques

II. 1. Introduction :

Les circuits intégrés et les dispositifs électroniques pourraient faire face à l'exigence de transmission de données à grande vitesse et également de traitement à l'aide d'innovations en micro et nanoélectronique. Conformément à la loi de Moore, la vitesse du processeur électronique double environ tous les 18 mois, mais cela se fait au prix d'une augmentation de la consommation d'énergie de la puce et de la dissipation. Par conséquent, une nouvelle solution d'innovation à ce problème est nécessaire et les dispositifs photoniques sont l'une des solutions prometteuses dans cet horizon [1].

Un composant optique permet la miniaturisation des circuits intégrés photoniques à une échelle comparable à la longueur d'onde de la lumière et s'avère ainsi être un bon candidat pour les futurs réseaux optiques [2]. La communication tout optique est l'une des solutions de la transmission des données en électronique, à savoir la taille et la vitesse, car les dispositifs optiques sont capables de traiter les informations à la vitesse de la lumière.

Au cours des dernières années, les chercheurs ont démontré des portes logiques entièrement optiques en utilisant différents schémas basés sur des effets non linéaires dans les fibres optiques, dans les dispositifs à semi-conducteurs et dans les guides d'ondes. Mais la plupart des travaux rapportés souffrent de certaines limitations fondamentales, notamment une faible vitesse, une grande taille et une intégration à l'échelle de la puce difficile à réaliser [3].

À l'heure actuelle, les cristaux photoniques attirent une attention particulière en tant que plateforme sur laquelle des dispositifs avec des dimensions de l'ordre des longueurs d'onde de la lumière pour les futurs circuits intégrés photoniques peuvent être construits [4]. Les cristaux photoniques ont des propriétés très uniques telles qu'une vitesse élevée, une faible consommation d'énergie, une compacité, un meilleur confinement et une dispersion sur mesure qui en font des candidats prometteurs dans le domaine des circuits intégrés photoniques [5].

Les portes logiques tout optiques ont attiré une attention considérable en raison de leurs applications dans les domaines des systèmes informatiques optiques et des réseaux d'interconnexion optiques. De nombreux schémas ont été proposés pour réaliser des portes logiques tout optiques, notamment l'utilisation de cristaux liquides [6], de guides d'ondes métalliques (ou diélectriques) [7] et de résonateurs optiques en silicium.

En raison de leur capacité exceptionnelle à contrôler les états de propagation des photons, les cristaux photoniques, avec leurs bandes interdites photoniques, sont considérés comme l'un des candidats les plus appropriés pour la réalisation de dispositifs photoniques intégrés [8]. Les portes logiques tout optiques basées sur des cristaux photoniques sont capables d'applications pratiques sur puce. Des portes logiques entièrement optiques à base de cristaux photoniques peuvent être réalisées via un interféromètre [9] qui est utilisé pour mesurer les longueurs et la forme des composants optiques avec une précision nanométrique. On peut citer par exemple l'interféromètre Mach-Zehnder (MZI) [10] est constitué d'un amplificateur optique à semi-conducteur (SOA) [11] et des processus non linéaires incluant un effet électro-optique, effet thermo-optique [12] et absorption à deux photons [13].

II. 2. Comparaison entre portes logiques électroniques et portes logiques tout-optiques :

Les portes logiques électroniques sont basées sur des dispositifs électroniques tels que des transistors, des diodes, des résistances, des condensateurs, etc., pour effectuer des opérations logiques. Les signaux électriques sont utilisés pour représenter les états logiques, c'est-à-dire 0 et 1, et ces signaux sont traités à l'aide de ces dispositifs pour effectuer les opérations logiques.

Les portes logiques tout-optiques, en revanche, utilisent des propriétés optiques pour effectuer les opérations logiques. Les signaux optiques, tels que la lumière, sont utilisés pour représenter les états logiques, et ils sont traités à l'aide de dispositifs optiques tels que des fibres optiques, des amplificateurs optiques, des commutateurs optiques, des diviseurs de faisceaux, etc. [14].

L'informatique optique peut présenter de nombreux avantages par rapport à l'informatique électronique. Les signaux optiques se déplacent beaucoup plus rapidement que les signaux électriques, ce qui permet aux portes logiques tout-optiques de fonctionner à des vitesses beaucoup plus élevées. De plus, les signaux optiques sont insensibles aux interférences électromagnétiques, ce qui peut rendre les portes logiques tout-optiques plus fiables dans des environnements électro-magnétiquement bruyants. Enfin, les portes logiques tout-optiques peuvent être utilisées dans des réseaux optiques pour transmettre des signaux optiques sur de longues distances avec peu de perte de signal. Il existe d'autres avantages comme [15] :

- Immunité aux interférences électroniques
- Systèmes plus légers et plus compacts
- Immunité au court-circuit
- Transmission à faible perte

- Une bande passante élargie
- Calcul parallèle plus facile/moins cher.

Pour résumer, nous pouvons dire qu'une porte logique est un bloc de construction élémentaire de tout circuit et qu'elle a deux entrées ou plus et une sortie. Les niveaux logiques, 0 ou 1 dans un système logique binaire sont physiquement représentés par des niveaux de signal qui peuvent être soit une tension soit un courant dans les circuits électroniques. Dans le cas des circuits optiques les niveaux logiques sont représentés par l'intensité du signal et la polarisation [15].

Les données numériques peuvent être transmises aux processeurs électroniques à travers une fibre optique à la vitesse de la lumière, mais la vitesse maximale de commutation des portes logiques électroniques est de 50 ps pour une puissance moyenne de 0,5 mW par commutation [16]. Il est également connu que la vitesse de commutation des portes logiques à base de semi-conducteurs est généralement limitée par la capacité des jonctions p-n [17]. Même si la taille des portes logiques à semi-conducteurs modernes est petite, leur commutation est limitée par la capacité d'interconnexion [18]. Dans le même temps également, la vitesse de commutation des portes logiques optiques n'est limitée que par la vitesse de la lumière qui la traverse. Cela signifie que les commutateurs optiques peuvent commuter des données environ 1000 fois plus rapide que leurs homologues électroniques [19].

Des photons de longueurs d'onde différentes peuvent voyager ensemble dans la même fibre ou se croiser dans l'espace libre sans aucune interférence ni diaphonie. Cela permet la possibilité d'un parallélisme dans le traitement optique. En général, l'optique offre une bande passante plus élevée que l'électronique, ce qui permet à son tour de traiter plus d'informations simultanément et d'analyser facilement les données en parallèle sans aucune interférence. Le traitement du signal optique est insensible aux interférences électromagnétiques [20].

Par conséquent, dans le développement d'une famille de dispositifs logiques optiques avec la fonctionnalité booléenne, un équivalent optique de la logique transistor-transistor (TTL) est une étape importante dans cette direction [21].

Cependant, les portes logiques tout-optiques présentent également certains inconvénients. Tout d'abord, ils nécessitent des sources de lumière puissantes et stables pour fonctionner, ce qui peut rendre leur fabrication et leur utilisation coûteuses. De plus, les signaux optiques peuvent être sensibles aux perturbations environnementales telles que la température et les vibrations, ce qui peut limiter leur utilisation dans certaines applications.

Enfin, les portes logiques tout-optiques sont plus difficiles à intégrer avec les technologies électroniques existantes, ce qui peut limiter leur adoption dans certains domaines.

II. 3. Application des portes logiques tout-optiques :

Les portes logiques tout-optiques sont utilisées dans une variété d'applications [22], voici quelques exemples d'applications des portes logiques tout-optiques :

1. Réseaux de communication optique : Les portes logiques tout-optiques sont utilisées dans les réseaux de communication optique pour traiter les signaux optiques en transit. Les réseaux de communication optique utilisent des fibres optiques pour transmettre des signaux optiques sur de longues distances, et les portes logiques tout-optiques sont utilisées pour router les signaux optiques, pour détecter et corriger les erreurs de transmission, et pour effectuer d'autres opérations logiques sur les signaux optiques.
2. Informatique optique : Les portes logiques tout-optiques sont utilisées dans l'informatique optique pour effectuer des opérations logiques sur des signaux optiques. L'informatique optique est une approche alternative à l'informatique électronique, dans laquelle les signaux optiques sont utilisés pour stocker et traiter l'information. Les portes logiques tout-optiques sont utilisées pour effectuer des opérations logiques telles : AND, OR, NOT, etc.
3. Cryptographie optique : Les portes logiques tout-optiques sont utilisées dans la cryptographie optique pour protéger les informations sensibles en les cryptant à l'aide de signaux optiques. Les portes logiques tout-optiques sont utilisées pour effectuer des opérations de cryptage et de décryptage sur les signaux optiques.
4. Informatique quantique : Les portes logiques tout-optiques sont également utilisées dans l'informatique quantique, qui est une approche de l'informatique basée sur les propriétés quantiques de la matière. Les portes logiques tout-optiques sont utilisées pour effectuer des opérations logiques sur les qubits, qui sont les unités de traitement de l'information dans l'informatique quantique [23].

Les portes logiques tout-optiques sont utilisées dans une variété d'applications, où la vitesse, la fiabilité et la sécurité des signaux optiques sont essentielles. Les portes logiques tout-optiques permettent de traiter les signaux optiques à des vitesses élevées, et peuvent être utilisées dans des environnements où les signaux électriques sont susceptibles d'interférences électromagnétiques [24].

II. 4. Techniques et concepts des portes logiques tout optiques :

Les portes logiques tout-optiques utilisent des techniques et des concepts optiques pour réaliser des opérations logiques sur des signaux optiques. Voici quelques-unes des techniques et des concepts clés utilisés dans les portes logiques tout-optiques :

- Non-linéarité optique : Les portes logiques tout-optiques exploitent la non-linéarité optique des matériaux pour réaliser des opérations logiques sur les signaux optiques. La non-linéarité optique se produit lorsque la réponse optique d'un matériau n'est pas linéairement proportionnelle à l'intensité du champ électromagnétique qui lui est appliqué. Cette propriété permet aux portes logiques tout-optiques de réaliser des opérations logiques telles que les portes AND, OR, NOT, etc.
- Interférences optiques : Les portes logiques tout-optiques utilisent également des interférences optiques pour réaliser des opérations logiques. Les interférences optiques se produisent lorsque deux ou plusieurs faisceaux de lumière se combinent pour produire une intensité lumineuse résultante qui dépend des phases relatives des faisceaux individuels. Les portes logiques tout-optiques utilisent des interférences optiques pour réaliser des opérations logiques telles que les portes XOR, XNOR, etc.
- Réseaux optiques : Les portes logiques tout-optiques peuvent également être réalisées à l'aide de réseaux optiques, qui sont des dispositifs optiques conçus pour réaliser des opérations logiques sur les signaux optiques. Les réseaux optiques utilisent des éléments optiques tels que des lentilles, des miroirs et des fibres optiques pour réaliser des opérations logiques sur les signaux optiques.
- Commutation optique : Les portes logiques tout-optiques utilisent également la commutation optique pour réaliser des opérations logiques. La commutation optique se produit lorsque la réponse optique d'un matériau change en réponse à un signal optique. Les portes logiques tout-optiques utilisent la commutation optique pour réaliser des opérations logiques telles que les portes NOT et NAND [25].

II. 4. 1. Porte AND "ET" :

La porte "AND" est utilisée pour identifier les adresses et pour confirmer l'intégrité des informations, elle est capable d'effectuer les opérations logiques suivantes :

0 AND 0	=	0
1 AND 0	=	0
0 AND 1	=	0
1 AND 1	=	1

Tableau II. 1 : La table de vérité de la porte logique «AND».

La porte logique AND peut être réalisée à l'aide de composants électroniques ou optiques. Dans une réalisation électronique, la porte logique AND peut être réalisée à l'aide de transistors qui sont câblés ensemble pour produire la sortie en fonction des entrées. Dans une réalisation optique, la porte logique AND peut être réalisée à l'aide de matériaux non-linéaires qui exploitent les propriétés de l'optique non-linéaire pour produire la sortie en fonction des entrées optiques

Un exemple d'application de la porte logique tout optique « AND » est très bien illustré dans l'étude réalisé par **Nilesh Kumar Yadav** [26] qui montre que les cristaux photoniques contrôlent l'émission spontanée dans le réseau. Dans cette structure, la conception est basée sur le principe des interférences. Il y a deux ports d'entrée et un port de sortie. Si les signaux lancés aux ports d'entrée entraînent des interférences constructives, une intensité lumineuse élevée est obtenue au port de sortie. Une intensité lumineuse élevée peut être considérée comme une fonction logique faible (Logique 1). Lorsque les signaux lancés au niveau des ports d'entrée entraînent des interférences destructives, une faible intensité lumineuse est obtenue au niveau du port de sortie. Cette faible intensité lumineuse est considérée comme une fonction logique haute (Logique 0). Ainsi, nous pouvons dire que la conception est basée sur le principe du phénomène d'interférence lumineuse. Les signaux lancés en entrée sont des signaux gaussiens. Le paramètre d'analyse nommé rapport de contraste est défini pour les performances des portes logiques. Il est défini comme le rapport de la puissance moyenne au port de sortie pour la fonction logique haute à la puissance moyenne pour la fonction logique basse. Mathématiquement, il peut être donné comme formule ci-dessous ;

$$CR = 10 \log \frac{P_1}{P_0} \quad (\text{II.1})$$

Où P_1 et P_0 sont les puissances (sortie / entrée). Elle est toujours mesurée en dB.

La structure proposée peut être utilisée dans la conception d'une porte « AND » par une petite modification du rayon de la tige « R1 ». Le rayon de la tige « R1 » est optimisé à « 90 nm » alors que le rayon de la tige « R2 » est identique à « 25 nm ».

La figure (II. 1) montre le modèle proposé pour la porte AND (ET).

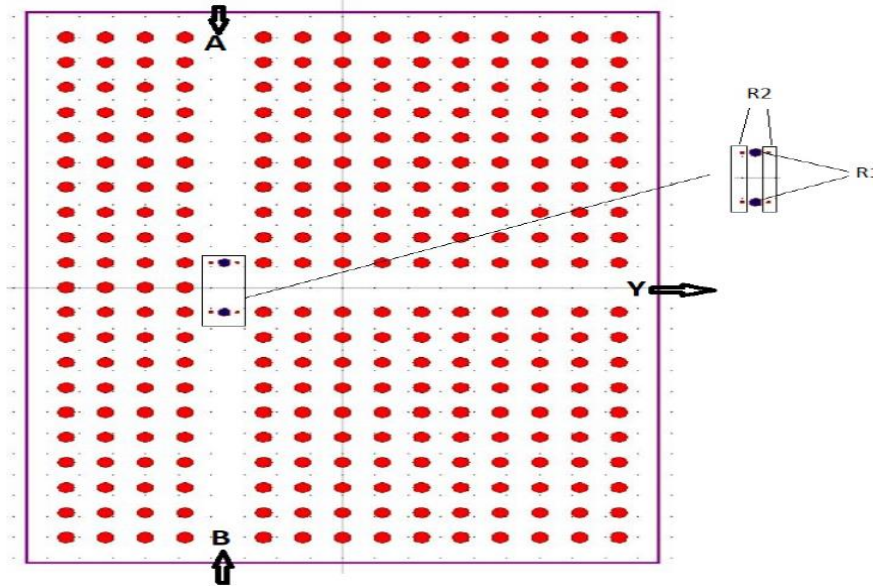


Figure II. 1: La structure « AND » proposée [26]

Les entrées doivent être appliquées de manière à ce que leur différence de phase entraîne une interférence constructive entre elles au niveau de la jonction en « T ». Cette interférence constructive se traduit par une intensité lumineuse élevée. Une intensité lumineuse élevée définit une logique de haut niveau au niveau du port « Y ». Lorsque le rayon de la tige « R1 » est plus grand, il en résulte une augmentation de la réflexion arrière. Comme la lumière de réflexion arrière est plus importante, l'intensité lumineuse atteint moins au port de sortie Y. Lorsque le signal lumineux aux ports d'entrée A et B est lancé, il en résulte une interférence constructive à la jonction. Cette interférence constructive entraîne une intensité lumineuse élevée au port de sortie « Y ». Une intensité lumineuse élevée à la sortie définit une logique de haut niveau.

Pour la fonction logique « AND », le signal au port A et au port B est lancé avec une phase de zéro degré qui entraîne l'interférence de nature constructive à la sortie et peut être observée une intensité lumineuse élevée au port de sortie. Et une intensité lumineuse élevée à la sortie a défini une logique de haut niveau. Pour les opérations logiques « AND », la distribution des champs et sa transmission de sortie pour les combinaisons d'entrée sont illustrées sur la figure ci-dessous :

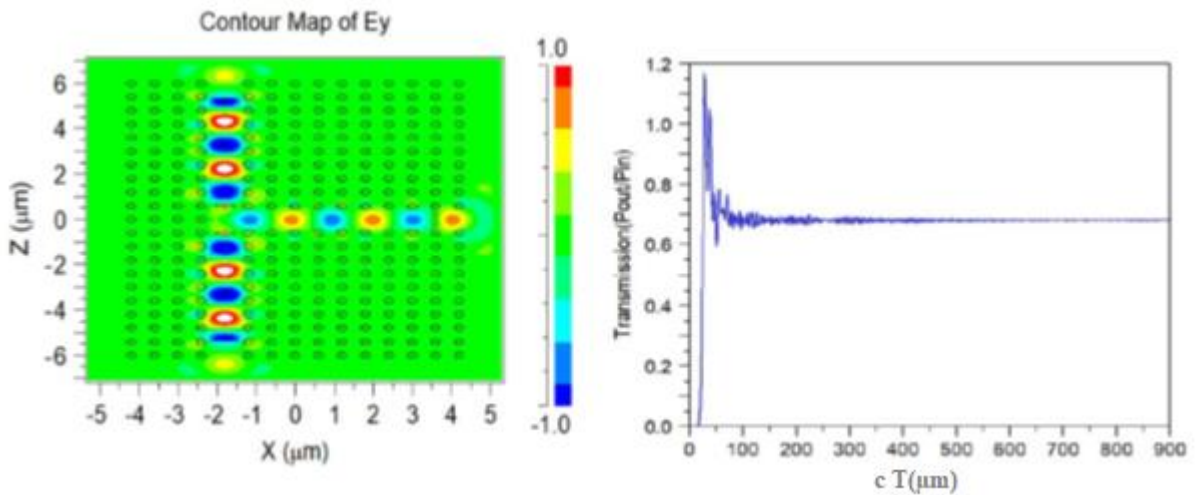


Figure II. 1. 4 : a) propagation du signal dans la porte AND pour $A=1$ & $B=1$, b) la transmission de sortie dans la porte AND pour $A=1$ & $B=1$ [26].

La figure (II.1.1) montre la distribution de champ lorsque le signal lumineux est lancé au port B et au port A. Dans cette combinaison d'entrée, les tiges directionnelles à la jonction en « T » réfléchissent une partie de la lumière vers les ports d'entrée et l'autre partie s'agrandit entre les deux tiges R1 et R2 c'est-à-dire qu'une quantité de signaux lumineux traversent la jonction en « T », ce qui peut être observé au niveau du port de sortie Y. Dans cette condition, nous obtenons une intensité lumineuse élevée au niveau du port de sortie, définie comme une logique de haut niveau. Pour cette distribution de champ optique.

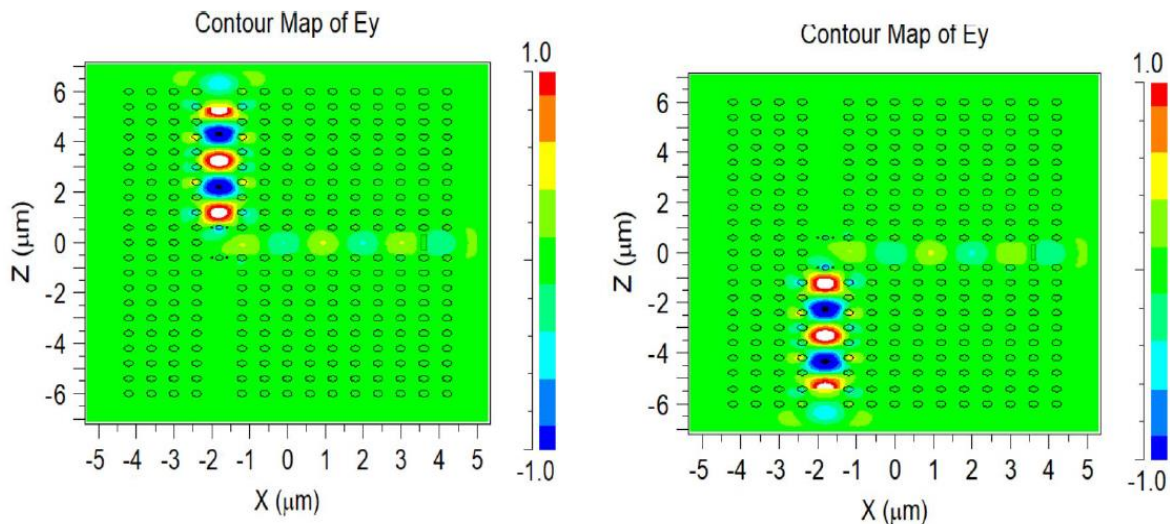


Figure II. 1. 5 : Transmission de sortie de la porte logique AND quand $A=0, B=1$ & $A=1, B=0$ [26]

La figure (II.1.2) montre la transmission de sortie pour AND qui conclut que la transmission de sortie (P_{out}/P_{in}) au port de sortie Y est observée à une valeur de 0,170, qui est considérée comme une logique de bas niveau.

Lorsque le signal lumineux à l'un des ports d'entrée, c'est-à-dire au port A ou au port B est lancé, il est réfléchi à la jonction et une quantité négligeable de signaux lumineux traversent la jonction « T » qui peut être observée au niveau du port de sortie Y. Dans cette condition, nous obtenons une faible intensité lumineuse au niveau du port de sortie, définie comme une logique de bas niveau. Intensité lumineuse élevée à la logique de haut niveau définie en sortie.

La transmission de sortie est représentée sur la figure (II.1.3) :

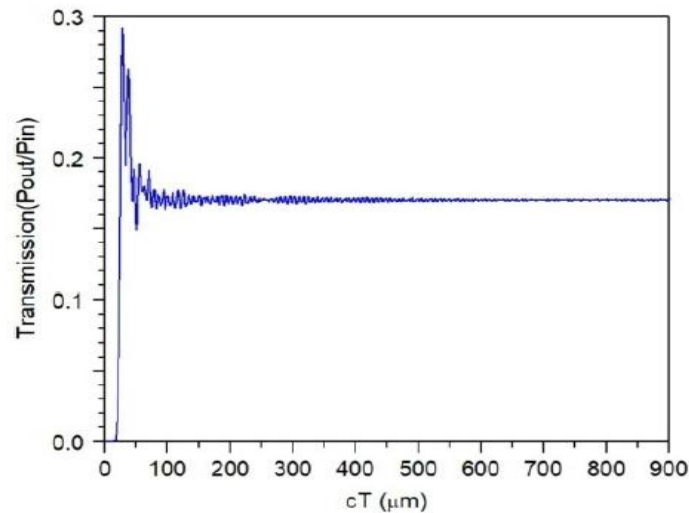


Figure II. 1. 6 : Distribution de champ et transmission de sortie de la porte AND quand $A = 1$ et $B = 1$ [26]

La figure (II.1.3) montre la transmission de sortie pour AND qui conclut que la transmission dans le port de sortie Y est observée à une valeur de 0,170, qui est considérée comme une logique de bas niveau.

Toutes les performances des combinaisons d'entrées de la fonction logique « AND » peuvent être résumées dans le tableau ci-dessous :

La porte logique AND		
Output Transmission	Logic	Contrast Ratio (dB)
0	0	6,033
0,170	0	
0,170	0	
0,682	1	

Tableau II. 2 : Résumé sur l'opération logique pour la porte AND [26]

À partir du tableau (II. 2), en mettant la valeur de P1 et P0 dans l'équation (II. 1) ci-dessus, nous calculons le rapport de contraste (CR) et nous avons une valeur égale à 6,033 dB.

On peut conclure que cette structure à base de cristaux photoniques fonctionne effectivement comme une porte logique AND électronique.

II. 4. 2. Porte OR "OU" :

La porte « OR » est une porte logique qui peut effectuer les opérations logiques suivantes :

0 OR 0	=	0
1 OR 0	=	1
0 OR 1	=	1
1 OR 1	=	1

Tableau II. 3 : La table de vérité de la porte logique " OU "

La porte logique "OR" peut être réalisée à l'aide de composants électroniques ou optiques. Dans une réalisation électronique, la porte logique "OR" peut être réalisée à l'aide de transistors qui sont câblés ensemble pour produire la sortie en fonction des entrées. Dans une réalisation optique, la porte logique "OU" peut être réalisée à l'aide de matériaux non-linéaires qui exploitent les propriétés de l'optique non-linéaire pour produire la sortie en fonction des entrées optiques.

La porte "OR" tout optique proposée par **K. Rama Prabha** [27] est conçue en créant un défaut en forme de "Y" avec un résonateur en anneau dans une structure de réseau hexagonale. Les performances de la porte « OR » toute optique proposée sont étudiées à l'aide de la méthode des ondes planes (PWE) et la méthode de la différence finie (FDTD) [28]. La porte "OR" proposée fonctionne à une longueur d'onde de 1550 nm. La taille de la structure est de nature compacte. Elle convient aux processeurs optiques, aux circuits intégrés optiques à grande vitesse et aux dispositifs de commutation.

Cette porte logique « OR » à deux entrées toute optique proposée contient un réseau hexagonal 21×21 utilisant des tiges de silicium. Pour réduire la perte de puissance du signal et réduire la conception structurelle, la structure proposée est introduite avec un défaut de ligne et de point. La constante de réseau $a = 580$ nm, le rayon de la tige noté $r = 0,11$ μm et l'indice de réfraction est de 3,42. Le silicium est un matériau utilisé comme substrat, c'est pourquoi il est considéré. La figure (II.2) montre le diagramme de bande pour la porte logique proposée avant de créer les défauts. La méthode des ondes planes (PWE) est utilisée pour définir la structure de bande interdite.

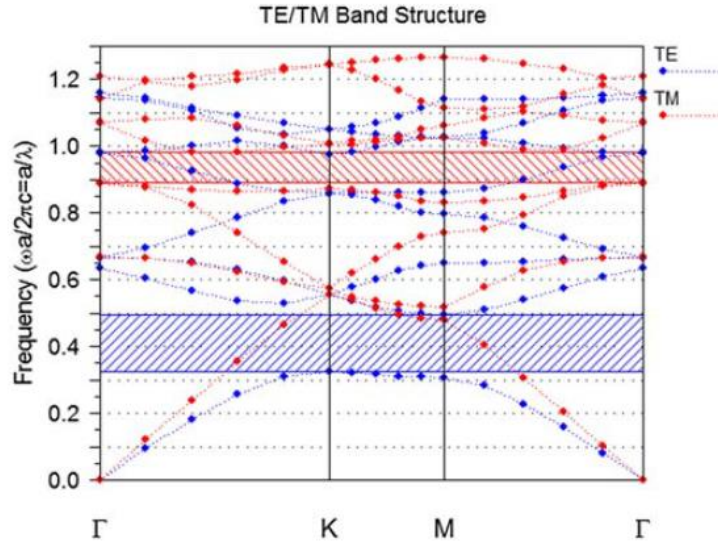


Figure II. 2 : Diagramme de bande de la structure étudiée [27]

La structure de porte logique entièrement optique proposée contient une bande interdite électrique (TE) et une bande interdite magnétique (TM). La région de la bande interdite pour le mode TE varie de $0,323 < a/\lambda < 0,494$ ce qui est égal à $1364 \text{ nm} < \lambda < 1795 \text{ nm}$. De même, La région de la bande interdite pour le mode TM varie de $0,892 < a/\lambda < 0,983$ ce qui est égal à $590 \text{ nm} < \lambda < 650 \text{ nm}$. Ici, la première bande interdite TE est envisagé pour cette structure.

La figure (II.2.1) montre la porte "OR" à deux entrées proposée qui contient deux ports d'entrée (port A et port B) et un port de sortie (port Y). La structure est conçue à l'aide d'un guide d'ondes en forme de « Y » avec le résonateur en anneau circulaire. Une rangée de tiges est retirée pour créer un port d'entrée et de sortie du guide d'ondes en forme de « Y ». Le résonateur à anneau circulaire est conçu en faisant varier la position des tiges par rapport à sa position d'origine.

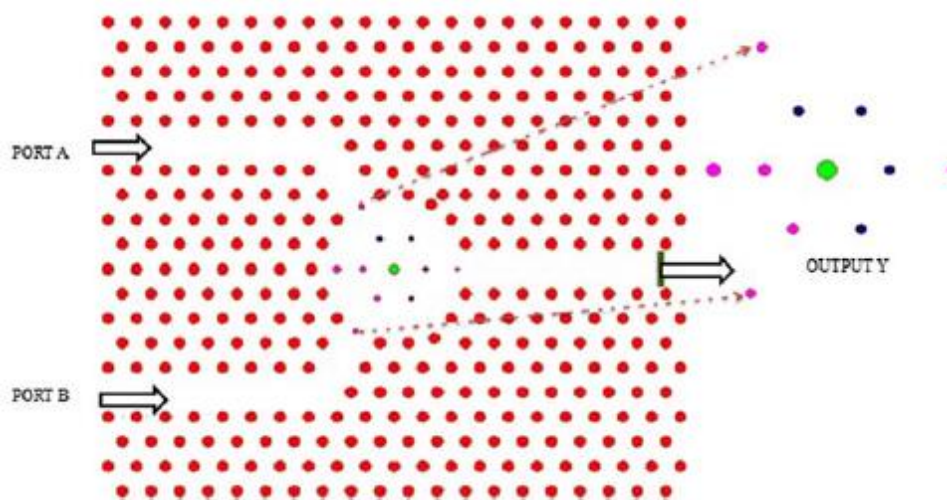


Figure II.2. 1: Structure schématique de la porte « OU » à deux entrées proposée [27]

Les paramètres structurels, tels que le rayon et l'indice de réfraction des tiges sont variés afin d'atteindre l'efficacité de transmission maximale. Le rayon de la tige externe est de $0,05 \mu\text{m}$ et l'indice de réfraction de la tige externe est de 3,42. La tige défectueuse est placée entre le résonateur et le guide d'onde pour obtenir un rendement élevé. Le rayon de la tige extérieure est représenté en magenta clair et la tige intérieure en vert clair. Le rayon des tiges intérieures est de 50 nm (couleur bleue), 60 nm (couleur magenta clair) et 100 nm (couleur verte) qui sont optimisés afin d'obtenir une meilleure efficacité

La figure (II.2.2) montre la réponse évolutive dans le temps et la distribution du champ électrique pour trois niveaux logiques différents (a) $A = 1, B = 0$ et $Y = 1$ (b) $A = 0, B = 1$ et $Y = 1$ (c) $A = 1, B = 1$ et $Y = 1$.

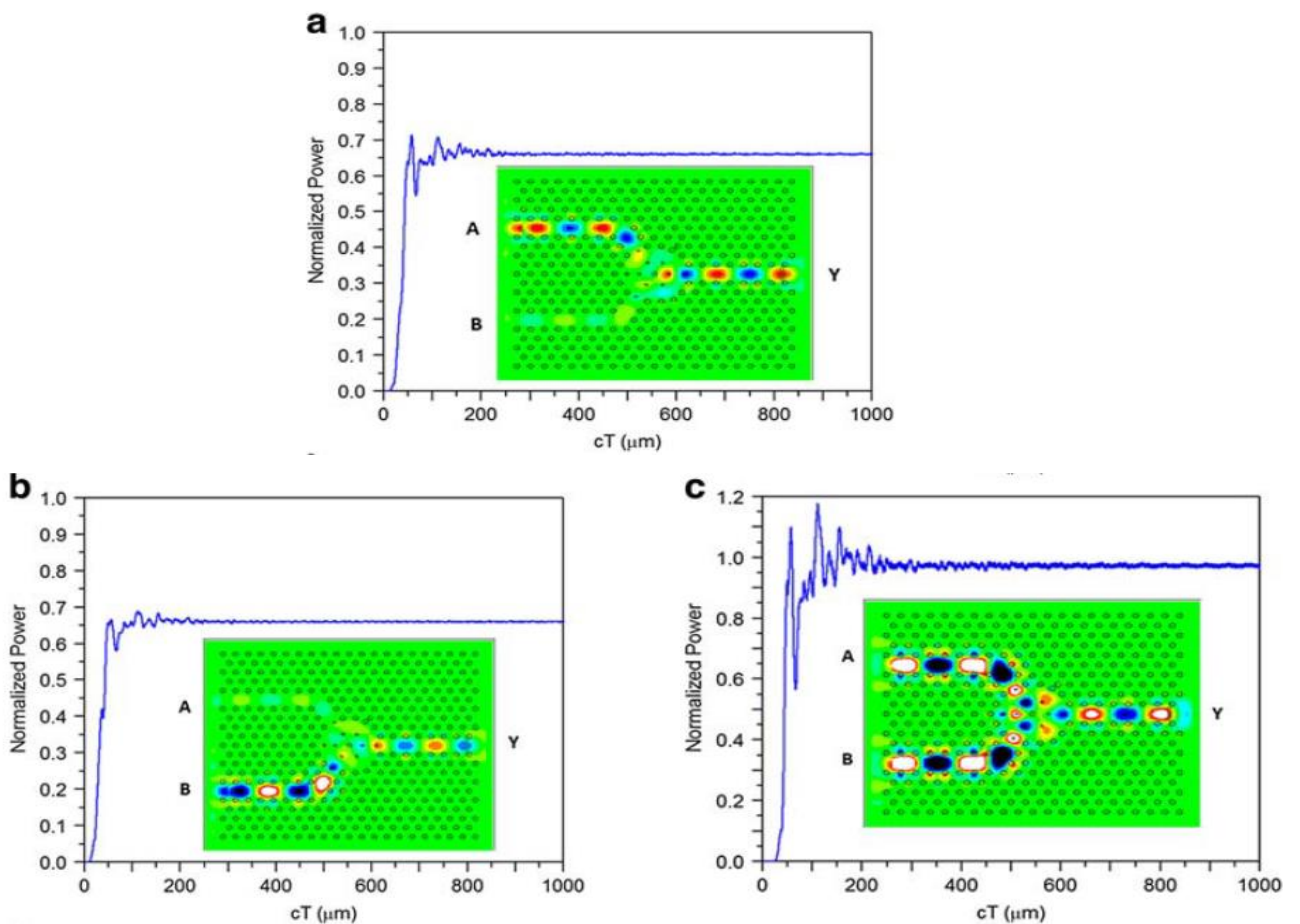


Figure II.2.2 : Propagation du signal de la porte OU à deux entrées (a) $A = 1, B = 0$ et $Y = 1$ (b) $A = 0, B = 1$ et $Y = 1$ (c) $A = 1, B = 1$ et $Y = 1$ [27]

Lorsque l'une des entrées A/B ou les deux entrées est ON ($A = B = 1$), la sortie du 1 logique est atteinte. On remarque qu'il y a quatre cas :

Cas 1 : Lorsque deux entrées sont OFF, c'est-à-dire $A = 0$ et $B = 0$, la puissance d'entrée ne propage pas à l'intérieur de la structure, il n'y a donc pas de puissance dans le port de sortie.

Cas 2 : Lorsque l'une des entrées est active, c'est-à-dire $A = 1$ et $B = 0$, le signal est couplé à l'intérieur du guide d'onde et la sortie est obtenue comme 1. Environ 65% de la puissance de sortie est atteinte au port de sortie Y comme indiqué sur la figure (II. 2. 2. a).

Cas 3 : Lorsque l'une des entrées est active, c'est-à-dire $A = 0$ et $B = 1$, la puissance d'entrée est donnée au port A et la lumière se propage vers le défaut ponctuel qui s'est créé au centre de la structure, la puissance couplée à l'intérieur du guide d'onde. Environ 65 % de la puissance de sortie est atteinte en sortie Port Y. La réponse de la puissance de sortie et la distribution du champ est représentée sur la figure (II. 2. 2. b).

Cas 4 : Lorsque les deux entrées sont activées, c'est-à-dire $A = 1$ et $B = 1$, la puissance d'entrée se propage à l'intérieur de la structure, alors la puissance est couplée à une condition de résonance particulière. Enfin, la puissance est atteinte dans le port Y. elle donne 100 % de la puissance comme indiqué sur la figure (II. 2.2. c).

Le temps de transmission pour atteindre 0,1 % de la moyenne est t_1 ainsi que t_2 est le temps de transmission pour atteindre 90%. Le temps de réponse est de $4*t_2 = 0,2$ ps. Le rapport de contraste pour la logique 11 est $C = 29,91$ dB. Le débit est d'environ 5 Tbps.

II. 4. 3. Porte XOR :

La porte XOR effectue la comparaison des modèles de données pour la reconnaissance d'adresse ainsi que la commutation, le cryptage et le décryptage des paquets. La porte XOR est capable d'effectuer les opérations logiques suivantes :

0 XOR 0	=	0
1 XOR 0	=	1
0 XOR 1	=	1
1 XOR 1	=	0

Tableau II. 4 : La table de vérité de la porte logique « XOR »

Le tableau (II. 4) montre la table de vérité pour les portes logiques XOR. Les 0 et 1 logiques dans la table de vérité indiquent respectivement le signal d'entrée/sortie.

La porte logique XOR peut être réalisée à l'aide de composants électroniques ou optiques. Dans une réalisation électronique, la porte logique XOR peut être réalisée à l'aide de transistors qui sont câblés ensemble pour produire la sortie en fonction des entrées. Dans une réalisation optique, la porte logique XOR peut être réalisée à l'aide de matériaux non-linéaires qui exploitent les propriétés de l'optique non-linéaire pour produire la sortie en fonction des entrées optiques.

Kun-Yi Lee and Jhe-Min Lin [29] ont étudié une structure d'une porte logique XOR toute optique basée sur un réseau triangulaire d'un cristal photonique bidimensionnel composé des tiges de substrat de silicium dans l'air.

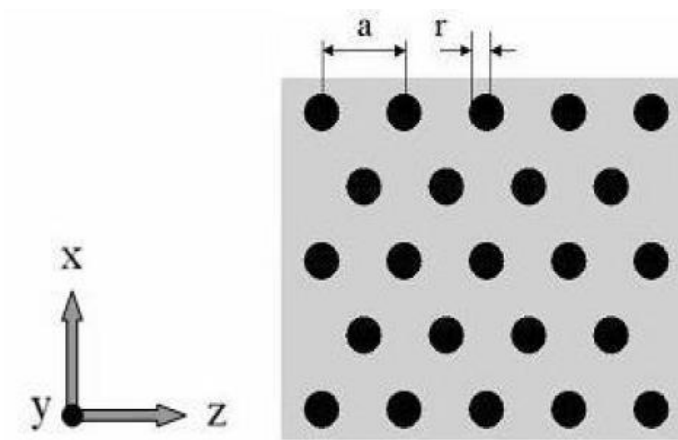


Figure II. 3 : Réseau triangulaire d'un cristal photonique bidimensionnel composé des tiges de silicium dans l'air [29]

La simulation a été faite par la méthode des différences finies FDTD avec une onde gaussienne polarisée en champ électrique E, dans une pleine largeur à mi-hauteur.

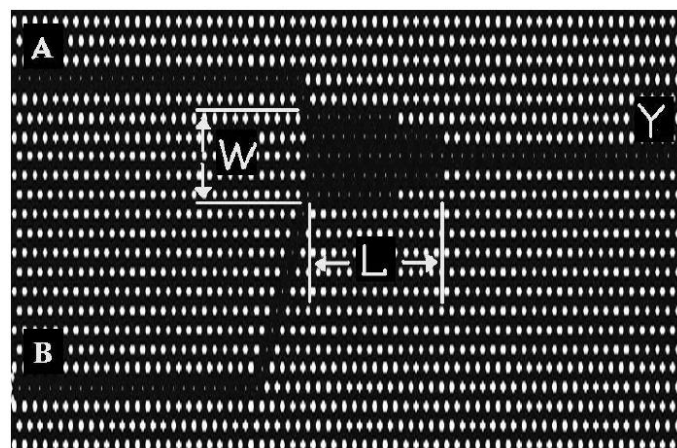


Figure II.3. 5 : La structure de la porte XOR utilisée [29]

L'onde monochromatique de fréquence $0.491 (a/\lambda)$ est envoyée dans le cristal photonique selon les trois directions.

D'après les résultats de la simulation, le signal de sortie de XOR soit haut (1) ou bas (0) en fonction des deux signaux d'entrée indiqués par les paires (00), (01), (10), (11).

Le comportement du XOR pour les entrées (01), (10) et (11) est illustré à la figure (II. 3. 2), figure (II. 3. 3) et figure (II. 3. 4). À la fréquence $0,491(a/\lambda)$, l'intensité de sortie pour la logique 1 est supérieure à 90 % de celles d'entrée et l'intensité de sortie pour les 0 logiques est inférieure à 15 % de celles d'entrée.

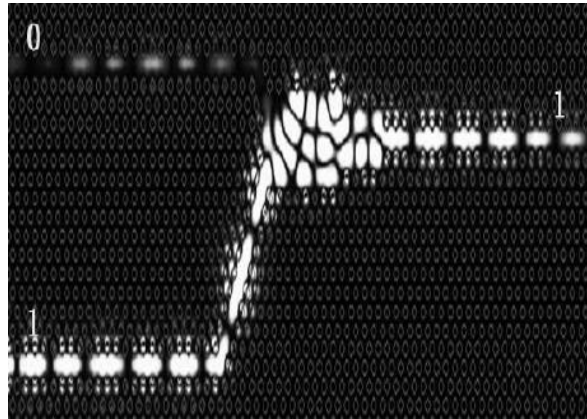


Figure II.3. 6 : Résultat obtenu dans le port de sortie quand l'entrée est (0 1) [29]

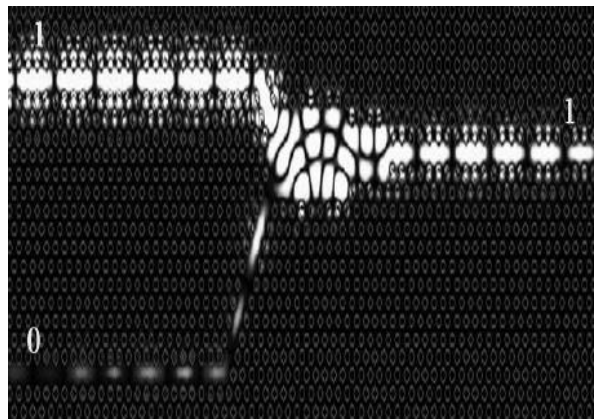


Figure II.3. 7 : Résultat obtenu dans le port de sortie quand l'entrée est (1 0) [29]

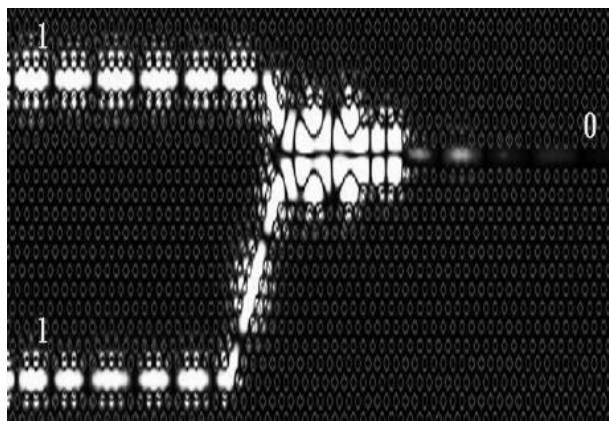


Figure II.3. 8 : Résultat obtenu dans le port de sortie quand l'entrée est (1 1) [29]

Les résultats de la simulation montrent que la structure de guide d'ondes à cristal photonique tout optique proposée pourrait réellement fonctionner comme une porte logique XOR.

Dans le but d'optimiser les performances de la porte logique XOR proposée, l'effet de la longueur de section d'interférences (L) est de la largeur (W) de la structure sont étudiés.

On constate qu'il existe une valeur de puissance d'émission de sortie optimisée, supérieure à 90% de celles d'entrée, pour une longueur de guide d'onde donnée 13a et une largeur de guide d'onde donnée 5a. Les figures (II. 3.5.a) et (II. 3.5.b) tracent la puissance pour la porte logique « XOR » en fonction de la puissance de transmission de sortie pour le signal logique 0 sous différentes longueurs et largeurs de section d'interférence, respectivement.

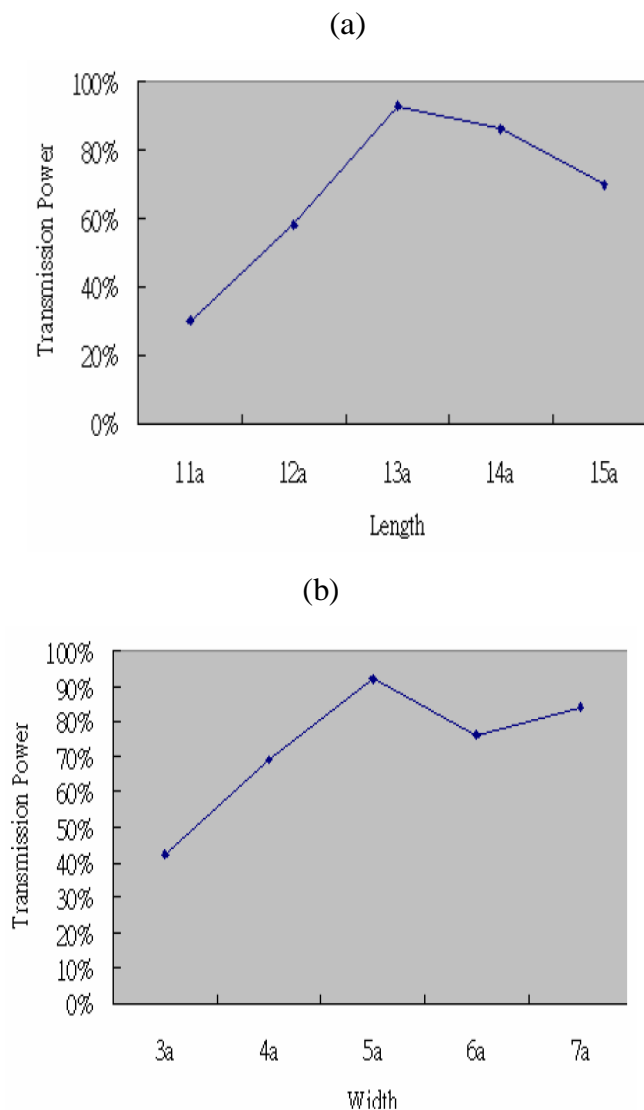


Figure II.3. 9 : La transmission dans la porte logique « XOR »

(a) la puissance de transmission de sortie pour le signal logique 1 sous différentes longueurs de section d'interférence et (b) la puissance de transmission de sortie pour le signal logique 1 sous différentes largeurs de longueur de section d'interférence [29]

On constate qu'il existe une valeur de puissance d'émission de sortie optimisée, inférieure à 15% de celles d'entrée, pour une longueur de guide d'onde donnée 13a et une largeur de guide d'onde donnée 5a. Il est évident que la longueur et la largeur de section d'interférence optimales de la structure peuvent être obtenues.

La longueur et la largeur de la section d'interférence de la structure de guide d'ondes à cristal photonique sont optimisées pour obtenir des performances optimales pour la porte logique XOR proposée.

II. 4. 4. Porte NOT "NON":

La porte logique NOT (ou NON) peut être utilisée comme ondulateur, générateur de signal codé ou comme commutateur.

A	B
0	1
1	0

Tableau II. 5 : La table de vérité de la porte logique NOT

La porte logique NOT (ou porte inverseuse) est la porte la plus simple des portes logiques. Elle ne possède qu'une seule entrée et produit une sortie complémentaire de cette entrée. Autrement dit, si l'entrée est vraie (1), la sortie sera fausse (0) et vice versa.

La porte NOT peut être utilisée pour inverser le sens de la logique dans un circuit électronique, ou pour convertir des signaux numériques de 0 à 1 ou de 1 à 0. Elle est souvent utilisée en combinaison avec d'autres portes logiques pour réaliser des opérations plus complexes.

Kouddad Elhachemi et **Naoum Rafah** [30], proposent une nouvelle structure de porte logique «NOT» entièrement optique à base d'un cristal photonique bidimensionnel (2D-PhC). Cette structure est optimisée en faisant varier le rayon de la cavité, pour obtenir un facteur de qualité $Q = 1192$, et possède également un port d'entrée et un port de sortie. La taille de la structure est égale à $85,8 \mu\text{m}$. Le rapport de contraste pour la structure proposée entre les niveaux «0» et «1» est de 25,08 dB. Le temps de réponse pour la porte logique est de 8,33 ps, et le débit binaire est calculé à environ 0,12 Tbit/s, la simulation est basée sur les deux méthodes numériques telles que le domaine temporel des différences finies (FDTD) et l'expansion des ondes planes (PWE).

La conception initiale de la porte logique « NOT » tout optique se compose de trois ports qui sont couplés entre eux par une cavité résonnante par un guide d'onde, qui est présenté sur la figure (II. 4)

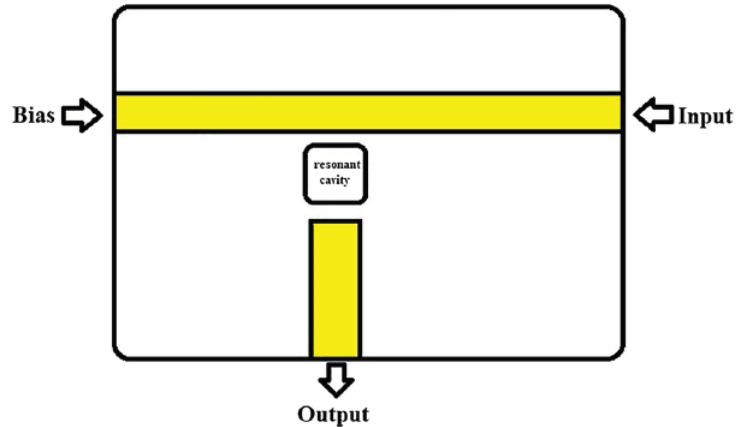


Figure II. 4 : La structure de la porte NOT proposée [30]

Cette structure est optimisée en faisant varier le rayon de la cavité, pour obtenir un facteur de qualité $Q = 1192$, le rayon de la tige de la cavité résonnante a été modifié pour atteindre des performances élevées.

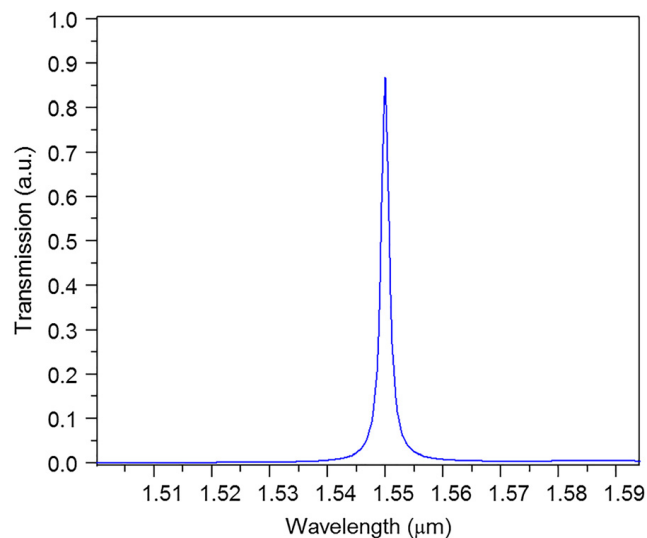


Figure II.4.1 : Plage de niveau de transmission [30]

Le spectre de sortie, présenté à la figure (II. 4. 1), de la porte logique linéaire proposée est de 87 % autour de la longueur d'onde centrale de $\lambda = 1550$ nm où (Bias = 1, Input = 0).

Les états de fonctionnement proposés de la porte logique « NOT » sont résumés dans le tableau (II. 6)

Bias	Entrée	Sortie logique	Rapport de contraste
1	0	1	25,08 dB
1	1	0	

Tableau II. 6 : La puissance optique en sortie pour la porte logique NOT tout optique [30]

Cas 1 : Lorsque « Bias » = 1, « Input » = 0. Le signal optique "Pin" à l'entrée de "Bias" se couple à la cavité résonnante en utilisant un phénomène de piégeage de la lumière et transmis au port de sortie "Output = 1" avec une efficacité de 87 % à une longueur d'onde de $\lambda = 1550$ nm, comme indiqué les figures (II.4.3.a) et (II.4.3.b).

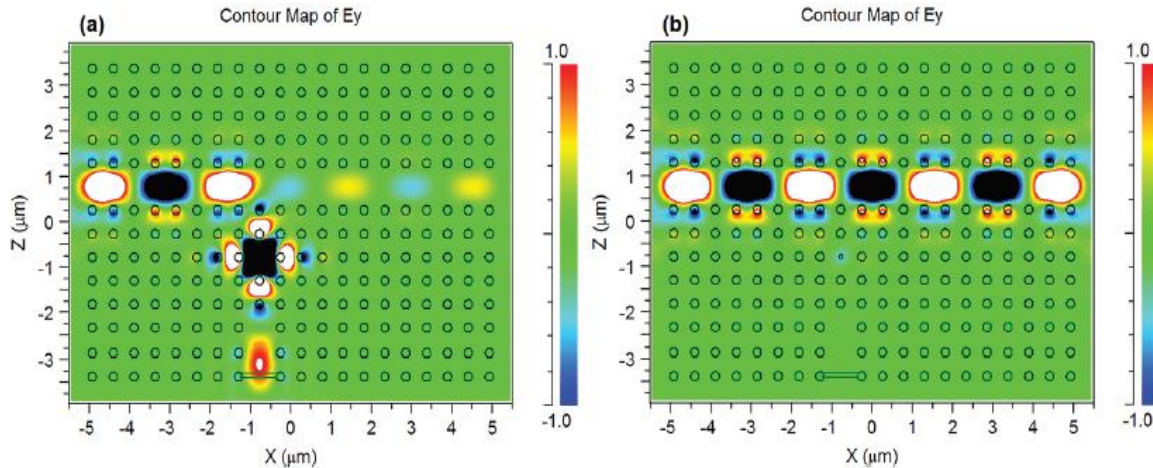


Figure II.4. 2 : Distribution du champ optique pour différents états pour la porte NOT proposée pour : (a) Biais = 1, Entrée = 0. (b) Biais = 1, Entrée = 1 [30]

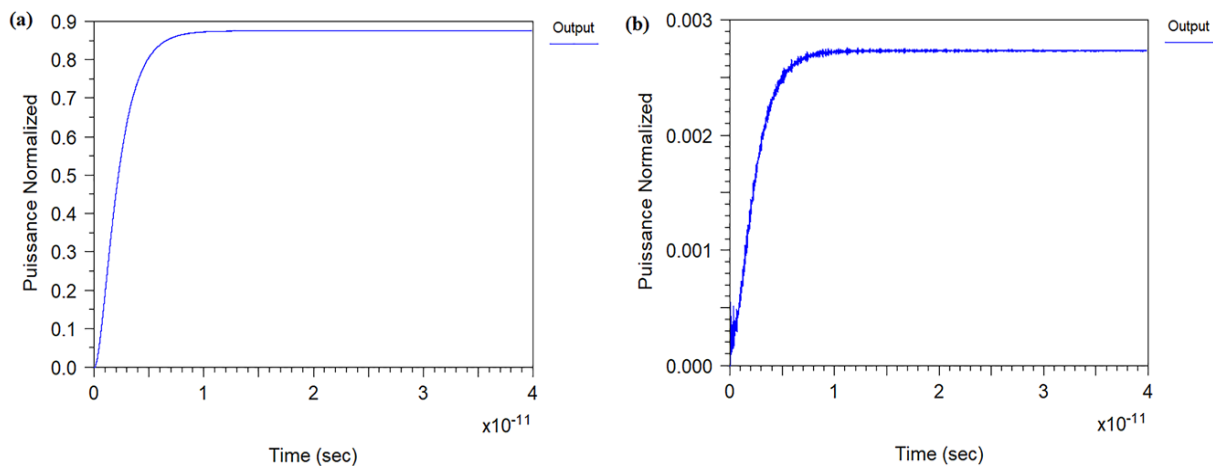


Figure II.4. 3 : Courbe évolutive dans le temps de la porte « NOT » proposée pour : (a) Biais = 1, Entrée = 0. (b) Biais = 1, Entrée = 1 [30]

Cas 2 : A « Bias » = 1, « Input » = 1. Si les deux entrées « Bias » et « Input » sont égales à « 1 », les entrées de signal ont une interférence destructive qui donne un signal de sortie « Output = 0 ». Dans ce cas, le moniteur de sortie reçoit une très faible puissance jusqu'à 0,0027 % de la puissance d'entrée du signal "Pin".

Les résultats obtenus prouvent que la structure proposée peut réellement fonctionner comme une porte logique « NOT » classique.

II. 5. Conclusion :

Ce chapitre décrit d'abord les propriétés et les caractéristiques des portes logiques à base des cristaux photoniques, nous avons abordé une petite comparaison entre les portes logiques électroniques et les portes logiques tout-optiques. Après on a vu les applications de ces portes logiques optiques avec quelques techniques et concepts. Comme mentionné, les portes à cristaux photoniques ont des propriétés uniques dont le principal facteur est le contrôle des défauts créés en tant que cavité et guide d'ondes dans les cristaux photoniques et leur bande interdite. En modifiant les dimensions et la géométrie des tiges diélectriques et le type de réseau cristallin optique, des résultats optimaux peuvent être obtenus pour améliorer les propriétés des portes logiques optiques à base de cristaux photoniques. Enfin, un résumé de certaines conceptions de base des portes logiques optiques et des structures à base des cristaux photoniques ont été étudiées.

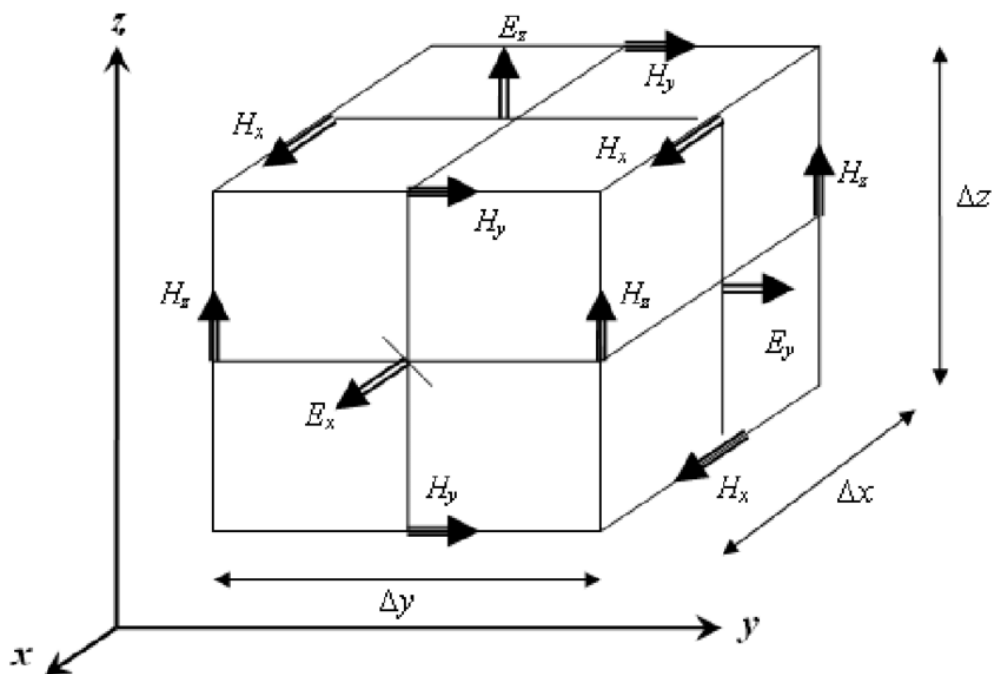
II. 6. Références du chapitre II

- [1]. J. Piard, Des systèmes dispersés dans nos assiettes : une étude au microscope optique, Bull. Un. Prof. Phys. Chim., vol. 106, n° 948, p. 1089-1102, novembre 2012 par Jonathan PIARD, Département de chimie, ENS Cachan 94325 Cachan Cedex, jonathan.piard@ens-cachan.fr
- [2]. M Abdollahi, S Mohammadi, “Insertion loss-aware application mapping onto the optical cube-connected cycles architecture”. *Comput. Elect. Eng.* 82, 106559 (2020)
- [3]. S.V.R. Chittamuru, I.G Thakkar, S Pasricha, Hydra, “Heterodyne crosstalk mitigation with double microring resonators and data encoding for photonic nocs”. *IEEE Trans. Very Large Scale Integration (VLSI) Syst.* 26(1), 168–181 (2017)
- [4]. M Geng, Tang, Z., Chang, K., Huang, X., Zheng, J.: N-port strictly non-blocking optical router based on mach-zehnder optical switch for photonic networks-on-chip. *Opt. Commun.* 383, 472–477 (2017)
- [5]. J Lu, Ren, H., Guo, S., Wu, Z., Qin, Y., Hu, W., Jiang, C.: Wavelength routers with low crosstalk using photonic crystal point defect micro-cavities. *Optik* 127(6), 3235–3242 (2016)
- [6]. Oleg, L. Berman, Vladimir S. Boyko, Roman Ya. Kezerashvili and Yurii E. Lozovik, 2014. *Electromagnetic Wave Propagation in Two-Dimensional Photonic Crystals*, InTech.
- [7]. Joannopoulos. J. D., Johnson. S. G., Winn. J. N., and Meade. R. D. *photonic crystals: Modeling the flow of light*, Second Ed Princeton university Press.2008
- [8]. S. Foteinopoulou, *Electromagnetic wave propagation in two-dimensional photonic crystals. Retrospective Theses and Dissertations*, 2003.
- [9]. Shi, L., Yin, H., Zhu, X., Liu, X. and Zi, J., Direct observation of iso-frequency contour of surface modes in defective photonic crystals in real space. *Applied Physics Letters*,97(25), p.251111.2010.
- [10]. Xin, Q., Duhm, S., Bussolotti, F., Akaike, K., Kubozono, Y., Aoki, H., Kosugi, T., Kera, S. and Ueno, N. Accessing surface brillouin zone and band structure of picene single crystals. *Physical review letters*, 108(22), p.226401, 2012.
- [11]. Salmanpour, A., Mohammadnejad, S. and Bahrami, A., Photonic crystal logic gates: an overview. *Optical and Quantum Electronics*, 47(7), pp.2249-2275, 2014.
- [12]. Ahmadi Tameh, T., Isfahani, B., Granpayeh, N. and Javan, A. Improving the performance of all-optical switching based on nonlinear photonic Crystal microring resonators. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 65(4) pp.281-287. 2011.
- [13]. Mehdizadeh, F., Alipour-Banaei, H. and Serajmohammadi, S., 2013. Channel-drop filter based on a photonic crystal ring resonator. *Journal of Optics*, 15(7), p.075401
- [14]. Jiao SM, Liu JW, Zhang LW, Yu FH, Zuo GM et al. « All-optical logic gate computing for high-speed parallel information processing. *Opto-Electron Sci* 1, 220010 (2022).doi: 10.29026/oes.2022.220010
- [15]. Sharifi, Hojjat & Maleknejad, Mojtaba. (2021). Multi-functional all-optical photonic crystal logic gate using nonlinear directional coupler. *Optical and Quantum Electronics*. 53. 10.1007/s11082-021-03335-7.
- [16]. G.New, *Introduction to Nonlinear Optics*. 1st ed. New York: Cambridge University Press; 2011.
- [17]. H. Alipour-Banaei, Rabati, M., Abdollahzadeh-Badelbou, P. and Mehdizadeh, F. Application of self-collimated beams to realization of all optical photonic crystal encoder. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 75, pp.77-85, 2016.
- [18]. Yang, Y., Lin, K., Yang, I., Lee, K., Lin, Y., Lee, W. and Tsai, Y. All-optical photonic 190 crystal AND gate with multiple operating wavelengths. *Optics Communications*, 297, pp.165- 168, 2013.
- [19]. Younis, R.M., Areed, N.F. and Obayya, S.S, Fully integrated AND and OR optical logic gates. *IEEE Photonics Technology Letters*, 26(19), pp.1900-1903,2014.

- [20]. Lee, K.Y., Lin, J.M., Yang, Y.C., Yang, Y.B., Wu, J.S., Lin, Y.J. and Lee, W.Y, November. The designs of XOR logic gates based on photonic crystals. I Optoelectronic Materials and Devices International Society for Optics and Photonics.III (Vol. 7135, p. 71353Y), 2008.
- [21]. Tang, C., Dou, X., Lin, Y., Yin, H., Wu, B. and Zhao, Q., 2014. Design of all-optical logic gates avoiding external phase shifters in a two dimensional photonic crystal based on multimode interference for BPSK signals. *Optics Communications*, 316, pp.49-55
- [22]. J. Bao, Xiao, J., Fan, L., Li, X., Hai, Y., Zhang, T. and Yang, C. All-optical NOR and NAND gates based on photonic crystal ring resonator. *Optics Communications* 329.109-112. 2014
- [23]. H. Alipour-Banaei, S. Serajmohammadi and F Mehdizadeh, "All optical NOR and NAND gate based on nonlinear photonic crystal ring resonators". *Optik*, 125.5701-5704. 2014.
- [24]. Haxha, S. and Ademgil, H., Novel design of photonic crystal fibres with low confinement losses, nearly zero ultra-flatted chromatic dispersion, negative chromatic dispersion and improved effective mode area. *Optics communications*, 281(2).278 286, 2008.
- [25]. T. Wu, Shao, Y, Wang, Y., Cao, S., Cao, W., Zhang, F., Liao, C., He, J., Huang, Y., Hou, M. and Wang, Y., Surface plasmon resonance biosensor based on gold-coated sidepolished hexagonal structure photonic crystal fiber. *Optics express*, 25.20313-20322, 2017.
- [26]. Nilesh Kumar Yadav & all. Designing and Analysis of all optical XOR, NOT, OR and AND Logic Gates Based On 2D Photonic Crystals T-shaped Waveguide. *Optical and Quantum Electronics*. Doi: 10.1007/s11082-022-04532-8.
- [27]. Prabha, K. & Robinson, S. Ultra Compact, High Contrast Ratio Based all Optical OR Gate Using Two Dimensional Photonic Crystals. *Silicon*. 13. 1-9. 10.1007/s12633-020-00811-9. (2021)
- [28]. R. Arunkumar & Kavitha, V. & Prabha, K. & Latha, K. & Robinson, S Investigation on ultra-compact, high contrast ratio 2D-photonic crystal based all optical 4×2 encoder. *Optical and Quantum Electronics*. 54. 10.1007/s11082-021-03488-5. (2022).
- [29]. L.Kun.Yi and Jhe-Min Lin and Yi-Cheng Yang and Yi-Bin Yang and Jia-Sing Wu and Yen-Juei Lin and Wei-Yu Lee, he designs of XOR logic gates based on photonic crystals. *Optoelectronic Materials and Devices*, SPIE, doi.org/10.1117/12.803465. 2008.
- [30]. E, Kouddad & Naoum, Rafah. A novel proposal based on 2D linear resonant cavity photonic crystals for all-optical NOT, XOR and XNOR logic gates. *Journal of Optical Communications*. DOI: 10.1515/joc-2020-0184. (2020).
- [31]. M.Ibnoussina, Mesure du déphasage non-linéaire par détection hétérodyne en optique guidée. Thèse de doctorat, Université de Bourgogne. Département photonique. (2022).France.

Chapitre III

Outils de modélisation des structures à cristaux photoniques



Chapitre III : Outils de modélisation des structures à cristaux photoniques

III. 1. Introduction :

Le développement des méthodes de modélisation optiques précises et rapides est primordial pour l'étude des structures à base des cristaux photoniques. Plusieurs méthodes analytique et numérique figuré pour analyser et étudier les caractéristiques et performances des structures photoniques proposées. Parmi ces modèles théoriques traitant les structures à cristaux photoniques, on trouve la méthode des éléments finis (FEM), la méthode des ondes planes (PWE) et la méthode des différences finies dans le domaine du temps (FDTD), Chaque méthode présente des avantages et des inconvénients qui lui sont propres. Parmi les méthodes les plus utilisées et efficaces figurent la méthode des ondes planes pour la détermination des bandes interdites photoniques et la méthode FDTD pour l'analyse de la propagation et de la distribution du champ électromagnétique dans les dispositifs optiques basés sur les cristaux photoniques. Dans notre étude, nous avons employé la méthode FDTD avec le logiciel FullWave et la méthode PWE avec le logiciel RSoft de RSoft CAD pour modéliser des structures en une, deux et trois dimensions. Chaque méthode a ses propres avantages et inconvénients, et chacune de ces méthodes de calcul est complémentaire l'une de l'autre pour offrir des informations nécessaires à la compréhension du fonctionnement des cristaux photoniques. [1]

Dans le cadre de cette thèse, nous utilisons deux modules du logiciel de simulation RSoft CAD, à savoir BandSolve et FullWave, pour mener des simulations. Ces modules reposent respectivement sur les méthodes des ondes planes et FDTD.

III. 2. Méthode des éléments finis (FEM) :

La méthode des éléments finis consiste à diviser un problème complexe en un certain nombre de petites parties ou d'éléments finis. Chacun de ces éléments est considéré comme une petite partie du problème total, et les équations mathématiques correspondantes sont résolues pour chaque élément. Les résultats obtenus pour chaque élément sont ensuite assemblés pour obtenir une solution globale du problème [2].

Cette méthode est basée sur des principes de calcul différentiel et intégral, ainsi que sur la théorie des équations aux dérivées partielles. Elle est largement utilisée pour résoudre des problèmes qui ne peuvent pas être résolus par des méthodes analytiques, telles que les équations de Navier-Stokes pour la mécanique des fluides, les équations de Maxwell pour l'électromagnétisme, ou les équations d'élasticité pour la mécanique des structures.

- Au début, les équations aux dérivées partielles sont écrites sous une forme variationnelle vérifiée pour des fonctions test appartenant à un espace vectoriel bien défini.
- Résolution des EDPs et conditions aux limites : La discrétisation des formulations intégrales obtenues à l'aide de la formulation variationnelle est faite par une décomposition de la structure en éléments géométriques de formes simple (figure (III. 1)), pour les structures planes, on utilise le plus souvent des triangles et pour des problèmes tridimensionnels, ce sont typiquement des tétraèdres.

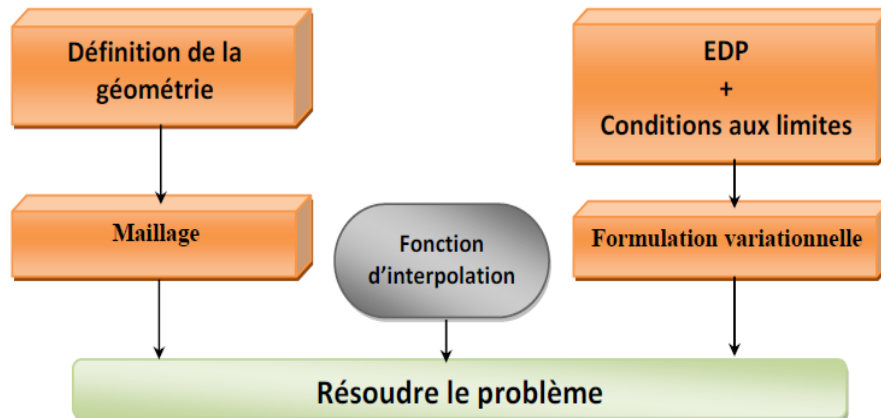


Figure III. 1 : Les étapes de résolution de problèmes dans la méthode des éléments finis [02]

- La résolution de l'EDP donne une solution approximée par des fonctions d'interpolation à chaque nœud du réseau des FEM, sachant que les fonctions de forme (les polynômes de Lagrange) sont définies localement sur chaque nœud du domaine, en respectant ses conditions aux limites.
- Finalement la solution développée sur une base discrète de fonctions d'interpolation est connue et continue sur tout le domaine et l'approximation n'est pas valable qu'aux problèmes d'EDP du second ordre.

Le maillage de la méthode des éléments finis est son avantage par rapport aux autres méthodes car l'utilisation du maillage très petit devant la longueur d'onde permet à des logiciels commerciaux en micro-onde de traiter des structures complexes et de visualiser les champs.

La méthode FEM nécessite un grand espace mémoire pour la résolution des structures complexes et des calculs assez élevés et des formulations mathématiques assez importantes.

La méthode des éléments finis est une méthode très flexible, qui peut être utilisée pour résoudre des problèmes dans des domaines très différents, en utilisant des éléments différents et des formulations mathématiques différentes. Elle est également très efficace pour résoudre des problèmes complexes, car elle permet de diviser un problème en petits éléments, ce qui facilite la résolution de chaque élément individuellement.

III. 3.Méthode de matrice de transfert (TMM) :

La méthode de matrice de transfert est une technique mathématique utilisée pour analyser le comportement des signaux électriques ou optiques lorsqu'ils se propagent à travers différents types de matériaux ou de structures. Elle est souvent utilisée dans la conception et l'analyse de systèmes de communication, de réseaux de fibres optiques, de circuits électroniques, de filtres et d'autres dispositifs.

La méthode de matrice de transfert utilise des matrices pour représenter la propagation d'un signal à travers un système. Les matrices de transfert sont utilisées pour décrire les effets de la réflexion, de la transmission et de la dispersion des signaux lorsqu'ils se propagent à travers différents types de matériaux ou de structures.

La méthode de matrice de transfert peut être utilisée pour analyser des systèmes complexes, tels que des réseaux de fibres optiques ou des circuits électroniques intégrés. Elle permet de prédire le comportement des signaux à différentes fréquences et de concevoir des dispositifs qui répondent à des exigences spécifiques en matière de bande passante, de gain, de bruit et d'autres paramètres.

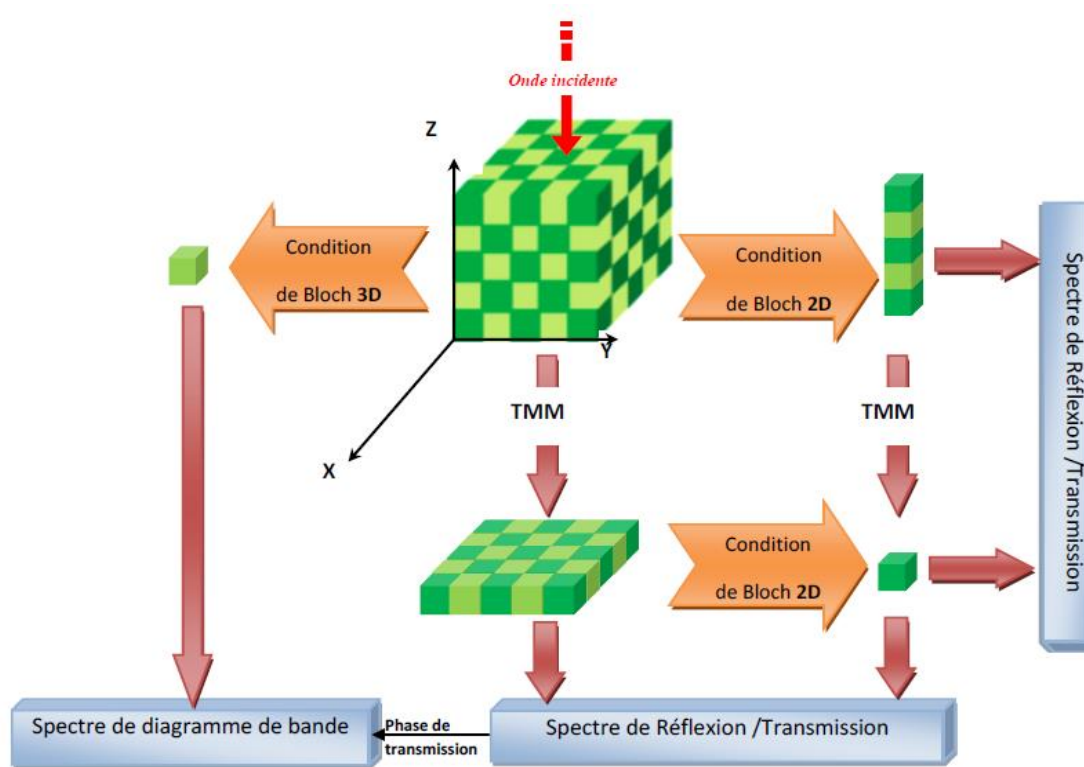


Figure III. 2 : Réduction du domaine de calcul par la combinaison de la matrice de transfert et les conditions de Bloch-Floque

Cette méthode est très demandée pour calculer les propriétés optiques des structures de 1D finies, elle permet de calculer le spectre de transmission et de réflexion du cristal photonique. Le maillage était à l'origine cartésien, mais une méthode de transformation des coordonnées donne aujourd'hui de meilleurs résultats.

En optique, la matrice de transfert est définie comme une matrice mathématique qui permet de relier les propriétés du champ électromagnétique incident à celles du champ électromagnétique transmis par un système optique. Elle décrit donc la manière dont la lumière est modifiée en traversant le système optique en question. La matrice de transfert peut être utilisée pour analyser et optimiser les performances de différents composants optiques tels que les lentilles, les miroirs, les filtres, etc.

L'un des principaux avantages de la matrice de transfert en optique est sa capacité à permettre une analyse rapide et précise des systèmes optiques. En utilisant la matrice de transfert, il est possible de prédire les propriétés du champ électromagnétique transmis pour un système donné, en connaissant simplement les propriétés du champ électromagnétique incident et les caractéristiques du système optique.

La matrice de transfert est également utile pour l'optimisation des systèmes optiques, car elle permet de déterminer rapidement comment les changements dans les propriétés du champ électromagnétique incident ou les caractéristiques du système optique affecteront les propriétés du champ électromagnétique transmis. En utilisant cette méthode, les ingénieurs et les scientifiques peuvent concevoir des systèmes optiques plus efficaces et mieux adaptés à leurs besoins [3].

III. 4. Méthode de décomposition en ondes plane (PWM) :

La méthode de décomposition en ondes planes (ou DOP pour Decomposition of Plane Waves) est une technique mathématique utilisée pour analyser le comportement des ondes électromagnétiques lorsqu'elles se propagent dans des milieux complexes. Cette méthode permet de décomposer une onde électromagnétique en une somme d'ondes planes, chacune se propageant dans une direction différente [4][5]. La DOP est basée sur la représentation de l'onde électromagnétique en tant que somme de fonctions harmoniques de Fourier. Cette représentation permet de décomposer l'onde en une série de composantes d'ondes planes, chacune ayant une amplitude, une phase et un vecteur d'onde propre. Cette décomposition est effectuée à l'aide d'une transformation de Fourier rapide, ce qui permet une analyse rapide et efficace de l'onde [6][7].

La PWE peut également s'appliquer à toutes les structures dont la constante diélectrique est une fonction périodique de l'espace et qui est basée sur :

- La décomposition du champ électromagnétique sur une base finie de N ondes planes (N série de Fourier) utilisant les vecteurs réciproques du cristal.
- Le théorème de Bloch appliqué pour décomposer le champ E/M sur une base d'ondes planes périodiques suivant les directions de la périodicité de structure photonique.
- En exprimant les conditions aux limites périodiques et de transformer la résolution des équations de Maxwell en un problème classique (diagonalisation de matrice) de recherche de valeurs propres.
- Ce dernier permet de calculer les modes de propagation des ondes et permet d'obtenir les relations de dispersion reliant la fréquence au vecteur d'onde.

La résolution des équations de Maxwell est généralement la première étape dans la modélisation d'un problème électromagnétique impliquant des structures périodiques.

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \right) \quad \text{III. 01}$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \quad \text{III. 02}$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) \quad \text{III. 03}$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} \right) \quad \text{III. 04}$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} \right) \quad \text{III. 05}$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \right) \quad \text{III. 06}$$

Ces équations conduisent à une équation d'onde connue sous le nom d'équation de Helmholtz dans des milieux linéaires, isotropes et non magnétiques (c'est-à-dire avec une perméabilité magnétique relative égale à 1), en l'absence de charge et de courant [3] :

$$\vec{\nabla} \times \left(\frac{1}{\varepsilon_r(\vec{r})} \vec{\nabla} \times \vec{E}(\vec{r}, t) \right) + \mu_0 \varepsilon_0 \cdot \frac{\partial^2}{\partial t^2} \vec{E}(\vec{r}, t) = 0 \quad \text{III. 07}$$

$$\vec{\nabla} \times \left(\frac{1}{\varepsilon_r(\vec{r})} \vec{\nabla} \times \vec{H}(\vec{r}, t) \right) + \mu_0 \varepsilon_0 \cdot \frac{\partial^2}{\partial t^2} \vec{H}(\vec{r}, t) = 0 \quad \text{III. 08}$$

Il est possible d'écrire le champ $\vec{E}(\vec{r}, T)$ et $\vec{H}(\vec{r}, t)$ sous la forme d'ondes planes de la forme :

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}(\vec{r}) \cdot e^{j\omega t} \quad \text{III. 09}$$

$$\vec{H}(\vec{r}, t) = \vec{H}(\vec{r}) \cdot e^{j\omega t} \quad \text{III. 10}$$

Où $\vec{E}(\vec{r})$ est une fonction vectorielle périodique telle que : $\vec{E}(\vec{r}) = \vec{E}(\vec{r} + T)$ Avec ces formes et en simplifiant les équations (III. 07 et III. 08), on obtient :

$$\vec{\nabla} \times \left(\vec{\nabla} \times \vec{E}(\vec{r}) \right) - \frac{\omega^2}{c^2} \cdot \varepsilon_r(\vec{r}) \vec{E}(\vec{r}) = 0 \quad \text{III. 11}$$

$$\vec{\nabla} \times \left(\vec{\nabla} \times \vec{H}(\vec{r}) \right) - \frac{\omega^2}{c^2} \cdot \varepsilon_r(\vec{r}) \vec{H}(\vec{r}) = 0 \quad \text{III. 12}$$

Il est possible de développer toutes les fonctions périodiques en séries de Fourier dans l'espace réciproque. Cela s'applique également à la permittivité diélectrique $\varepsilon_r(\vec{r})$ des cristaux photoniques, qui est périodique le long des vecteurs du réseau réciproque. Les champs électrique et magnétique peuvent également être décomposés en termes des composantes de la série de Fourier le long des vecteurs du réseau réciproque.

En utilisant cette méthode, il est possible de développer $\varepsilon_r(\vec{r})$, en séries de Fourier, et il est également pratique de développer l'inverse de cette fonction en séries de Fourier:

$$\varepsilon_r(\vec{r}) = \sum_{\vec{G}} \varepsilon_r(\vec{G}) \cdot e^{j\vec{G}\vec{r}} \quad \text{III. 13}$$

$$\frac{1}{\varepsilon_r(\vec{r})} = \sum_{\vec{G}} \chi(\vec{G}) \cdot e^{j\vec{G}\vec{r}} \quad \text{III. 14}$$

$\chi(\vec{G})$: Les coefficients de Fourier.

Les champs $\vec{E}(\vec{r})$ et $\vec{H}(\vec{r})$ satisfont au théorème de Bloch et peuvent être décomposés sous la forme :

$$\vec{E}(\vec{r}) = u_{\vec{k}}(\vec{r}) \cdot e^{j\vec{k}\vec{r}} \text{ et } \vec{H}(\vec{r}) = v_{\vec{k}}(\vec{r}) \cdot e^{j\vec{k}\vec{r}} \quad \text{III. 15}$$

$$\vec{E}(\vec{r}) = u_{\vec{k}}(\vec{r}) \cdot e^{j\vec{k}\vec{r}} = \left[\sum_{\vec{G}} u_{\vec{k}}(\vec{G}) \cdot e^{j\vec{G}\vec{r}} \right] \cdot e^{j\vec{k}\vec{r}} = \sum_{\vec{G}} u_{\vec{k}}(\vec{G}) \cdot e^{j(\vec{G}+\vec{k})\vec{r}} \quad \text{III. 16}$$

$$\vec{H}(\vec{r}) = v_{\vec{k}}(\vec{r}) \cdot e^{j\vec{k}\vec{r}} = \left[\sum_{\vec{G}} v_{\vec{k}}(\vec{G}) \cdot e^{j\vec{G}\vec{r}} \right] \cdot e^{j\vec{k}\vec{r}} = \sum_{\vec{G}} v_{\vec{k}}(\vec{G}) \cdot e^{j(\vec{G}+\vec{k})\vec{r}} \quad \text{III. 17}$$

\vec{k} : Le vecteur d'onde appartenant à la première zone de Brillouin.

$u_{\vec{k}}(\vec{r})$ et $v_{\vec{k}}(\vec{r})$: Les fonctions de Bloch possédant toutes les périodicités du milieu.

\vec{G} est un vecteur du réseau réciproque.

$\varepsilon_r(\vec{G})$, $u_{\vec{k}}(\vec{G})$ et $v_{\vec{k}}(\vec{G})$: Les composantes dans l'espace réciproque que l'on peut déterminer pour une intégrale de Fourier [8].

La méthode de décomposition en ondes planes est largement utilisée dans l'industrie de la télécommunication et de l'électronique pour concevoir des dispositifs optiques tels que des filtres optiques, des guides d'ondes et des réseaux de diffraction. Elle est également utilisée dans la simulation numérique de la propagation des ondes électromagnétiques dans les matériaux et les structures complexes.

III. 5. Méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD) :

La méthode des différences finies dans le domaine temporel est une technique numérique utilisée pour résoudre des équations différentielles ordinaires (EDPs) ou partielles en discrétisant le domaine temporel en intervalles égaux. Cette méthode est basée sur l'approximation de la dérivée temporelle d'une fonction par une différence finie [9].

Le principe de base est de discrétiser le temps en intervalles égaux, appelés pas de temps, et d'approximer la dérivée temporelle de la fonction par une différence finie. Cette différence finie est calculée à partir des valeurs de la fonction aux instants précédant et suivant, et permet de calculer la valeur de la fonction à l'instant suivant [10].

Il existe plusieurs types de différences finies, notamment les différences finies centrées, les différences finies arrière et les différences finies avant. La méthode des différences finies centrées est généralement considérée comme la plus précise, car elle utilise les valeurs de la fonction à la fois avant et après l'instant de calcul.

Une fois que la dérivée temporelle est approximée par une différence finie, l'équation différentielle est transformée en une équation aux différences finies, qui peut être résolue par une méthode numérique appropriée. Cette méthode permet de calculer la valeur de la fonction à chaque pas de temps, en utilisant les valeurs calculées aux pas de temps précédents.

La méthode des différences finies dans le domaine temporel est largement utilisée dans de nombreux domaines de la physique, notamment pour résoudre les équations de la mécanique des fluides, de la thermodynamique et de l'électromagnétisme. Elle est également utilisée dans de nombreux domaines de l'ingénierie, notamment pour la simulation numérique de systèmes dynamiques et pour la conception de systèmes de contrôle [11].

La FDTD est appliquée aussi dans les micro-ondes (antennes, interaction onde/matière comme les radars et téléphones portables/humains), l'optique intégrée (filtres à insertion/extraction, guides et cavités à base des structures périodiques), etc.

Les intérêts et limitations de cette technique sont basés essentiellement sur les points suivants :

- On peut modéliser le comportement d'une onde électromagnétique dans tout type de milieu (diélectrique, métal, plasma...) et de structures aux géométries complexes dont les matériaux peuvent être anisotropes ou inhomogènes.
- La FDTD donne la possibilité d'intégrer dans l'algorithme de résolution de nombreuses sources des profils spatiaux (modes guidés, ondes planes, source ponctuelle) et des profils temporels divers (harmoniques, impulsions...).
- Le schéma de calcul étant entièrement explicite en temps : il n'y a pas de système linéaire à résoudre et il demande peu de stockage.
- Le calcul de toutes les composantes du champ à tous les instants et sur tous les domaines permet d'obtenir des spectres en fréquence en divers points de la structure grâce à l'utilisation de la transformée de Fourier.
- L'utilisation de conditions aux limites adaptées aux fortes diffractions qui apparaissent dans les cristaux photoniques.

- L'une des limitations les plus importantes tient à l'uniformité et à une discrétisation en mailles régulières qui requiert des temps de calcul parfois élevés et limite considérablement les dimensions des structures modélisables.
- La méthode FDTD présente les inconvénients d'être très consommatrice de mémoire, de présenter des temps de calculs très longs car les champs sont calculés en chaque point de la cellule et la précision du maillage influe sur le résultat, et de proposer des informations limitées pour l'interprétation physique des résultats en raison de son caractère non modal.
- La FDTD impose des difficultés de modélisation des matériaux dispersifs. Les conditions aux limites approchées introduisent une approximation qui peut avoir une influence sur la précision du calcul [3].

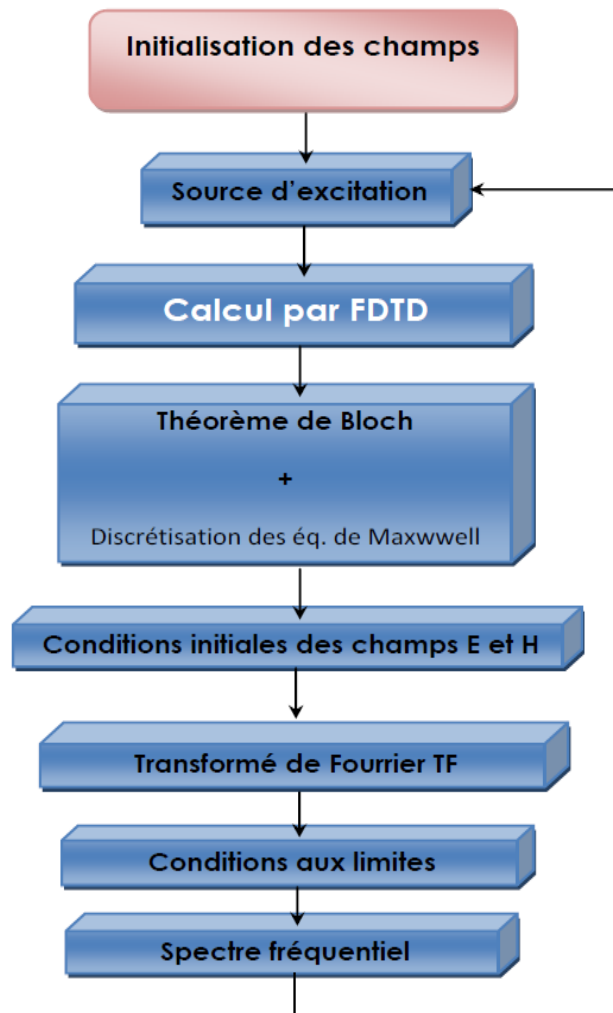


Figure III. 3 : Algorithme de la méthode FDTD

III. 6. Présentation du logiciel RSoft CAD

RSoft CAD est un logiciel de simulation optique qui permet de modéliser, de simuler et de concevoir des dispositifs optiques tels que des fibres optiques, des guides d'ondes, des amplificateurs optiques, des réseaux de diffraction et des réseaux de Bragg. Il est principalement utilisé dans les domaines de la communication optique, de la photonique et de la microélectronique.

- RSoft CAD est capable de résoudre des équations complexes de Maxwell pour modéliser le comportement des dispositifs optiques. Il utilise une approche de la méthode des éléments finis pour la résolution numérique des équations de Maxwell, ce qui permet de prendre en compte les interactions entre les différentes parties du dispositif.
- Le logiciel propose une interface graphique intuitive qui permet aux utilisateurs de créer et de visualiser les dispositifs optiques en 3D, ainsi que de définir les matériaux et les paramètres optiques associés. Il propose également une bibliothèque de composants optiques préconçus, tels que des lentilles, des polariseurs et des miroirs, pour faciliter la conception de dispositifs optiques plus complexes.
- RSoft CAD permet également d'analyser les résultats de la simulation en termes de performance optique, tels que la transmission, la dispersion, la polarisation et la réponse spectrale. Il propose des outils d'analyse avancés tels que la transformée de Fourier rapide (FFT), la méthode de calcul des modes vectoriels (VMM), la méthode de propagation des rayons (RPM) et la méthode de matrice de transfert (TMM).
- RSoft CAD est largement utilisé dans l'industrie de la communication optique et de la photonique, ainsi que dans le domaine de la recherche en optique. Il est utilisé pour la conception et la simulation de dispositifs optiques tels que les fibres optiques, les lasers, les détecteurs optiques, les réseaux de Bragg et les réseaux de diffraction.
- Il agit en tant que programme de gestion pour les modules passifs de simulation du dispositif de RSoft « Beam PROP, FullWave, Band SOLVE, Grating MOD et Diffract MOD » chaque module assure une fonction bien précise.

III. 6. 1. Le simulateur « FullWave »

FullWave est un logiciel de simulation électromagnétique basé sur la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD). Il est principalement utilisé dans les domaines de la photonique, de l'électronique et de la microélectronique pour la conception et l'analyse de dispositifs optiques et électroniques, tels que les guides d'ondes, les antennes, les circuits imprimés, les filtres et les dispositifs de capteurs.

FullWave utilise une approche FDTD pour résoudre les équations de Maxwell, ce qui permet de prendre en compte les interactions électromagnétiques entre les différentes parties du dispositif. Il peut simuler les propriétés optiques et électriques de matériaux isotropes et anisotropes, ainsi que les interfaces entre différents matériaux.

Le logiciel propose une interface graphique conviviale qui permet aux utilisateurs de créer et de visualiser les dispositifs en 3D, ainsi que de définir les matériaux et les paramètres physiques associés. FullWave propose également une bibliothèque de composants préconçus pour faciliter la conception de dispositifs plus complexes.

FullWave permet d'analyser les résultats de la simulation en termes de champ électrique et magnétique, de dispersion, de réflexion, de transmission et de réponse spectrale. Il propose également des outils d'analyse avancés tels que la transformée de Fourier rapide (FFT), la méthode des moments (MoM), la méthode des différences finies dans le domaine fréquentiel (FDFD) et la méthode de rayonnement intégrale (IRM).

FullWave est largement utilisé dans l'industrie et la recherche en photonique, électronique et microélectronique. Il est utilisé pour la conception et l'analyse de dispositifs tels que les guides d'ondes, les antennes, les circuits imprimés, les filtres, les capteurs et les composants optiques et électroniques [12].

III. 6. 2. Le simulateur « BandSolve »

BandSolve est un moteur de simulation pour la génération et l'analyse des structures à bandes interdites photoniques. Il est basé sur une implémentation optimisée de la technique de la méthode des ondes planes pour des structures périodiques [13].

BandSolve est un logiciel de simulation de structures périodiques pour la modélisation et la conception de dispositifs photoniques, tels que les cristaux photoniques, les guides d'ondes à cristal photonique et les résonateurs optiques. Il utilise une méthode basée sur la théorie de la perturbation pour calculer les modes de Bloch et les bandes de dispersion de ces structures.

BandSolve permet de calculer les modes de Bloch et les bandes de dispersion de structures périodiques en trois dimensions, ainsi que de calculer les modes de surface et les modes de cavité. Le logiciel propose une interface graphique intuitive qui permet aux utilisateurs de définir les paramètres de la structure périodique, tels que la période, la forme, les dimensions, les matériaux et les indices de réfraction.

BandSolve permet également d'analyser les résultats de la simulation en termes de modes de Bloch, de bandes de dispersion et de densité d'états. Il permet également de calculer les constantes diélectriques effectives, les coefficients de réflexion et de transmission, et les densités de courant électrique.

BandSolve est largement utilisé dans l'industrie et la recherche en photonique pour la conception de dispositifs photoniques périodiques, tels que les guides d'ondes à cristal photonique, les filtres à bande interdite, les lasers à cristal photonique et les résonateurs optiques [14] [15].

III. 6. 3. Fenêtre de programme de CAD.

La fenêtre de programme CAD est équipée d'une barre de menus en haut de la fenêtre, ainsi qu'une barre d'outils contenant plusieurs icônes et une ligne d'état (figure III. 4). Les menus donnent accès aux différents dossiers standards et aux opérations d'édition. La ligne d'état fournit des informations sur le mode courant de disposition, avec l'affichage du même rang pendant le dessin [16].

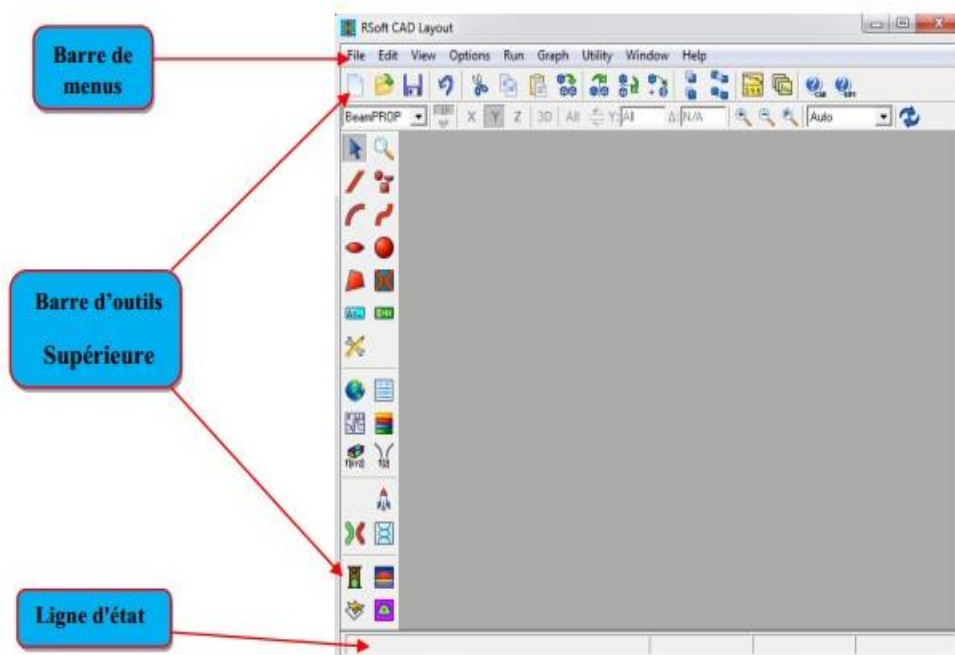



Figure III. 4 : La barre de menus du programme RSoft CAD

III. 6. 4. Exemple de création d'un nouveau circuit :

Pour créer un nouveau circuit, cliquer sur l'icône New circuit  dans la barre d'outils supérieure. Alternativement, choisir File/New du menu. Le dialogue de démarrage apparaît (Figure III. 5). Ce dialogue donne des informations de base sur le circuit.

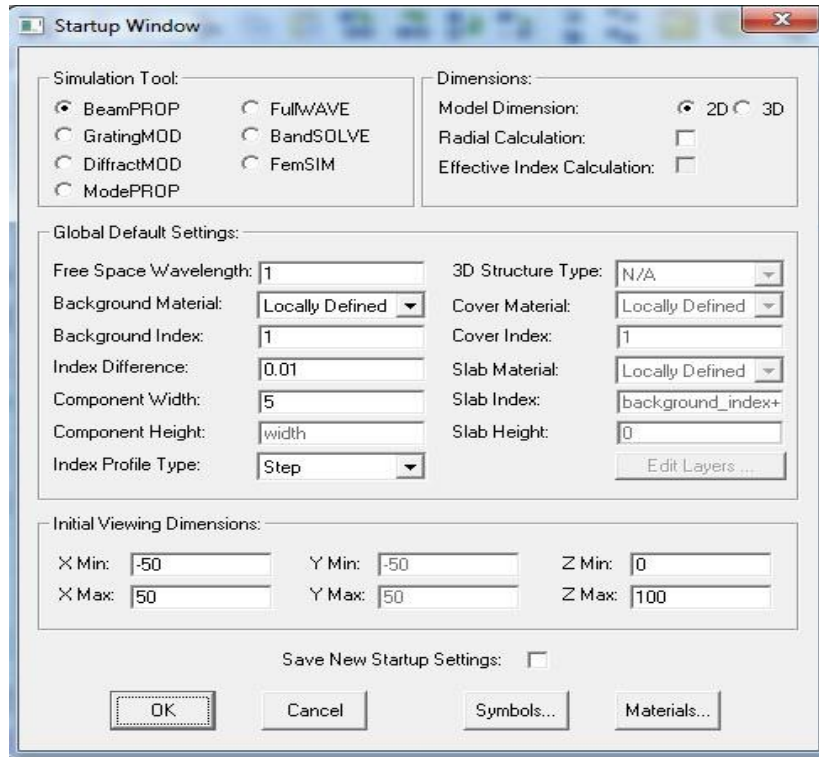


Figure III. 5 : La fenêtre de démarrage.

Pour paramétrer la simulation, il est nécessaire de définir la différence d'indice (Index Difference) qui représente la différence d'indice par défaut entre la couche guidante et l'indice de substrat (Background Index). De plus, il faut sélectionner le type de polarisation (Mode TE ou Mode TM). Cette option permet également de choisir le module de simulation approprié parmi les six modules disponibles dans le logiciel RSoft BandSolve, FullWave, BeamPROP/BPM ou GratingMOD.

Après cette étape on clique sur le bouton OK, puis on obtiendra la fenêtre représentée sur la Figure. (III. 6).

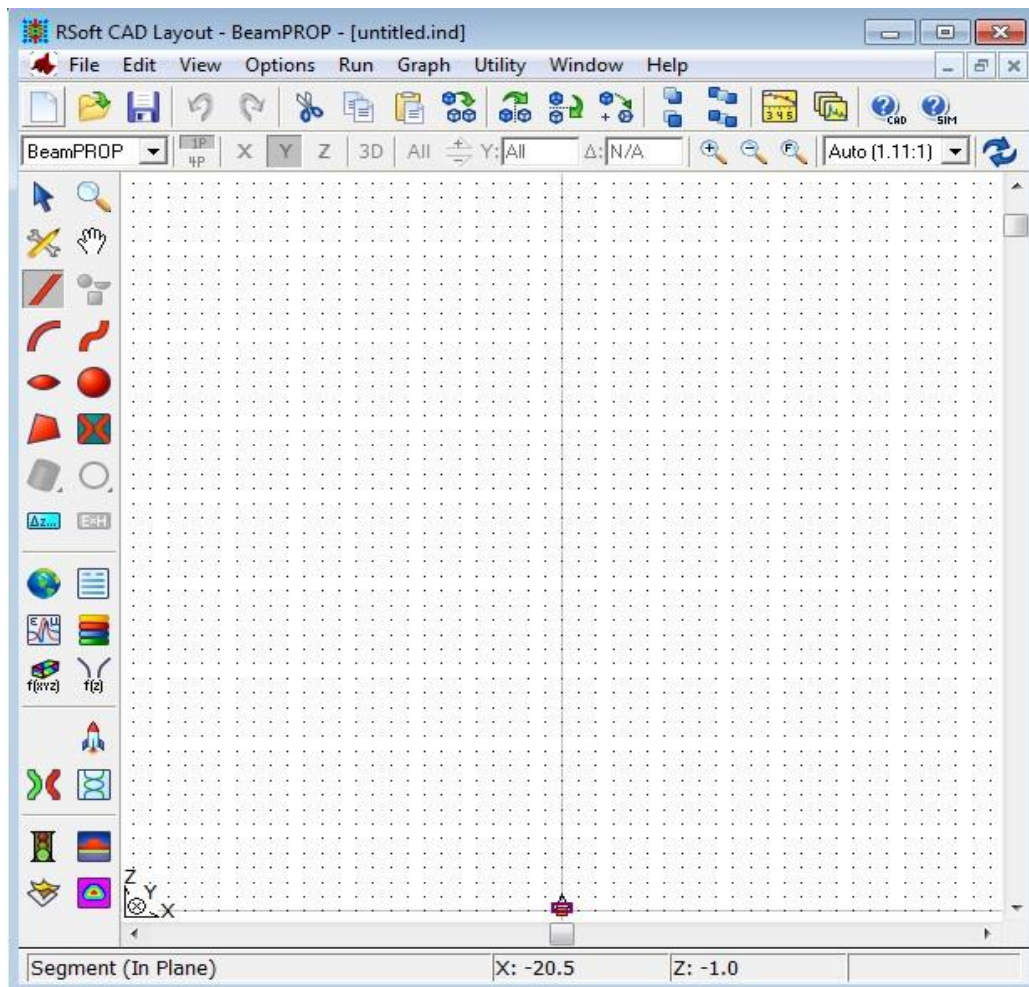


Figure III. 6 : Nouvelle fenêtre pour réaliser un nouveau composant ou nouveau circuit.

III. 6. 5. Structure d'un cristal photonique

Cette partie expliquera la création des réseaux en cristal photonique dans l'interface de CAD, et puis l'analyse de ces réseaux en utilisant la méthode de FDTD dans FullWave.

1) Présentation de la structure

Il existe différentes méthodes pour créer une structure de réseau dans l'interface de CAD. La méthode la plus simple consiste à utiliser l'une des nombreuses fonctionnalités de disposition disponibles avec FullWave pour accélérer la création du réseau. [20]. Pour créer ce réseau en utilisant Array Layout XZ, on place les paramètres comme indiqué sur la figure III.07 (a), On clique sur le bouton ok on obtient la structure sur la figure (III. 07. b).

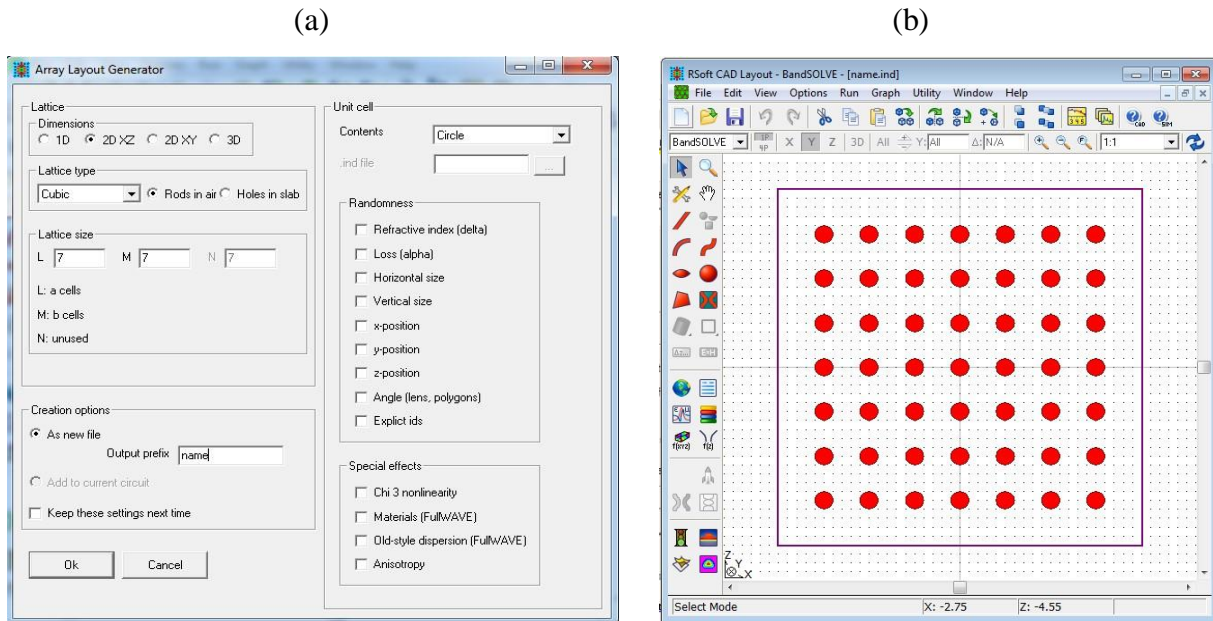



Figure III. 7 :(a) Arrangements de disposition de la rangée XZ, (b) Disposition de rangée dans la fenêtre de CAD.

2) Personnalisation de réseau

Le bouton  Global Settings Window est utilisé pour définir le module de simulation BandSolve ou FullWave parmi les autres méthodes qui existent à RSoft (BeamPROP/BPM BandSolve ou GratingMOD).

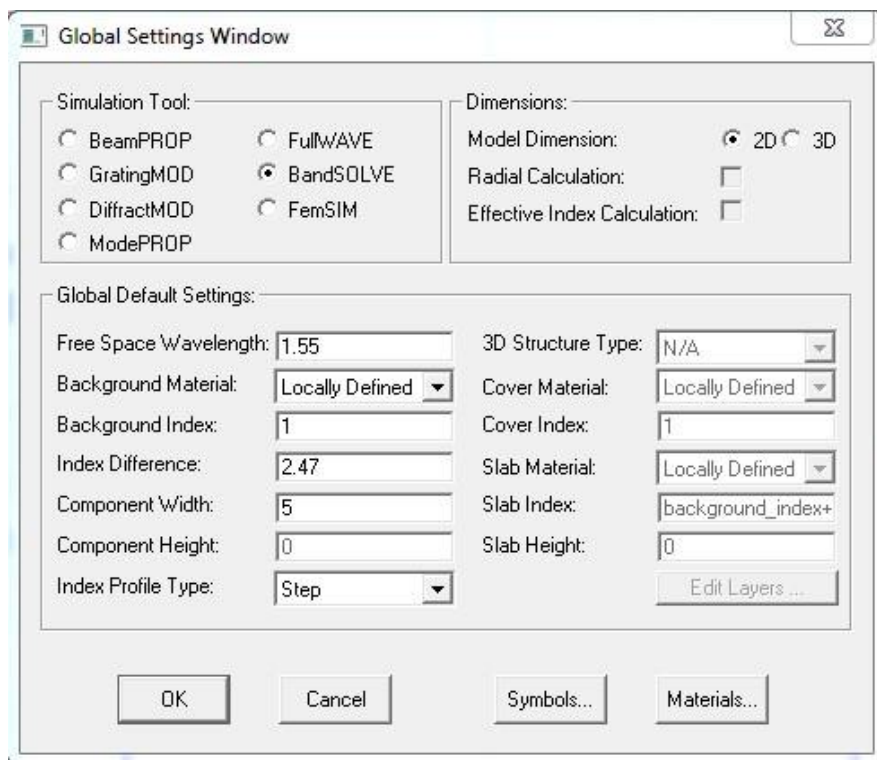



Figure III. 8 : Fenêtre des paramètres globaux du circuit.

3) Créer les variables

L'icône de symboles  d'édition dans la fenêtre de CAD. Ceci ouvrira (symbole Table Editor) comme montré dans la figure III.9 Pour placer les divers paramètres de la structure, et définir plusieurs variables tels que la période, le rayon, l'indice de réfraction....

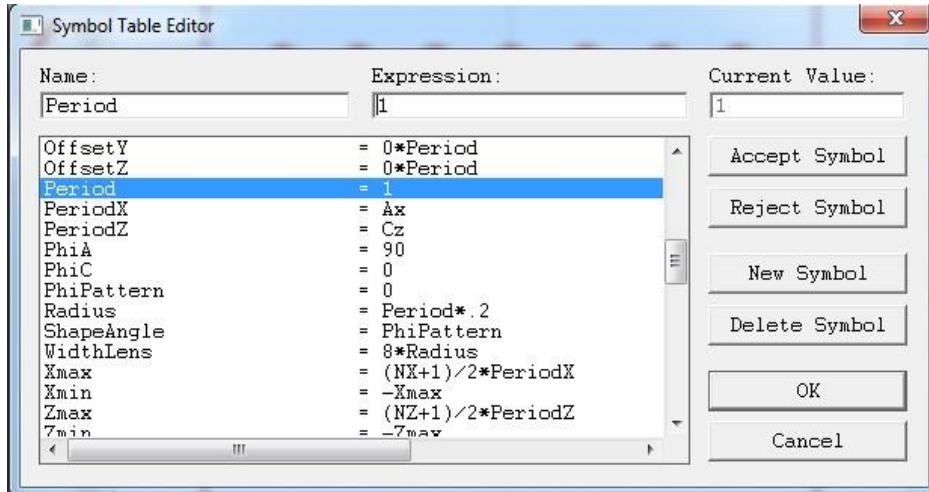



Figure III. 9 : L'éditeur du Tableau de symboles.

4) Vérification du profil d'index

Pour vérifier la distribution d'indexe de la structure qu'on a créée. On appuie sur le bouton de profil d'index  et on change le pas de calcul, on met les valeurs max et min pour X et Z (figure (III-10.a)). La structure obtenue est sur la figure (III.10.b).

(a)

(b)

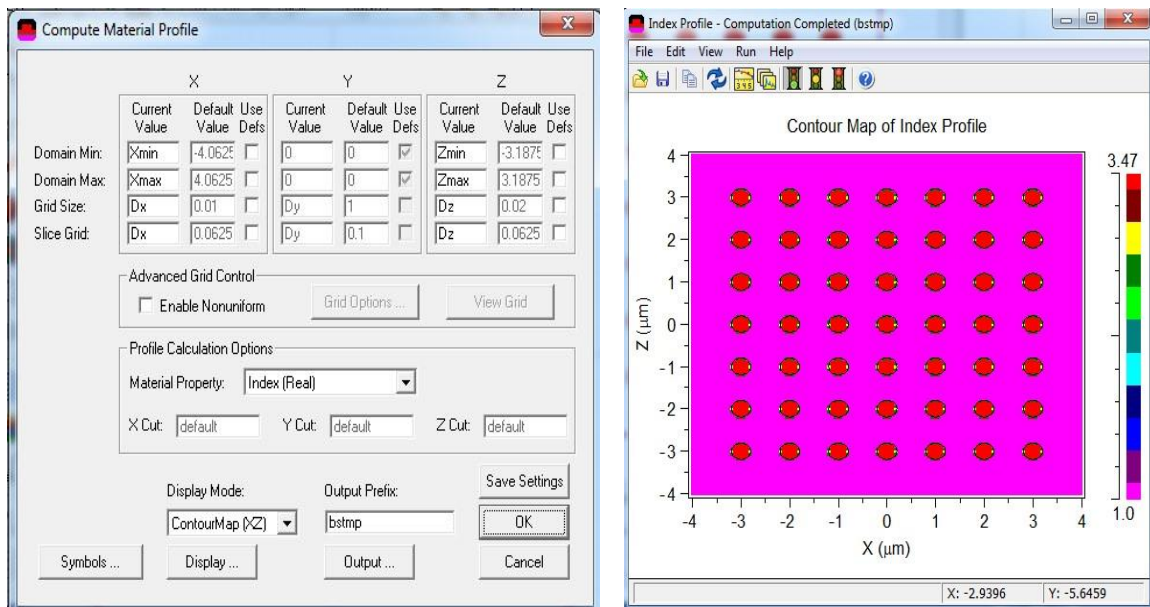


Figure III. 10 : Profil d'indexe de la structure à cristaux photoniques 2D

5) Réglage des paramètres de simulation

Pour le choix et le réglage des paramètres de simulation on clique sur le bouton. Par conséquent, il apparaît la fenêtre correspondante au module de simulation utilisée (BandSolve / FullWave) comme il est représenté sur la figure (III.11) ou sur la figure (III.12).

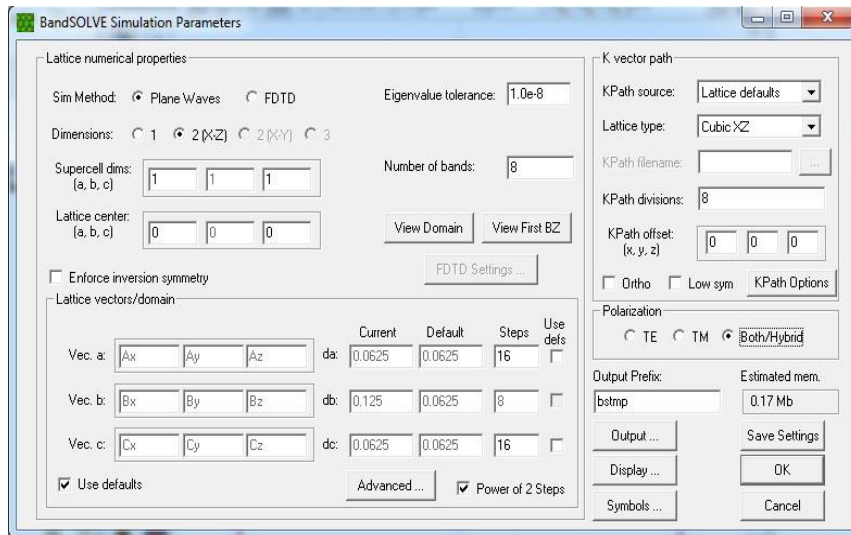


Figure III. 11 : La fenêtre de paramètres de simulation de BandSolve.

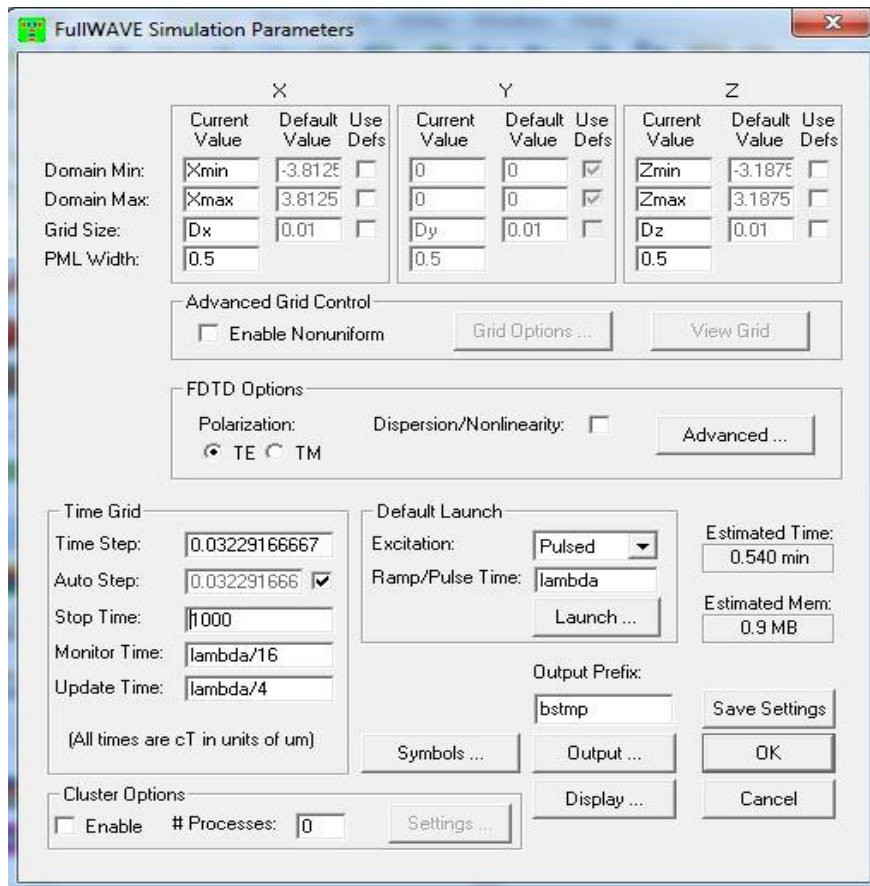



Figure III. 12 : La fenêtre de paramètres de simulation de FullWave

6) Lancement de la simulation

Une fois que les paramètres numériques et d'autres options sont acceptables, on clique sur OK pour commencer la simulation.

7) Affichage des résultats

Regarder ou imprimer a sauvé des résultats de simulation, on clique sur l'icône  de WinPLOT dans la barre des outils supérieur de la fenêtre de CAD, et on choisit le graphe désiré à partir du dialogue qui est présenté.

8) Création d'un guide d'onde droit

Pour créer un guide droit de largeur W_1 suivant une direction ΓK ou ΓM , il suffit d'enlever un rangé de trous d'air selon la direction choisie (figure (III.13)) :

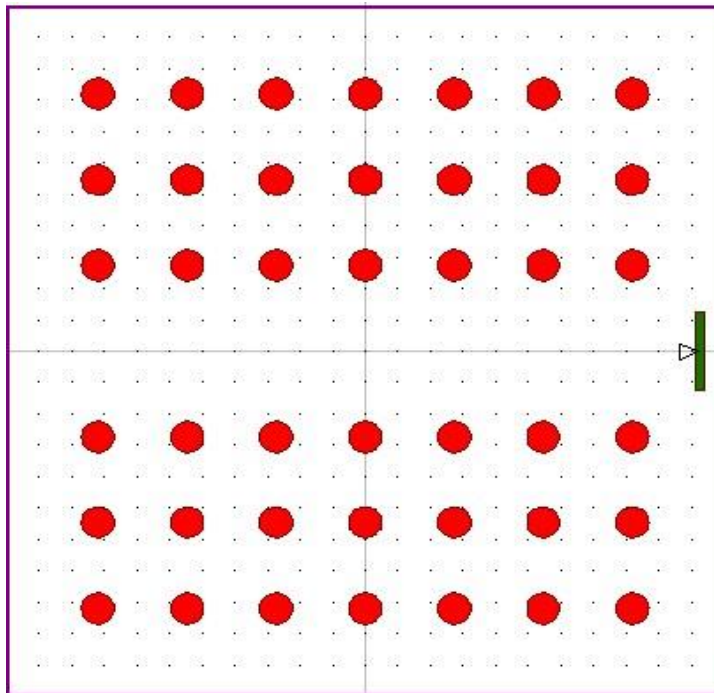


Figure III. 13 : Guide d'onde droit W_1 .

9) Diagramme des bandes

Comme indiqué dans le premier chapitre, les zones de Brillouin aident à la localisation et l'optimisation des bandes interdites, puis le calcul de la dispersion des modes de défaut. Seulement il est nécessaire d'analyser un petit nombre de points dans la première zone de Brillouin, la figure (III.14) montre le diagramme des bandes correspondant à la structure de la fibre en cristaux photoniques (FCP) pour les modes TE/TM.

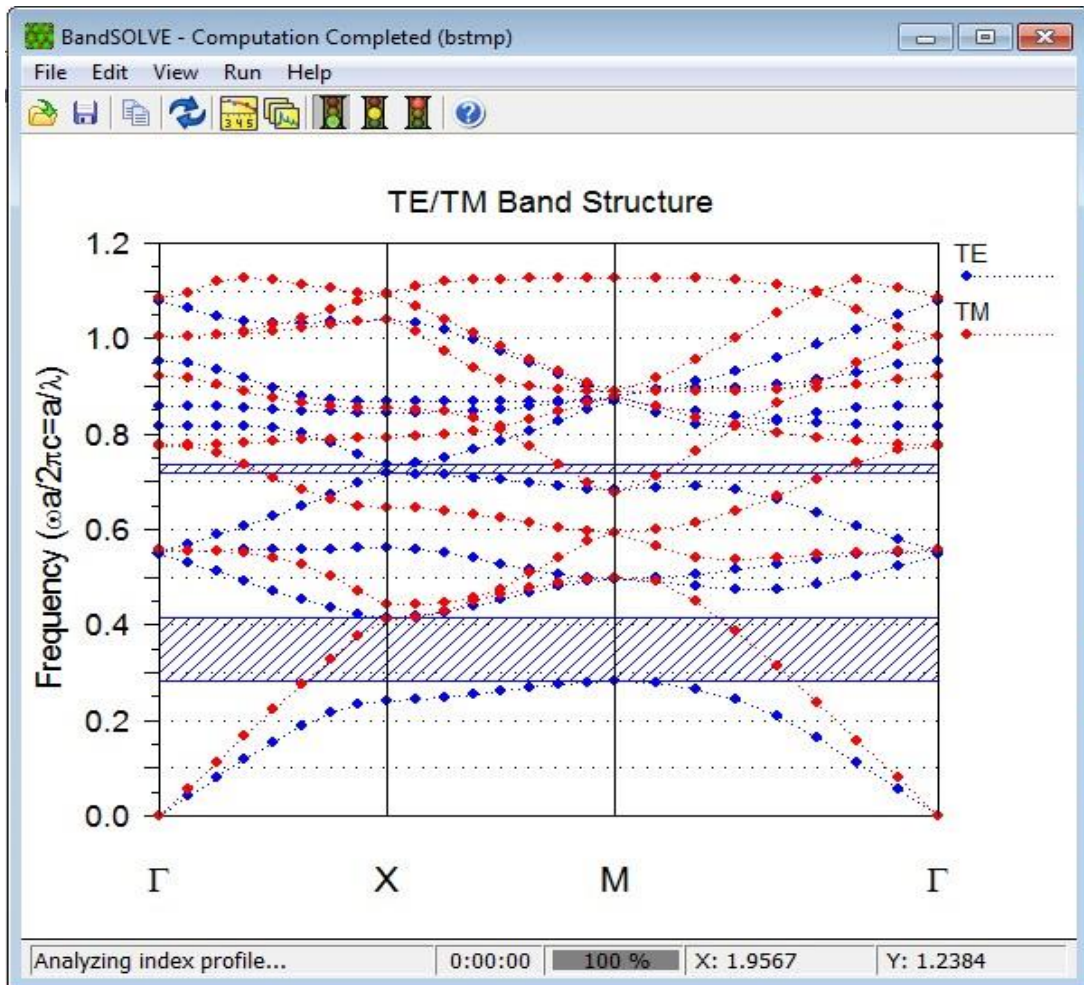


Figure III. 14 : Diagramme des bandes pour les modes TE et TM

III. 7. Conclusion :

L'utilisation d'outils numériques parfaitement adaptés à la conception des structures photoniques bidimensionnelles présente plusieurs avantages. Tout d'abord, cela permet une modélisation précise et réaliste des propriétés optiques des structures, ce qui permet de prévoir leur comportement dans des conditions réelles. De plus, ces outils permettent une analyse rapide et efficace de différentes configurations de structures, ce qui facilite le processus de conception et d'optimisation. Enfin, l'utilisation de ces outils numériques permet une grande flexibilité dans la conception de structures photoniques, ce qui permet d'explorer de nouvelles idées et de développer des structures innovantes pour des applications optiques variées.

Dans ce chapitre, nous avons exposé l'algorithme fondamental et formulé plusieurs techniques de modélisation numérique, notamment la méthode des éléments finis (FEM), la méthode des matrices de transfert (TMM), la méthode de décomposition en ondes planes (PWE) et la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD).

Ces techniques sont maintenant des outils éprouvés pour la simulation du comportement électromagnétique des cristaux photoniques lors de la propagation d'ondes dans ces milieux.

Dans l'exemple de simulation on a montré que la méthode des ondes planes est utilisée pour calculer les structures de bande d'énergie de la structure diélectrique. Cette technique de résolution dans le domaine fréquentiel consiste à développer le champ électromagnétique sur une base d'ondes planes. Ensuite on a vu que la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD) a aussi eu beaucoup de succès pour la modélisation de ce type de matériaux grâce à sa facilité d'implémentation. Cependant, elle est plus utilisée pour le calcul des diagrammes de transmission et de réflexion. Dans cet exemple, nous avons présenté les résultats de ces deux méthodes de simulation : la méthode des ondes planes (PWM) et la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD). A la fin, nous avons décrit les deux modules de simulation le BandSolve et le FullWave de RSoft CAD pour éclaircir le fonctionnement de ce programme.

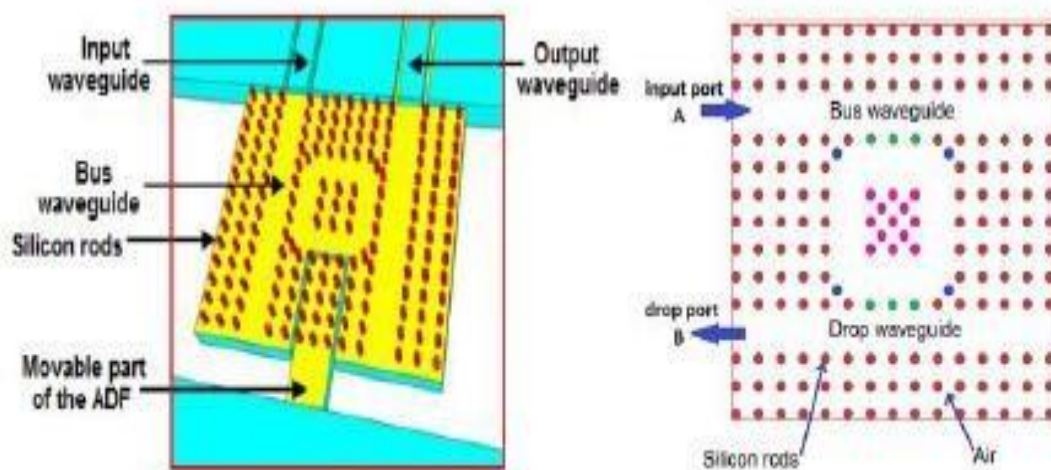
III. 8. Références du chapitre III :

- [1]. D. Y. L. Ho, T. Cao, S. Pavel, M. J. I. Cryan, I. J. Craddock, C. J. Railton, and J. G. Rarity, “Three-dimensional FDTD simulation of micro-pillar microcavity geometries suitable for efficient single-photon sources”, *IEEE J. Quantum Electronics (JQE)*, Vol. 43, 462, 2007
- [2]. P. Monk, “Finite element methods for Maxwell’s equations”, Oxford Science Publications, Oxford, DOI: 10.1093/acprof:oso/9780198508885.001.0001, 2003
- [3]. A. BENMERKHI. “Optimisation du confinement de la lumière dans des cavités à cristaux photoniques”, Thèse de doctorat, Université Mentouri, Constantine01, mai 2012
- [4]. Z. Y. Li, and K. M. Ho, “Light propagation in semi-infinite photonic crystals and related waveguide structures”, *Phys. Rev. B*, Vol. 68, 155-101, 2003
- [5]. M. Plihal and A. A. Maradudin, “Photonic band structure of two-dimensional systems: The triangular lattice”, *Phys. Rev. B*, Vol. 44, 8565, 1991
- [6]. D. Neel, “Etude en champ proche optique de guide à cristaux photoniques sur SOI”, thèse de Doctorat, Université de Lyon, 2006
- [7]. M. M. Sigalas and N. García, “Theoretical study of three dimensional elastic band gaps with the finite-difference time-domain method”, *Journal of Applied Physics*, Vol. 87, 3122, 2000
- [8]. R. Courant, K. Friedrichs et H. Lewy, “Über die partiellen Differenzgleichungen der mathematischen Physik”, *Mathematische Annalen*, Vol. 100, 32–74, 1928
- [9]. N. Ashcroft and N. D. Mermin, “Physique des solides”, EDP Sciences, les Ulis, 2002
- [10]. J. P. Berenger, “Perfectly Matched Layer (PML) for Computational Electromagnetics”, *Synthesis Lectures on Computational Electromagnetics*, Vol. 2, 1-117, 2007
- [11]. Jean-Jacques Bonnefois “modélisation d’effets non linéaires dans les cristaux photoniques, application à la limitation optique”. Thèse de doctorat de l’université de Paris, Nanterre. 30 novembre 2006
- [12]. J. J. Bonnefois. “Modélisation d’effets non linéaires dans les cristaux photoniques, application à la limitation optique”, Thèse de doctorat, Université de Nanterre - Paris X, 2006
- [13]. L. Weijia, Y. Daquan, S. Guansheng, T. Huiping, J. Yuefeng, “Design of ultra-compact all optical XOR, XNOR, NAND and OR gates using photonic crystal multi-mode interference waveguides”. *Optics & Laser Technology*. Vol.50, 2013, 55-64. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2012.12.030>
- [14]. Y. Akahane, T. Asano, H. Takano, B.S. Song, Y. Takana, S. Noda, “Two dimensional photonic crystal slab channel drop filter with flat top response”, *J. Optics Express*, vol. 13, 2512–2530, 2005
- [15]. A.H. Badaoui, “Etude et conception des micro-composants à base des cristaux photoniques bidimensionnels”. Thèse de doctorat. Université de Tlemcen. Décembre (2012)
- [16]. O. Painter, J. Vuckovic, et A. Scherer, “Defect modes of a two dimensional photonic crystal in an optically thin dielectric slab”, *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 16, 275-285, 1999



Chapitre IV

Résultats et interprétations



Chapitre IV : Résultats et interprétations

IV. 1. Introduction :

Au cours des dernières années, la recherche sur l'électronique optique s'est considérablement développée et avec l'avancement de cette technologie, la taille des composants a diminué, et par conséquent, les circuits intégrés sont devenus plus complexes et plus gros dont il nécessite des composants spécialement conçus de petite taille tout en étant efficaces. Les portes logiques optiques sont l'un des composants les plus importants pour les circuits optiques intégrés. La petite taille de ces structures est un avantage important qui permet de les utiliser dans des circuits très complexes. Ces dispositifs logiques jouent un rôle important dans le calcul optique et le traitement de l'information à grande vitesse [1]. De plus, le besoin de conceptions logiques entièrement optiques augmente de jour en jour pour faire face à la demande de réseaux de télécommunications et de systèmes informatiques à haut débit [2] en l'absence du besoin de conversion Optique-Électrique-Optique (O-E-O) ainsi que du traitement des données dans des moyens optiques [3].

Les portes logiques optiques sont une unité majeure du traitement du signal tout optique et de la communication optique [4]. Ces deux éléments nécessitent une combinaison complexe de portes logiques entièrement optiques. Chaque porte logique tout optique doit être actionnée rapidement et fonctionnellement en tant qu'élément critique et essentiel d'une structure plus grande [5]. En plus, nous pouvons améliorer l'ensemble du système pour qu'il fonctionne plus rapidement et de manière plus fiable en optimisant une porte logique tout optique [6].

De nombreuses structures ont été proposées pour introduire des portes logiques à cristal photonique tout optique [7][8]. De nouvelles structures pour les portes logiques à cristal photonique tout optique ont été de plus en plus optimisées [9] [10]. Ainsi, différentes structures ont été rapportées pour les portes logiques afin d'obtenir des rapports de contraste élevés dans les portes logiques à cristal photonique tout optique [11] [13].

Dans ce contexte, le dispositif étudié est largement utilisé dans le domaine de la microélectronique optique intégrée.

IV. 2. Conception d'une jonction-Y à base des cristaux photoniques pour application à des portes logiques optiques :

IV. 2. 1. Conception de la jonction-Y tout optique :

Les structures à maille triangulaire sont parmi les différentes structures récemment utilisées, elles sont particulièrement intéressantes puisqu'elles possèdent une bande interdite photonique quel que soit la polarisation de la lumière.

On choisit comme structure de base un réseau triangulaire de trous d'air ($R=0,4*a$), où a : est la période du réseau, sur une membrane de silicium ($n=3,42$), du réseau. (Figure IV.1.a), et R : est le rayon des trous.

Cette structure a été choisie parce que le réseau triangulaire peut montrer de larges bandes interdites et le Silicium est une très bonne plateforme pour les circuits intégrés photoniques et les circuits optiques d'ultracompacts [14].

La bande interdite de notre structure a été calculée à l'aide du simulateur BandSolve. Comme indiqué sur la figure (IV.1.b), cette bande s'étend de 0,25 à 0,41 (a/λ) pour une polarisation TE. Cette plage de valeurs correspond à des longueurs d'onde comprises entre 1,4 μm et 2,4 μm , où λ représente la longueur d'onde en espace libre.

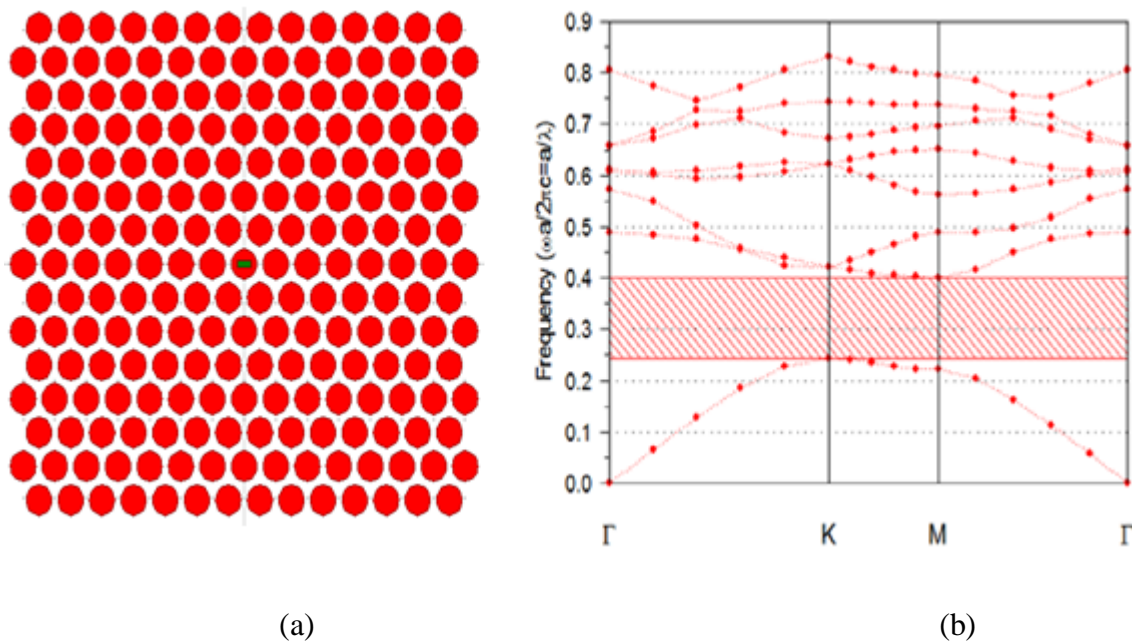


Figure IV. 1 : (a) structure à réseau hexagonal. (b) la bande interdite en polarisation TE.

Si une onde électromagnétique est incidente dans le plan perpendiculaire au réseau de trous et si sa fréquence se situe dans la bande interdite précédemment mentionnée, elle sera réfléchi. Ainsi, les cristaux photoniques sont d'excellents miroirs dans leur bande interdite, comme exemple les miroirs de Bragg unidimensionnels pour des angles d'incidence proches de la normale.

IV. 2. 2. Procédures et méthodes :

IV. 2. 2. 1. Etude des cavités à base de cristaux photoniques :

Pour les cristaux photoniques en deux dimensions, la création de défauts peut être réalisée de différentes manières. Il est possible de modifier localement l'indice de réfraction ou la taille d'un motif du cristal (défaut de substitution), de déplacer un motif existant (défaut interstitiel), de supprimer l'un des motifs (défaut lacunaire) ou d'insérer un motif différent (dopage).

La présence d'un défaut ponctuel peut donner lieu à des niveaux discrets d'énergie dans une bande interdite. Dans notre cas, nous nous intéressons aux cavités contenant des défauts interstitiels et des défauts de substitution.

Les cavités sont réalisées par la modification ou l'omission d'un ou de plusieurs trous du cristal photonique ou par le changement de ses dimensions et indices. Plusieurs paramètres influenceurs (Défaut de substitution) peuvent changer les résultats de ces cavités.

IV. 2. 2. 2. Cavité avec un défaut de substitution :

La variation du rayon de la cavité à cristaux photoniques peut affecter plusieurs propriétés optiques, notamment la sélectivité spectrale, la résolution spectrale et la densité d'états optiques.

Tout d'abord, la sélectivité spectrale est affectée par le rayon de la cavité. En général, une cavité à cristaux photoniques avec un plus grand rayon aura une sélectivité spectrale plus étroite. Cela est dû à une augmentation de la densité d'états dans la cavité, ce qui augmente la probabilité d'interaction de la lumière avec les modes de résonance de la cavité. Par conséquent, une plus grande densité d'états peut conduire à une plus grande sélectivité spectrale.

Deuxièmement, le rayon de la cavité peut influencer la résolution spectrale de la cavité à cristaux photoniques. La résolution spectrale est la capacité de la cavité à distinguer des fréquences proches les unes des autres. En général, une cavité à cristaux photoniques avec un plus petit rayon aura une meilleure résolution spectrale. Cela est dû à une diminution de la largeur de bande de la cavité à mesure que le rayon diminue, ce qui réduit le chevauchement des pics de résonance voisins.

Enfin, le rayon de la cavité peut également influencer la densité d'états optiques de la cavité à cristaux photoniques. La densité d'états optiques est une mesure de la densité d'états des photons dans la cavité à une fréquence donnée. En général, une cavité à cristaux photoniques avec un plus petit rayon aura une densité d'états optiques plus élevée. Cela peut conduire à une augmentation de l'interaction de la lumière avec les matériaux situés à proximité de la cavité, ce qui peut être utilisé pour augmenter l'efficacité de l'émission de lumière par des matériaux tels que les semi-conducteurs.

Nous examinons une structure de cristal photonique de base, illuminée par une onde plane avec une polarisation TM. La cavité est créée en modifiant la taille d'un motif de cristal, en utilisant un défaut de substitution.

Cas N°1: Le rayon « r » du trou central de la structure est réduit à 0,8 fois celui du trou initial (R).

La figure (IV.2) présente la variation de l'intensité en fonction de la longueur d'onde.

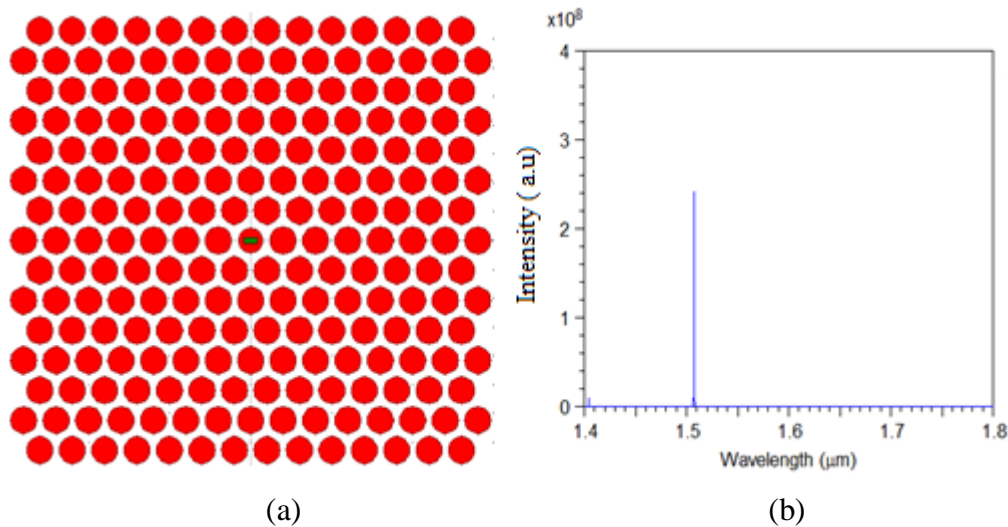


Figure IV. 2 : (a) : La structure de la cavité H1 pour un défaut de substitution, (b) : La transmission de la cavité H1 pour un défaut de substitution

La cavité formée présente le plus faible volume modal. Pour calculer les propriétés optiques de la cavité, nous avons utilisé la méthode des différences finies. Cependant, cette méthode nécessite de définir des conditions aux limites pour éviter les réflexions parasites engendrées aux bords de la fenêtre de calcul lors de la simulation dans un milieu ouvert. Dans notre étude, nous avons adopté le modèle des couches absorbantes PML qui est parfaitement adapté à la modélisation des limites en électromagnétisme.

La figure (IV.2) montre l'apparition d'une raie qui indique la position d'un mode résonant pour une longueur d'onde de 1,52 μm . Lorsque nous avons réduit le rayon du trou central, nous avons créé un défaut qui présente une intensité de résonance de $2,6 \times 10^8$.

Cas N°2 : $r = 0.5 * R$

Nous avons ensuite étudié un autre cas où le rayon du trou central a été réduit à la moitié de sa valeur initiale, soit $r = 0,5 * R$. La figure (IV.3) représente l'intensité en fonction de la longueur d'onde pour ce cas particulier.

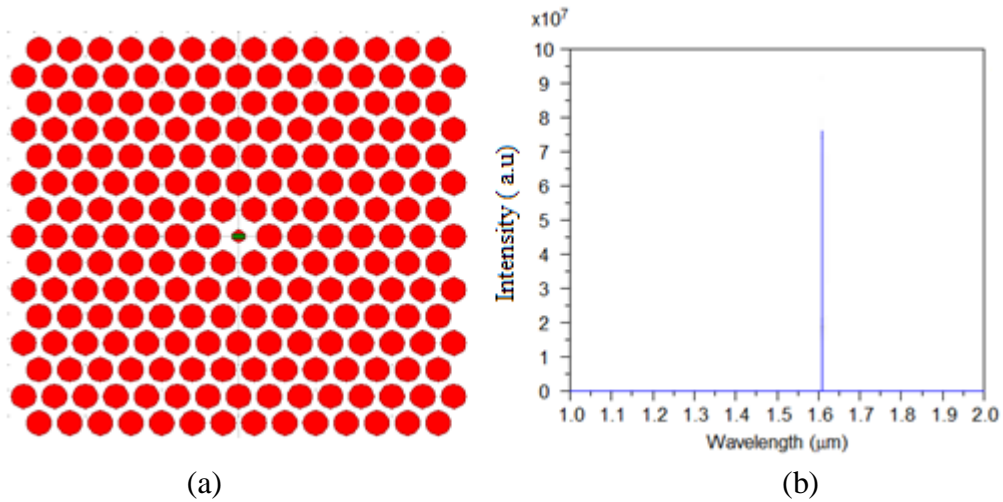


Figure IV. 3 : Cavité pour $r = 0,5 \cdot R$. (b) : la transmission de la cavité modifié.

Dans la figure (IV.3), on peut observer que si on diminue encore plus le rayon du trou au centre de la structure, on obtient un décalage de la longueur d'onde de résonance à $\lambda = 1,6 \mu\text{m}$ toujours dans la gamme des BIP, avec une diminution de l'intensité à $I = 8 \times 10^7$.

Cas N°3 : $r = 0,4 \cdot R$

Dans le troisième cas, le rayon du trou au centre de la structure est diminué avec une valeur plus faible que dans le cas précédent. La figure (IV.4) représente l'intensité en fonction de la longueur d'onde pour ce cas, où on observe une diminution de l'intensité à $I = 3 \times 10^7$ et un décalage de la longueur d'onde de résonance à $\lambda = 1,74 \mu\text{m}$, toujours dans la gamme des BIP. Cela démontre que la diminution du rayon du trou au centre de la structure entraîne une diminution de l'intensité de résonance et un décalage de la longueur d'onde de résonance vers des longueurs d'onde plus élevées.

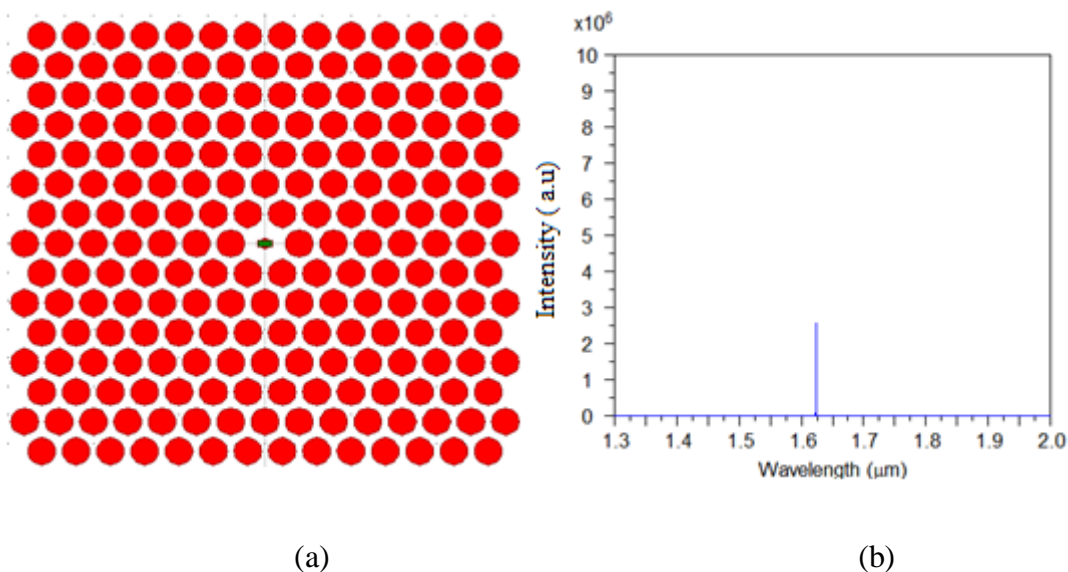


Figure IV. 4 : (a) : Cavité pour $r = 0,4 \cdot R$. (b) : la transmission de la cavité modifié.

Dans la figure (IV.4), on peut observer que si le rayon du trou au centre de la structure est diminué davantage, l'intensité de résonance diminue encore à une valeur de $I = 3 \times 10^6$, avec un léger décalage de la longueur d'onde de résonance à $\lambda = 1,62 \mu\text{m}$, toujours dans la gamme des BIP.

Le tableau (IV.1) ci-dessous présente la relation entre le rayon « r » du trou central et la variation de la longueur d'onde de résonance ainsi que la puissance de transmission.

Le rayon	La longueur d'onde	L'intensité
0,8 x R	1,52 μm	$2,6 \times 10^8$
0,5 x R	1,6 μm	8×10^7
0,4 x R	1,62 μm	3×10^6

Tableau IV. 1 : La variation de la longueur d'onde et de la transmission en fonction du rayon de trou au centre.

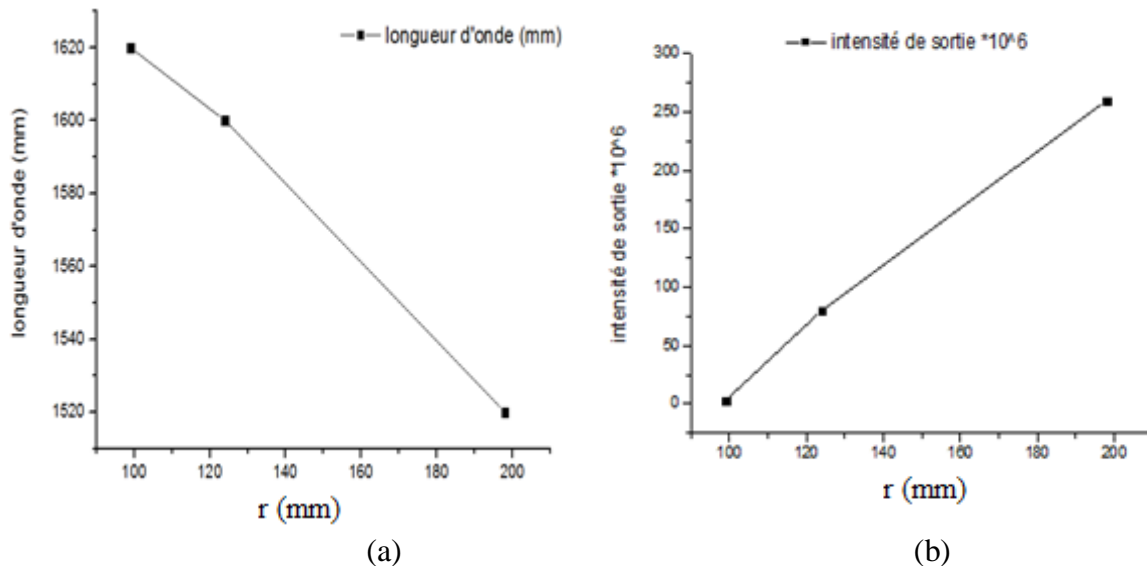


Figure IV. 5 : (a) : la variation de la longueur d'onde en fonction du rayon de la cavité (b) la transmission d'une cavité en fonction du même paramètre.

Il est évident que la variation du rayon de trou central est inversement liée à la variation de la longueur d'onde de résonance et proportionnelle à la puissance de transmission.

IV. 2. 2. 3. Influence de la variation d'indice sur les cavités :

Afin d'analyser l'impact de la modification de l'indice de réfraction de la cavité centrale de la structure (défaut) sur la bande interdite photonique (BIP), nous utilisons la même configuration étudiée précédemment. Nous procédons ensuite au remplacement de l'indice "nh" du trou d'air central (indice faible) par celui du polymère ($n=1,54$), puis par celui du disulfure de carbone CS_2 ($n=1,63$).

Car le CS₂ est un solvant qui peut dissoudre des polymères tels que le polystyrène, qui sont utilisés pour former les cristaux photoniques. En dissolvant le polymère dans le CS₂, on peut former une solution qui peut être déposée sur une surface plane et laissée sécher pour former un film mince.

Le CS₂ a également des propriétés optiques intéressantes, notamment un indice de réfraction élevé (environ 1,63 pour la lumière visible), qui est important pour la formation de cristaux photoniques à haute réflexion. En utilisant le CS₂ comme solvant, on peut créer des cristaux photoniques avec des propriétés optiques personnalisées pour des applications telles que les capteurs, les dispositifs optiques et les cellules solaires.

Le rayon de la cavité au centre de notre structure est $r = 0.5 \cdot R$ ce qui assure l'existence d'un seul mode « monopole » à l'intérieur de la microcavité, ce qui donne naissance à une BIP avec une énergie permise correspondant à la longueur d'onde de résonance d'un mode dans cette microcavité. Le pic résonant à la longueur d'onde $\lambda = 1,60 \mu\text{m}$ est un mode monopolaire en utilisant la méthode FDTD 2D, avec le logiciel (FullWave).

L'indice de réfraction est un paramètre important qui détermine la vitesse de propagation de la lumière dans un matériau. Dans les cavités à cristaux photoniques, la variation de l'indice de réfraction dans la direction de propagation de la lumière peut affecter la réflexion, la transmission, la réfraction et la diffraction de la lumière à l'intérieur de la cavité.

Par exemple, une augmentation de l'indice de réfraction peut augmenter la réflexion totale interne de la lumière à l'intérieur de la cavité, ce qui peut conduire à une résonance élevée. Une diminution de l'indice de réfraction peut réduire la réflexion totale interne, ce qui peut réduire l'intensité des pics de résonance.

De plus, la variation d'indice peut influencer les modes de résonance dans la cavité. Les modes de résonance sont des fréquences de résonance spécifiques de la cavité qui correspondent à des ondes stationnaires qui se propagent dans la cavité. La variation de l'indice de réfraction influe sur la fréquence de résonance de la cavité.

Enfin, la variation de l'indice de réfraction peut également affecter la largeur de bande de la cavité, qui est la plage de fréquences sur laquelle la cavité est résonante. Une variation de l'indice de réfraction peut modifier la largeur de bande de la cavité, ce qui peut avoir un impact sur la sélectivité spectrale de la cavité.

Cas N°1 : $n= 1,54$ l'indice du polymère :

La même structure étudiée précédemment a été remplie avec du Polymère pour étudier l'impact de la variation de l'indice de réfraction de la cavité au centre de la structure (défaut) sur la longueur d'onde et l'intensité. La courbe de l'intensité en fonction de la variation de l'indice de réfraction pour une infiltration liquide du polymère est présentée dans la figure (IV.6.b). Suite à cette infiltration, le mode de la cavité se déplace en raison de l'augmentation de l'indice de réfraction ambiant de 1 à 1,54, entraînant une variation de la longueur d'onde de résonance. La transmission calculée pour cette résonance située à $\lambda = 1,61 \mu\text{m}$ est d'environ $I=3 \times 10^7$.

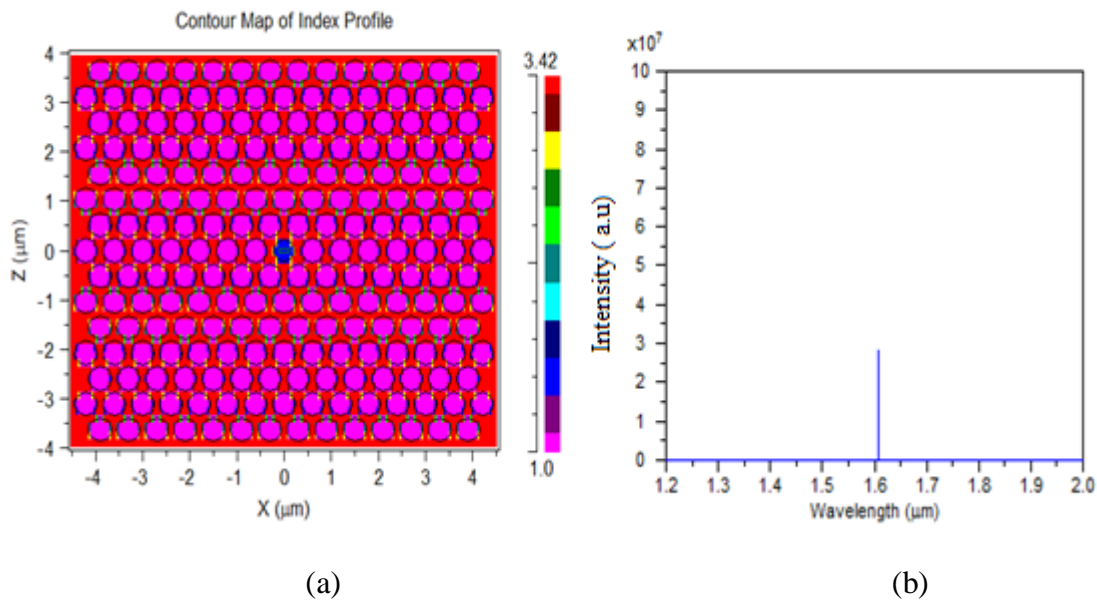


Figure IV. 6 : (a) : la cavité avec un indice $n=1.54$ $r=0.4 \cdot R$ (b) : Transmission de la cavité H_1 modifiée

Il est notable que l'augmentation de l'indice de réfraction du défaut entraîne une diminution de l'écart entre l'indice de réfraction du silicium (3,42) et celui de la cavité, conduisant ainsi à une diminution du confinement. Lorsque le polymère est infiltré dans le trou des cristaux photoniques, il modifie les propriétés optiques de la structure. Cela se traduit par une diminution de la différence $\Delta n_{sh} = n_s - n_h$ entre l'indice de réfraction du semi-conducteur n_s et celui des trous n_h , ce qui réduit la largeur de la bande interdite.

Cas N°2 : $n = 1.63$ l'indice du Carbon disulfide CS_2 :

Pour mieux voir l'influence de la variation de l'indice de la cavité sur sa transmission, la figure (IV.7) montre l'intensité en fonction de la longueur d'onde pour $r = 0,5 * R$ d'un trou du centre basé sur le CS_2 dont l'indice est $n = 1,63$.

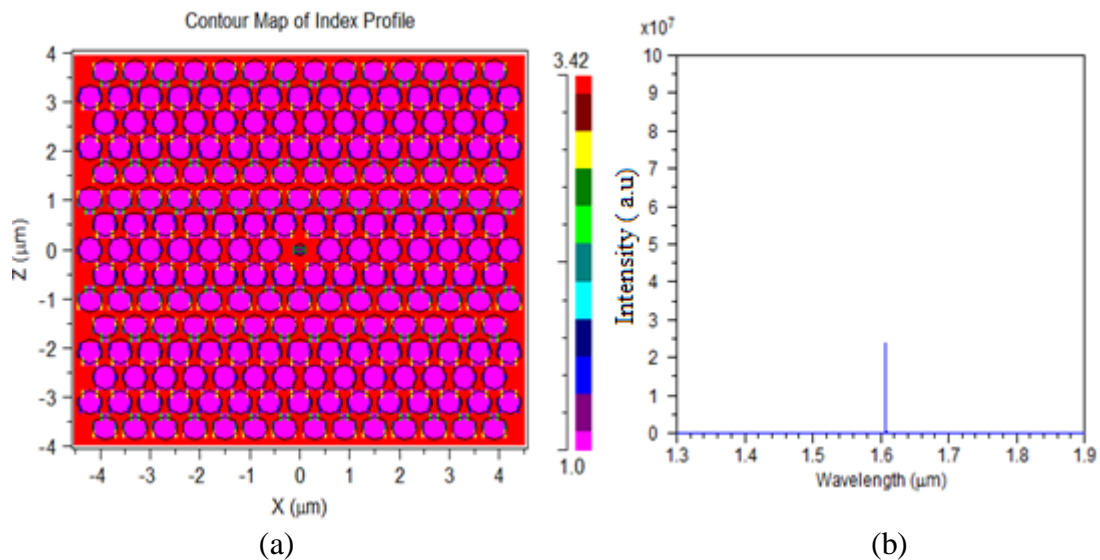


Figure IV. 7 : (a) : la cavité avec un indice $n = 1.63$ et $r = 0.5 * R$ (b) : Transmission de la cavité H_1 modifiée. La modification du rayon permet la transmission d'un seul mode de résonance, ce qui se traduit par une courbe de forme Laurentienne avec une intensité maximale. Tous ces résultats sont résumés dans la figure (IV.8).

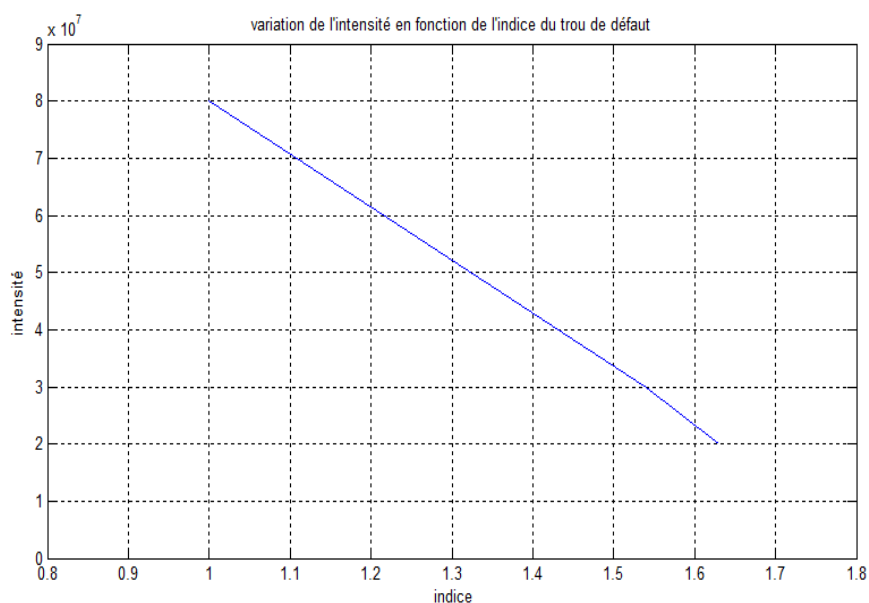


Figure IV. 8 : La variation de l'intensité en fonction de l'indice de réfraction

Avec un défaut de substitution et un rayon de trou central égal à 0,5 fois le rayon de la structure globale ($r=0,5*R$) en observant les résultats de cette étude, on peut noter que l'augmentation de l'indice de réfraction du trou central de la structure de 1 à 1,63 entraîne une diminution de l'intensité. Ainsi, la variation de l'indice de réfraction de la cavité est inversement proportionnelle à l'intensité.

Cette expérience démontre que la modification de l'indice de réfraction dans les cavités à cristaux photoniques peut considérablement influencer leurs propriétés optiques, telles que la résonance, les modes de résonance et la sélectivité spectrale.

IV. 2. 3. Résultats de la simulation :

Ces dernières années, les défauts étendus (W1), également appelés défauts linéiques, ont suscité un grand intérêt car ils peuvent servir de guides d'ondes. Les défauts linéiques sont constitués d'un guide orienté dans différentes directions, ce qui permet de transférer la lumière sur tous les chemins optiques possibles à l'intérieur du cristal. Dans la section suivante, nous étudions et développons un composant de base pour l'optique intégrée « la jonction-Y à base de cristaux photoniques » qui permet de transférer la lumière d'un guide courbé (Wc1) vers un guide linéique (W1).

La jonction-Y que nous étudions est formée d'un cristal photonique bidimensionnel avec un réseau à maille triangulaire de trous d'air sur une membrane de Silicium de rayon ($r = 0,4*a$), où « a » est la période. Elle se compose de trois guides linéiques et deux guides courbés, dont un guide droit.

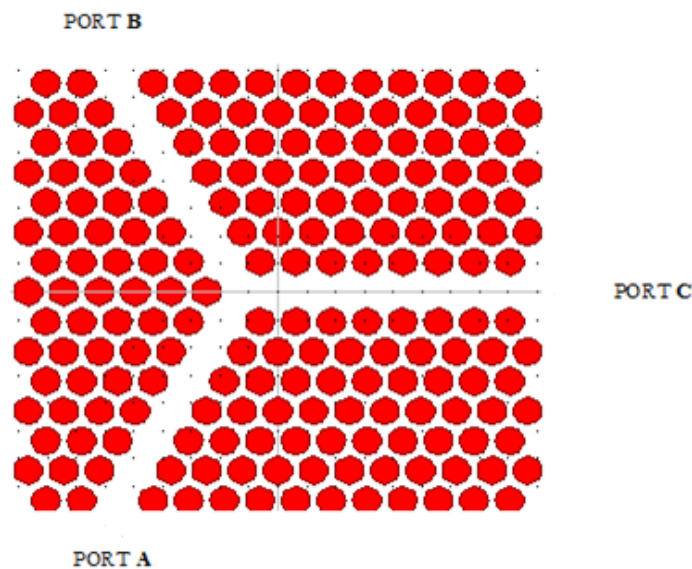


Figure IV. 9 : La jonction-Y proposée

IV. 2. 3. 1. Etude de la transmission dans la jonction-Y :

IV. 2. 3. 1. 1. La transmission dans le port de sortie (port c) de la jonction-Y :

La transmission dans un guide à cristaux photoniques dépend de plusieurs facteurs, notamment la géométrie du guide, les propriétés optiques des matériaux, la polarisation de la lumière et la longueur d'onde de la lumière. La compréhension de ces facteurs est importante pour la conception et l'optimisation des guides à cristaux photoniques pour diverses applications optiques

La transmission dans un guide à cristaux photoniques est généralement contrôlée par les modes de résonance de la cavité. Les modes de résonance sont des fréquences de résonance spécifiques du guide qui correspondent à des ondes stationnaires qui se propagent dans le guide. Ces modes peuvent être excités par une source de lumière externe et peuvent conduire à une augmentation de la transmission à la fréquence de résonance.

Une onde monochromatique est appliquée dans les deux ports d'entrée A et B, la figure (IV.10) montre la transmission dans le Port « C » de la jonction-Y avec une polarisation TM et un pas de discrétisation spatiale égale à 0,02.

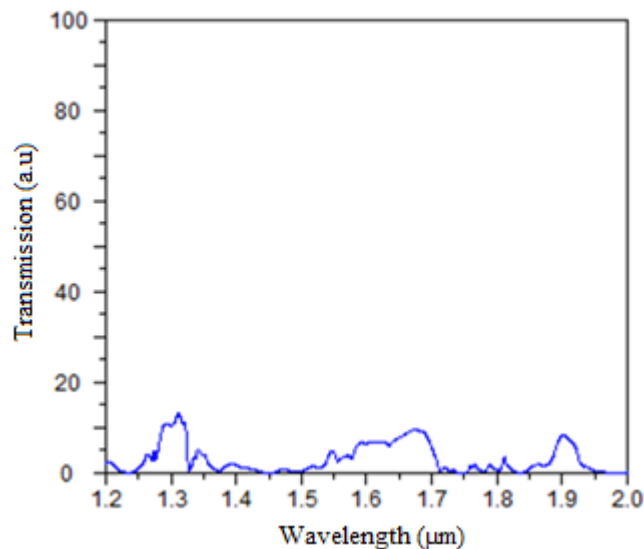


Figure IV. 10 : La transmission dans le port de sortie (Port C) de la jonction-Y proposé

Les résultats de la simulation basée sur la méthode FDTD-2D pour cette structure révèlent une transmission relativement faible au port de sortie (port C). En effet, la transmission maximale ne dépasse pas 20%. Cette faible transmission peut être expliquée par les pertes survenues aux virages de l'intersection des trois guides. En général, la courbure d'un guide d'ondes à cristaux photoniques peut entraîner des pertes dues à divers facteurs.

Tout d'abord, le rayon de courbure du guide d'ondes peut provoquer une modification de la périodicité des structures du cristal photonique, ce qui peut entraîner des pertes de lumière par diffusion ou réflexion.

De plus, la courbure peut provoquer des modes de propagation supplémentaires, tels que des modes de diffusion ou des modes de surface, qui peuvent causer des pertes supplémentaires. Ces modes peuvent être dus à des imperfections dans la surface du guide d'ondes ou à des modifications de la périodicité du cristal photonique.

En outre, la courbure du guide d'ondes peut provoquer une modification de l'angle d'incidence de la lumière, ce qui peut donner naissance à des pertes de réflexion.

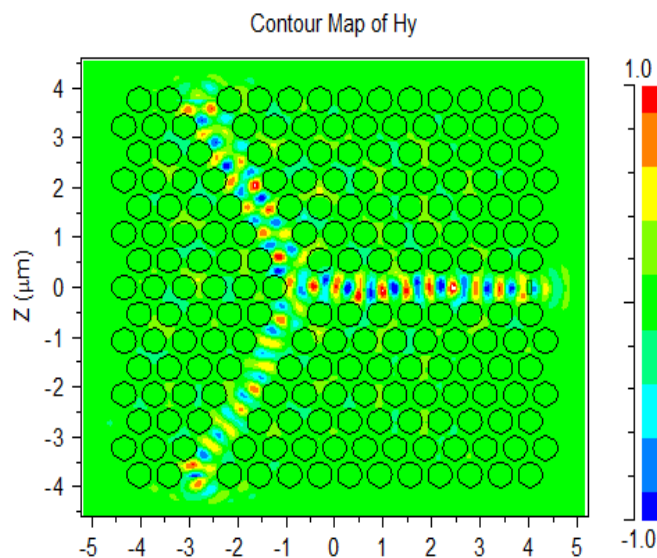


Figure IV. 11 : Propagation de l'onde dans la jonction-Y étudiée

Les modes d'ordre supérieurs peuvent causer des pertes dans la jonction-Y, ce qui est illustré par la distribution du champ magnétique "Hz" normalisée sur la Figure (IV.11) et met en évidence les performances de la structure photonique de la jonction-Y.

IV. 2. 3. 1. 2. La transmission dans les ports a et b de la jonction-y :

Pour mieux voir l'efficacité de transmission de la lumière dans la structure de la jonction-Y, on injecte la lumière dans la direction inverse. Donc la source de la lumière sera dans le port C. La transmission obtenue dans les deux ports (A, B) est représentée dans la figure (IV.12).

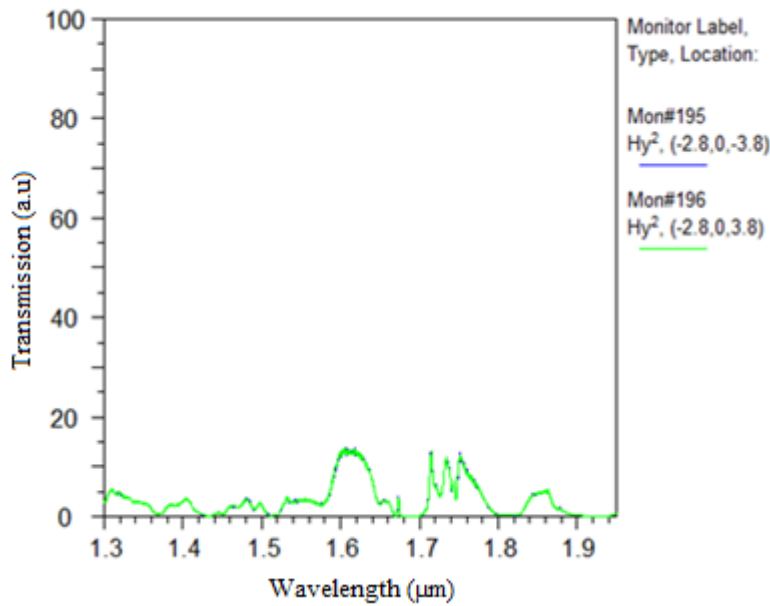


Figure IV. 12 : La transmission dans les deux ports A et B de la jonction-Y

Les résultats représentés dans la figure (IV.12) montrent qu'il y a une très faible transmission pour une longueur d'onde $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ dans les deux ports (A, B) ce qui valide la présence des pertes aux niveaux des virages. Ce qui explique qu'il y a un désaccord modal dans l'intersection des guides de la jonction-Y.

En général, la transmission dans un guide à cristaux photoniques dépend également de la polarisation de la lumière. La polarisation de la lumière peut affecter la symétrie des modes de résonance du guide, ce qui peut avoir un impact sur la transmission à différentes longueurs d'onde. De plus, la transmission dans un guide à cristaux photoniques peut être influencée par la géométrie du guide. Par exemple, la largeur et la hauteur du guide peuvent affecter la sélectivité spectrale du guide et la densité d'états optiques dans le guide.

Donc notre objectif est d'améliorer la transmission dans la jonction-Y étudiée. Pour cela, nous proposons dans la section suivante le couplage de la jonction-Y avec une cavité comme solution d'optimisation de la transmission dans la jonction-Y à base des cristaux photoniques.

IV. 2. 3. 2. Optimisation de la transmission dans la jonction-Y par couplage avec une seule cavité :

Dans le but d'optimiser les caractéristiques de la jonction-Y et d'améliorer sa transmission afin d'avoir une large bande passante avec des faibles pertes, nous essayons de coupler la structure de la jonction-Y précédente avec une cavité introduite à l'intérieur des trois guides de cette jonction.

La cavité introduite à l'intersection des trois guides de la jonction-Y a des paramètres géométriques modifiés afin d'assurer le passage d'un seul mode et d'éviter les modes d'ordre supérieurs.

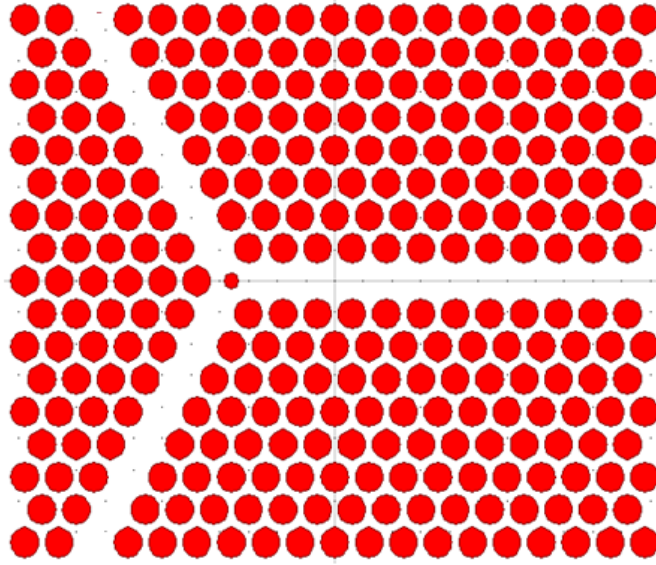


Figure IV. 13 : La structure de la jonction-Y optimisée

Lorsqu'une onde électromagnétique se propage dans le guide d'onde à cristal photonique, elle rencontre la cavité optique et une partie de l'énergie de la lumière peut être transférée à la cavité. Ce transfert d'énergie se produit à des fréquences de résonance pour lesquelles la longueur d'onde de la lumière correspond à la longueur de la cavité. Lorsque la lumière est confinée dans la cavité, elle peut subir des phénomènes d'interférence constructive ou destructive, ce qui peut affecter les propriétés optiques de la structure.

La structure bidimensionnelle de la jonction-Y a été optimisée et simulée à l'aide de la méthode FDTD-2D.

La réponse spectrale en transmission obtenue dans le port de sortie (Port C) sur cette nouvelle structure de la jonction-Y simulée en polarisation TM, est reportée sur la figure (IV.14).

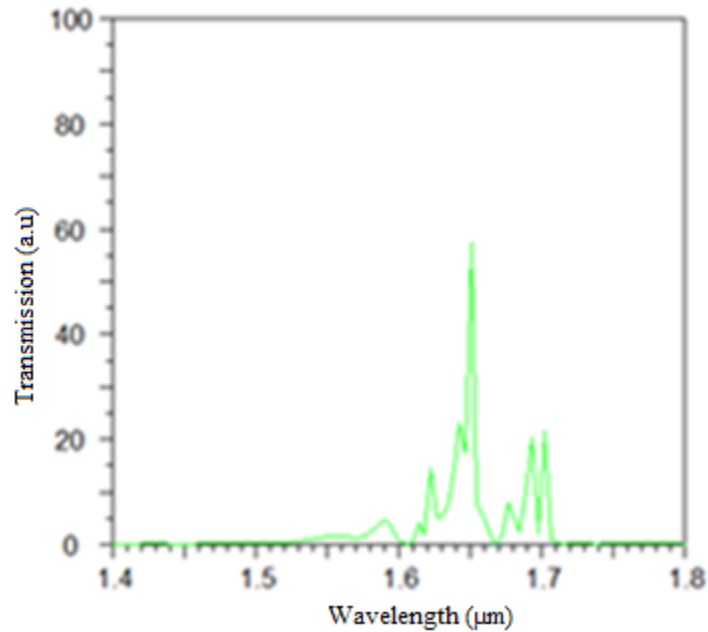


Figure IV. 14 : La transmission dans les deux ports A et B de la jonction-Y optimisée

Les résultats présentés dans la figure (IV.14) démontrent clairement l'efficacité de la structure photonique bidimensionnelle optimisée de la jonction-Y. La transmission obtenue pour $\lambda=1.64\mu\text{m}$ atteint environ 60% (le pic), et l'ajout de la cavité au centre de la jonction-Y permet d'éviter l'excitation des modes d'ordre supérieur, conduisant ainsi à une transmission quasi-totale. De plus, le mode guidé n'est pas affecté par les pertes dues aux virages de la jonction-Y, permettant à l'onde de suivre la direction de propagation de la jonction-Y. Ces résultats montrent une nette amélioration des propriétés de transmission par rapport à la configuration précédente.

IV. 2. 3. 3. Optimisation de la transmission dans la jonction-Y par couplage avec deux cavités :

Pour mieux avoir une transmission avec des faibles pertes dans le port de sortie de la jonction-Y, nous allons introduire deux cavités à l'intérieur du guide droit de notre structure. Dans ce dispositif, la lumière incidente de chaque port d'entrée est couplée au deux cavités, qui sont deux miroirs hautement réfléchissants séparées par une région diélectrique. La lumière se propage le long de chaque guide d'onde et entre dans ces deux cavités, où elle subit des réflexions multiples entre les deux miroirs hautement réfléchissants. Les réflexions multiples permettent à l'intensité de la lumière de s'amplifier à chaque passage, créant ainsi une résonance constructive dans les cavités. La lumière sort ensuite de ces cavités et réintroduite dans le guide d'onde droit, où elle se combine à nouveau pour former une seule sortie.

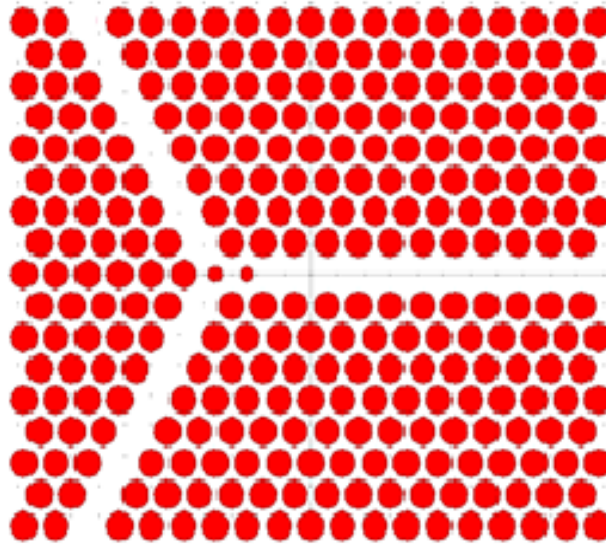


Figure IV. 15 : La structure optimisée de la jonction- Y avec deux cavités

Cette disposition a la capacité de doubler la résonance des cavités, améliorant ainsi la puissance de sortie et la sensibilité du dispositif, ce qui se traduit par une transmission presque parfaite avec de très faibles pertes. La figure (IV.16) montre clairement la transmission obtenue dans le port de sortie (port C) après l'ajout de ces deux cavités.

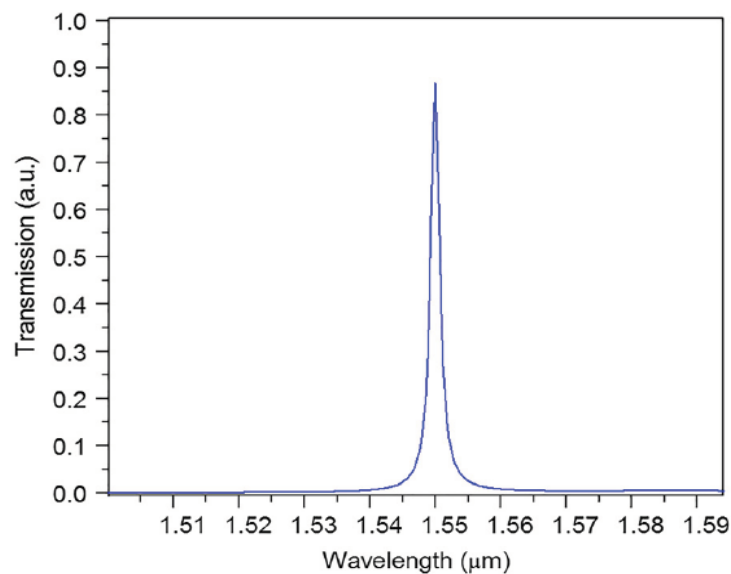


Figure IV. 16 : La transmission obtenue dans le port de sortie port C de la structure optimisée.

Il est clairement observé que la transmission a été améliorée après l'ajout d'une deuxième cavité par rapport à celle obtenue avec une seule cavité. Cette amélioration est due à l'amplification de la lumière engendrée par l'ajout du deuxième trou car la lumière est réfléchi plusieurs fois entre les deux cavités, ce qui crée des interférences constructives et destructives. Les ondes lumineuses qui sont en phase (constructives) s'amplifient alors que celles qui sont en opposition de phase (destructives) s'annulent. Cette méthode présente plusieurs avantages par rapport aux techniques

de couplage classiques, offrant ainsi une plus grande flexibilité dans la conception de la structure optique, permettant ainsi l'optimisation des performances de transmission.

IV. 2. 4. Conception et simulation des portes logiques tout-optique AND/OR :

IV. 2. 4. 1. La porte logique AND :

La porte **AND** à base de cristaux photoniques est un type de circuit logique optique qui utilise des cristaux photoniques pour réaliser la fonction logique AND. La fonction AND est une opération logique qui prend deux entrées et renvoie une sortie logique égale à 1 uniquement si les deux entrées sont à 1.

Notre porte logique « AND » proposé est formée d'une jonction-Y couplée avec une cavité, la jonction-Y est formée en créant des défauts linéaires dans la structure, quant à la cavité, on peut l'obtenir en créant un défaut de substitution d'un trou dans la structure, cette dernière a une propriété de résonance qui peut être modifiée en ajustant la taille ou l'indice du défaut.

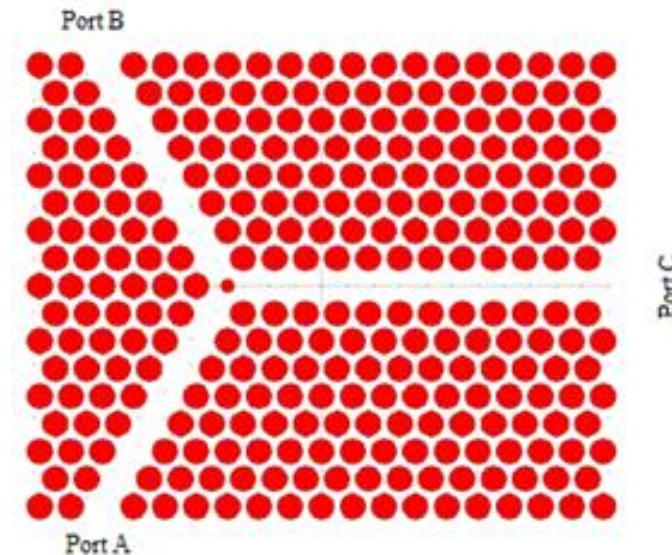


Figure IV. 17 : la porte logique optique « AND » proposée

Cette structure est un réseau cristallin triangulaire photonique de trous d'air dans le silicium. L'indice de réfraction du silicium (3,42). Le rayon du trou est sélectionné comme $r = 0.4 \cdot a$, où « a » est la constante de réseau et « r » est le rayon des trous d'air ont été choisis pour obtenir une bande interdite photonique (PBG) autour de $1.55 \mu\text{m}$ qui représente la gamme des longueurs d'onde de télécommunications. La fréquence de résonance de la cavité est contrôlée par la variation du rayon. Le type d'excitation du champ d'entrée a été effectué à l'aide d'optiques gaussiennes avec une puissance normalisée du mode "puissance unitaire" (unit power) qui a donc pris sa valeur en unité de watt (W).

Le tableau (IV. 2) représente les combinaisons logiques correspondent aux valeurs de puissance et les valeurs de la simulation pour la porte logique « AND » tout optique.

Port « A »	Port « B »	Sortie logique	Port « C »
0	0	0	0
0	1	0	0.017
1	0	0	0.017
1	1	1	0.897

Tableau IV. 2 : La table de vérité de la porte « AND » avec les résultats obtenus

La porte logique « AND » sert à multiplier deux entrées, sa sortie est logiquement égale à « 1 » si et seulement si les deux valeurs d'entrées sont « 1 » [15].

Nous considérons trois cas logiques :

Cas N°01 :

Les deux ports d'entrée A et B sont égales à zéro correspond au niveau logique « 0 », le cas d'absence du signal au port d'entrée, dans ce cas la puissance dans le port de sortie Port C est « OFF » égale à zéro « 0 ».

Cas N°02 :

Les deux ports d'entrée A et B sont différents In A= 1 et In B=0 ou bien In A=0 et In B = 1 ; c'est à dire l'un de ces deux ports sera excité par une intensité de puissance, le phénomène de la résonance est détecté à la cavité, et la longueur d'onde reste bien positionnée a « λ_c », et pas de changement d'indice de réfraction de la cavité. Dans ce cas, la sortie dans le port C reçoit une intensité de puissance correspond à 0.02% de la puissance d'entrée ce qui représente le niveau logique « 0 ».

Cas N°03 :

Lorsque In A= In B = 1 ; les deux ports d'entrée sont excités par une intensité de puissance identique ce qui assure le transfert maximal de la puissance vers la sortie à travers le port « C », Ce dernier reçoit une intensité de puissance correspond à 90% de la puissance d'entrée, ce qui représente le niveau logique « 1 ».

La figure (IV.18) montre la propagation de la lumière dans la jonction-Y étudiée :

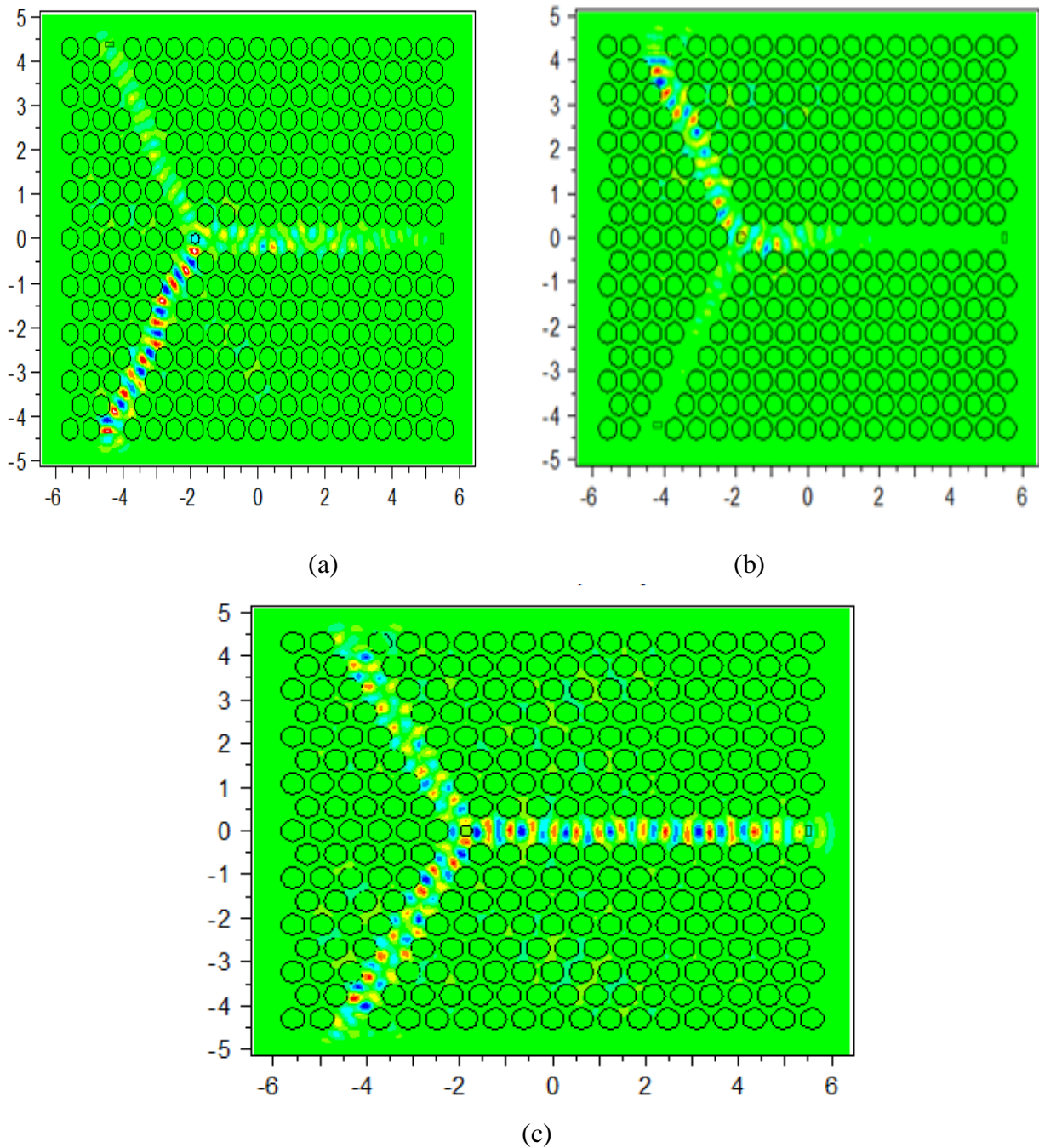


Figure IV. 18 : La propagation de la lumière, (a) $A=1, B=0$;(b) $A=0, B=1$ and (c) $A=1, B=1$.

Les résultats illustrés dans la figure (IV.18) prouvent que la structure proposée pourrait vraiment fonctionner comme une porte logique AND, à l'aide des dispositifs optique à base des cristaux photoniques, en optimisant le couplage entre ces dispositifs et en jouant sur des paramètres géométriques simples comme le rayon par exemple.

IV. 2. 4. 2. La porte logique OR :

Une porte logique est simplement un circuit électronique qui fonctionne sur un ou plusieurs signaux d'entrée pour effectuer l'opération logique et produire un signal de sortie.

La porte logique optique OR est un dispositif optique qui permet d'effectuer une opération logique OR sur deux signaux optiques d'entrée. Contrairement aux portes logiques traditionnelles qui utilisent des transistors, la porte logique optique OR ne nécessite pas de conversion entre signaux optiques et électriques. Le fonctionnement de cette porte repose sur l'utilisation de deux signaux optiques injectés dans un cristal photonique, une interaction lumière-matière se produit et génère un signal de sortie équivalent à la somme des signaux d'entrée si au moins l'un des signaux est présent. Ce dispositif a des applications potentielles dans les communications optiques, les réseaux de traitement de données optiques, et les systèmes de traitement d'images optiques.

Dans cette structure, un réseau périodique avec une cellule unitaire triangulaire est considéré, qui a été choisi parce que les réseaux triangulaires peuvent avoir de grandes bandes interdites et que le silicium est une bonne plate-forme pour les circuits photoniques et les dispositifs optiques ultracompacts. [16]. L'indice de réfraction du silicium est de 3,42 et le rayon du trou est choisi comme $r = 0,4*a$, où "a" est la constante de réseau et "r" est le rayon des trous d'air ont été choisis pour un réseau triangulaire afin d'obtenir un des bandes interdites photoniques (PBG) autour de $1,55 \mu\text{m}$ existent pour les longueurs d'onde de communication.

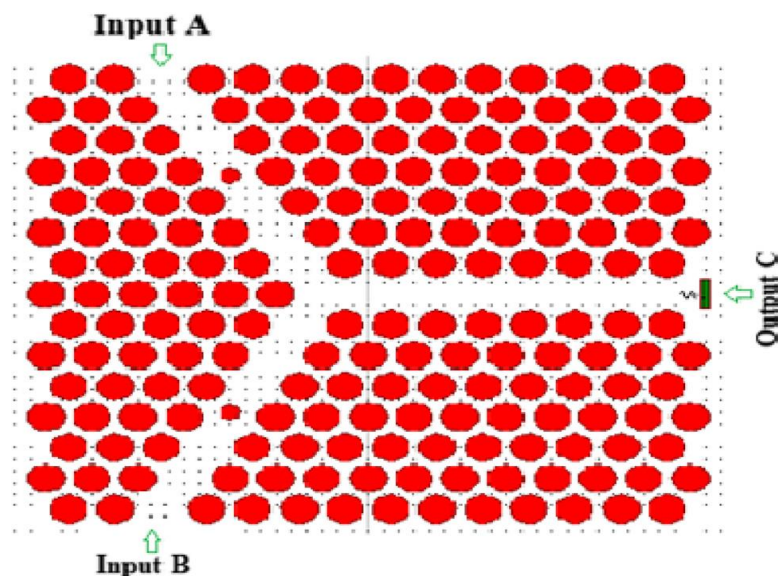


Figure IV. 19 : La structure de la porte OR proposée

Le diagramme de bande de la structure est obtenu par la méthode FDTD. La bande interdite signifie que la lumière dans cette gamme n'est pas autorisée à traverser la structure cristalline photonique [17]. La figure (IV.20) présente la bande interdite de la porte logique OR proposée. Pour cette structure, en mode transverse électrique (TE), il existe une bande interdite entre 0,293 et 0,428 a/λ , ce qui équivaut à la plage de la longueur d'onde plage de 1269 nm à 1890 nm. Dans ce qui suit, la longueur d'onde d'entrée simulée est prise comme 1550 nm, qui fait partie de la bande interdite.

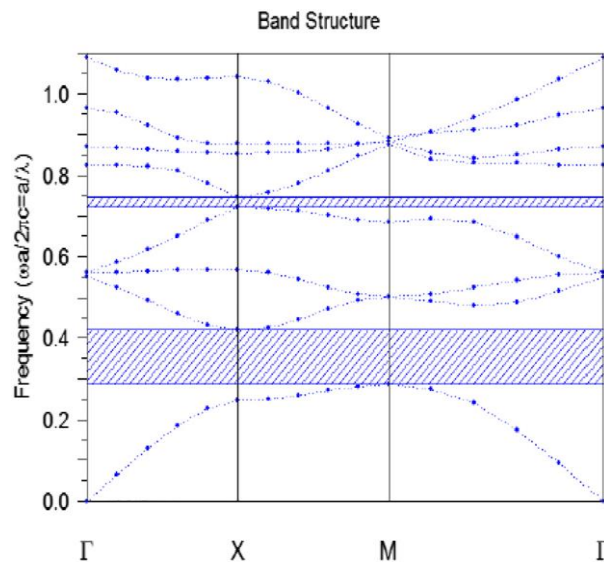


Figure IV. 20 : La bande interdite de la structure en mode TE

Cette porte logique se compose de deux ports d'entrée, à savoir A et B, et d'un port de sortie C avec deux cavités introduites dans les deux guides d'entrée de la jonction-Y.

Les longueurs des branches d'entrée de la structure de cette porte logique « OR » sont identiques et les signaux lumineux de deux ports d'entrée interfèrent de manière constructive ou destructive à un déphasage de 0 ou 180°.

- Les cavités introduites à la jonction dans les deux guides d'entrée sont destinées à diriger le signal lumineux du port d'entrée vers le port de sortie C en éliminant les signaux d'ordre supérieur, pour améliorer la transmission. Lorsque la transmission de sortie est supérieure à 0,6, cela peut être lu comme un "1" logique.
- Sans ces deux cavités, la transmission de sortie est inférieure à 0,4 ce qui ne peut être lu comme un « 1 » logique (Figure IV.21).

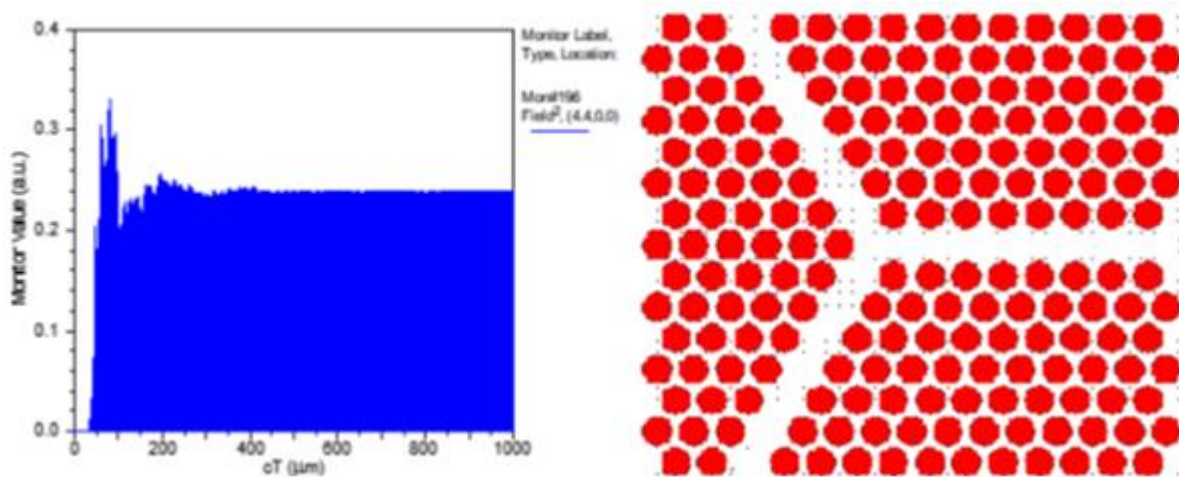


Figure IV. 21 : Diagramme de transfert de puissance pour la porte logique « OR » tout optique sans microcavités

Des simulations ont été réalisées sur la structure de porte logique "OR" proposée en utilisant la méthode FDTD et en appliquant un signal lumineux de profil gaussien à l'entrée avec une longueur d'onde de $1,55 \mu\text{m}$. La cavité qui correspond à la création d'un défaut substitutionnel dans le cristal photonique peut servir de filtre optique pour la réalisation de cette grille. La porte logique "OR" est utilisée pour additionner deux entrées, sa sortie est logiquement égale à "1" si les deux ou l'une des entrées est égale à "1"[18].

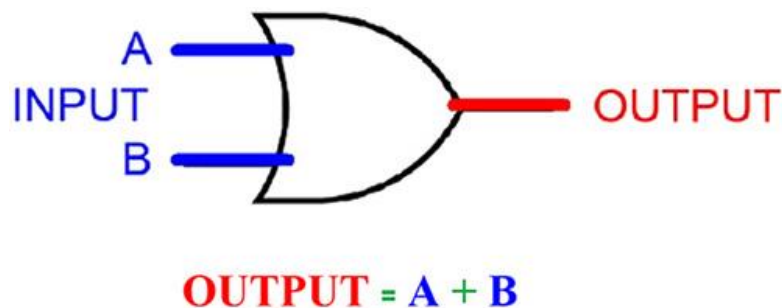


Figure IV. 22 : Symbole de la porte logique « OR »

Le principe de fonctionnement de la porte logique « OR » repose sur le filtrage fréquentiel des différentes ondes. Les résultats obtenus en simulant la distribution du champ optique pour la porte logique "OR" sont présentés sur la figure (IV.23). Pour le fonctionnement de la porte logique "OR" proposée, le premier cas où les deux entrées sont démarrées avec un état logique différent, le déphasage sera créé dans lequel la cavité est couplée dans les deux sens. La combinaison de ce couplage et l'influence des microcavités à rayon réduit créent un fort effet constructif. Par contre, lorsque les entrées sont mises à l'état logique "1", l'effet constructif est imposé dans les deux types de fonction logique, les microcavités à rayon réduit servent à filtrer et à augmenter progressivement le signal de sortie.

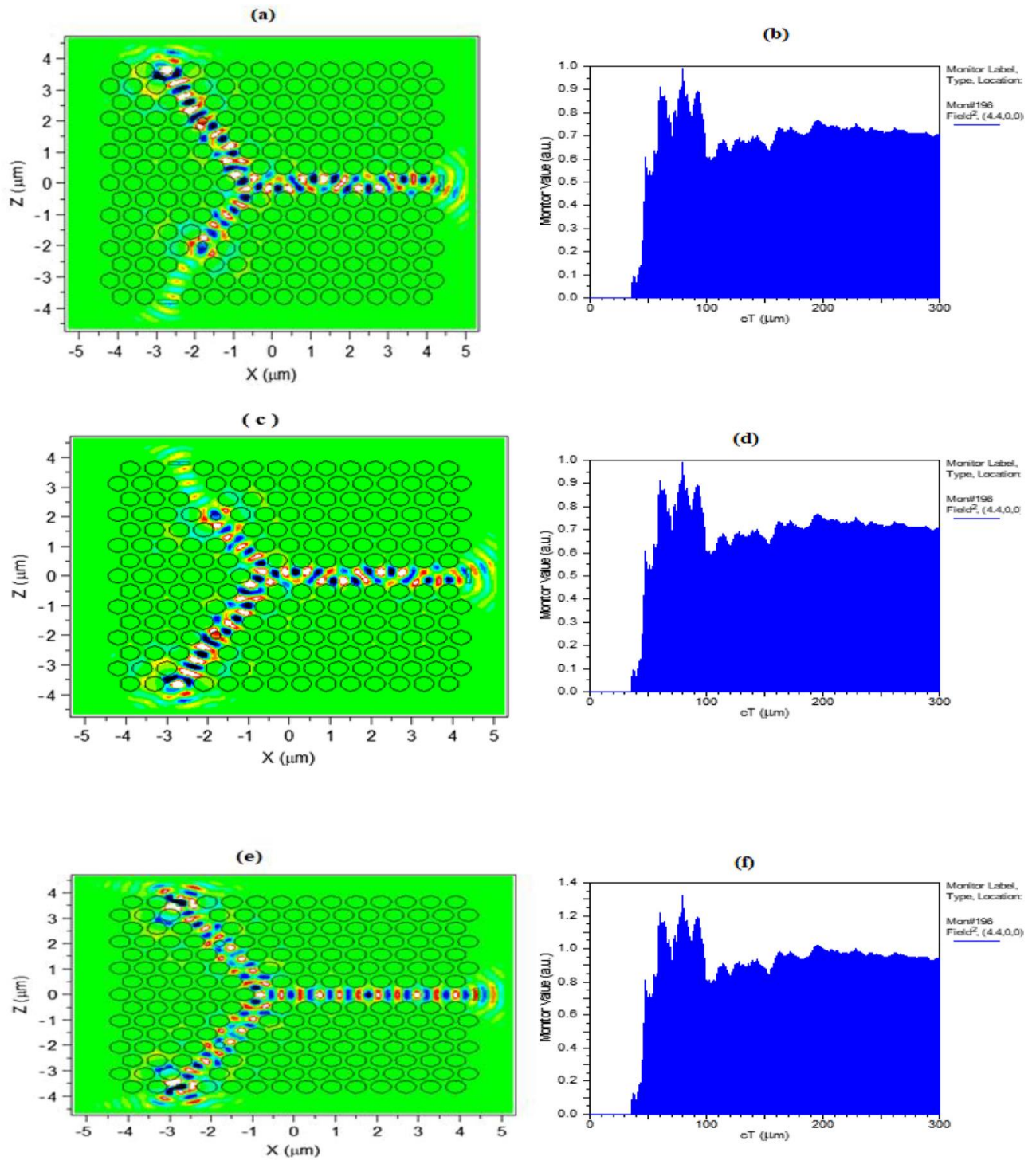


Figure IV. 23 : La distribution du champ optique de la porte logique « OR » pour (a) $A= 1, B = 0$
 (c) $A = 0, B = 1$;(e) $A = 1, B = 1$; (b), (d), (f) : diagramme de transfert de puissance

Comme pour la porte AND à cristal photonique, la porte OR à cristal photonique présente plusieurs avantages par rapport aux circuits logiques électroniques traditionnels, notamment une plus grande vitesse de fonctionnement, une plus grande bande passante et une faible consommation d'énergie. Elle peut également être utilisée dans les ordinateurs quantiques, les réseaux de communication optiques et les systèmes de traitement de l'information optique.

En plus, dans des milieux fortement amplificateurs, le problème du niveau du signal d'entrée ne se pose plus. En effet, les interférences n'affectent pas la transmission du signal, il est donc possible de créer des systèmes logiques avec des dispositifs optiques à base de cristaux photoniques en jouant sur le couplage et les paramètres de ces dispositifs.

En conclusion, la porte "OR" proposée montre de très bonnes performances en fonction de son intensité de puissance, ce qui est très satisfaisant par rapport aux conceptions précédentes. De plus, son débit binaire élevé, sa simplicité, sa transmission et son temps de réponse court.

IV. 3. Autre application de la jonction-Y (Le diviseur optique) :

Les guides en forme de division optiques, appelés également Guides-Y 1×2 jouent un rôle clé dans les circuits optiques intégrés [19]. Il existe plusieurs types de diviseurs optiques, mais le plus courant est le diviseur de faisceau en deux. Ce type utilise généralement un cube de verre ou un prisme à angle droit pour diviser le faisceau en deux. Le faisceau incident entre par l'un des côtés du cube ou du prisme et réfléchi à un angle de 90 degrés, créant ainsi deux faisceaux distincts.

Un diviseur à cristal photonique est un composant optique qui utilise un cristal photonique pour diviser la lumière en deux ou plusieurs faisceaux distincts.

Dans un diviseur à cristal photonique, la lumière est injectée dans le cristal photonique à une longueur d'onde spécifique. Le diviseur optique est conçu de manière à ce que la lumière soit divisée en deux ou plusieurs faisceaux distincts ; ce faisceau de lumière divisée peut être utilisé pour des applications telles que la détection de photons individuels, la communication optique, la spectroscopie et l'imagerie.

Nous présentons une autre application de la jonction-Y optimisée, contrairement à une jonction-Y standard formée d'un guide linéaire avec deux branches orientée d'un angle « α », la figure (IV.24) montre la structure d'un diviseur optique formé d'une jonction-Y qui contient deux cavités introduites à l'intersection des trois guides.

En changeant les ports d'Entrée/Sortie (Entrée : Port C/ Sortie : Port A et Port B) de la structure étudiée précédemment on peut obtenir une structure simple compacte et connectée d'un diviseur optique.

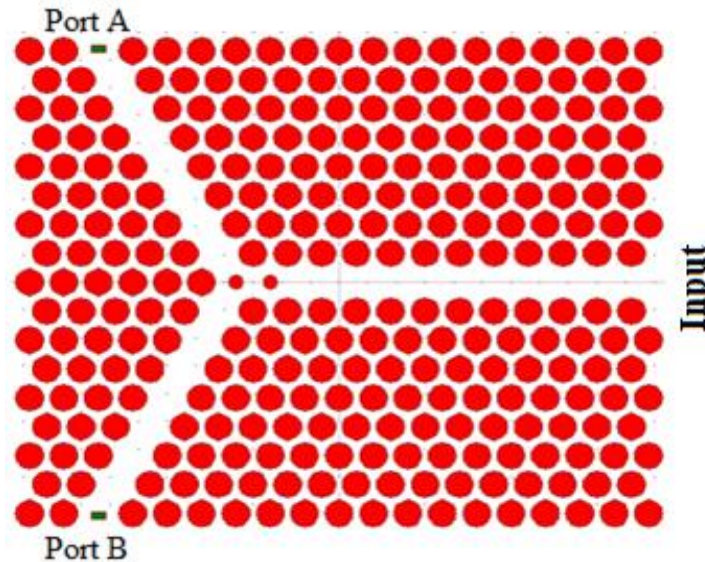


Figure IV. 24 : Structure de base du diviseur optique proposé

Comme il est indiqué précédemment les deux cavités ont un rôle intéressant pour applications à des structures à base des cristaux photoniques sensibles. Car elles améliorent la transmission calculée dans les deux ports de sortie A et B, et pour mieux voir le comportement de la lumière à l'intérieur du diviseur proposé on a utilisé le simulateur RSoft.

La figure (III.25) : montre la propagation de la lumière dans le diviseur sans les deux cavités, il est très clair que la lumière est faiblement guidée à cause des pertes dans l'intersection des trois guides d'onde de notre structure.

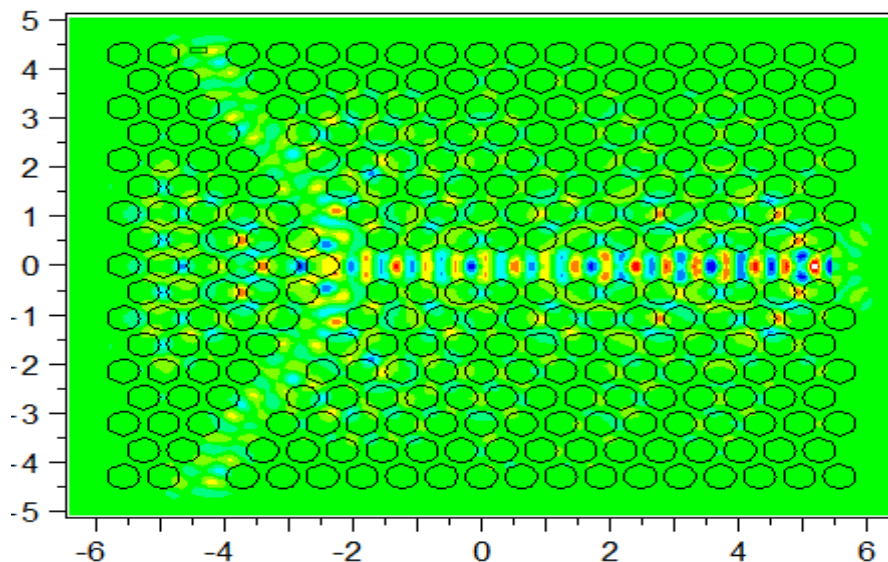


Figure IV. 25 : La structure du diviseur optique sans cavités

Après l'ajout des deux cavités (figure IV.26) on observe bien que la lumière est piégée par les cavités ce qui a donné un bon confinement de la lumière et une diminution des pertes dans la structure du diviseur optique proposé.

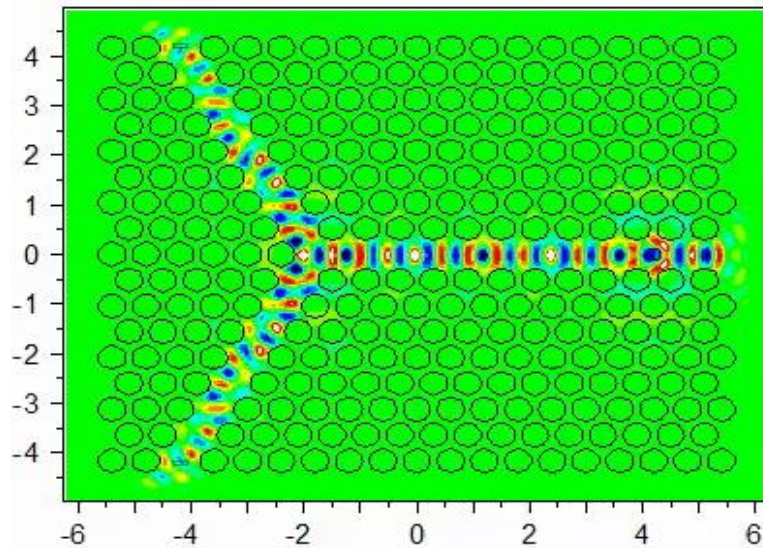


Figure IV. 26 : La structure du diviseur optique avec deux cavités

Si on compare ces deux figures (IV.25) et (IV.26), on remarque bien que le couplage des cavités avec les guides qui forment la jonction-Y permet de réduire les interférences modales (pertes) au niveau des virages de la structure étudiée.

On conclut que la structure optimisée peut fonctionner comme un diviseur optique à base de cristaux photoniques qui possède des avantages potentiels en termes de faibles pertes de signal, de large bande passante et de haute efficacité par rapport aux diviseurs traditionnels, et qu'il peut être utilisé dans les circuits intégrés, les interféromètres et d'autres dispositifs optoélectronique, les applications d'imagerie, de mesure, de spectroscopie et de télécommunications. Par exemple, dans les microscopes, les diviseurs optiques sont utilisés pour diviser le faisceau lumineux en deux voies, une pour l'éclairage et l'autre pour l'imagerie. Dans les applications de télécommunications, les diviseurs optiques sont utilisés pour diviser le signal lumineux entrant en plusieurs signaux afin qu'ils puissent être transmis à plusieurs destinataires. Cependant, leur mise en œuvre est encore en développement et nécessite une technologie de fabrication avancée.

IV. 4. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudiée la structure de la jonction-Y à base des cristaux photoniques couplée avec deux microcavités, en commençant par l'étude de cette dernières et l'influence des différents paramètres sur sa transmission.

Ensuite nous avons étudié la jonction-Y et voir sa transmission à l'aide du simulateur RSoft et on a pu constater l'existence des pertes au niveau des virages. Cette jonction-Y a été optimisée en utilisant le couplage avec une et deux cavités insérées à l'intersection des trois guides de cette jonction-Y.

Après la simulation de la jonction-Y avec les deux cavités introduites à l'intersection des trois guides de cette jonction, nous avons constaté un taux de transmission plus élevé que celui de la jonction-Y standard, et on a confirmé que la cavité peut être utilisé comme un filtre dans les guides d'ondes à base des cristaux photoniques.

D'autres parts on a présentée l'application de la structure étudiée dans les portes logiques, précisément la porte logique AND et la porte logique OR, la simulation de ces deux portes à donner des résultats très satisfaisants au niveau de la transmission, le rapport de contraste et le temps de réponse.

A la fin nous avons utilisé la structure de la jonction-Y optimisée avec deux microcavités comme une application logique d'un diviseur optique dont on a injecté la lumière dans le sens inverse (Port C) ce qui a donné une division parfaite et un bon confinement de la lumière à l'intérieur de la jonction-Y.

Ces études aboutissent à la conception des structures à base des cristaux photoniques, qui sont très utilisé dans le domaine de télécommunication.

IV. 5. Références du chapitre IV :

- [1]. M Bouda, Naito T, “High-capacity upstream DWDM extended reach PO based on colourless CWDM transmitters with single nominal wavelength”. In: 34th European Conference on Optical Communication (2008).
- [2]. Y Fujii, Aoyama K, Minowa J “Optical demultiplexer using a silicon echelette grating”. IEEE J Quantum Electron 16:165–169. <https://doi.org/10.1109/JQE.1980.1070454>. (1980).
- [3]. Hideo Kosaka, and all, “Photonic crystals for micro lightwave circuits using wavelength-dependent angular beam steering”: Applied Physics Letters, aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.123553.
- [4]. R Massoudi, Najjar M, Mehdizadeh F, Janyani V “Investigation of resonant mode sensitivity in PhC based ring resonators”. Opt Quantum Electron. <https://doi.org/10.1007/s11082-019-1793-0>. (2019)
- [5]. Seifouri M, Fallahi V, Olyae S “Ultra-high-Q optical filter based on photonic crystal ring resonator”. Photonic New Communication. doi.org/10.1007/s11107-017-0732-x .(2018)
- [6]. H Alipour-Banaei, Jahanara M, Mehdizadeh F “T-shaped channel drop filter based on photonic crystal ring resonator”. Optik. doi.org/10.1016/j.ijleo.2014.06.056.(2014)
- [7]. P. Rani, K. Yogita, R. K. Sinha, “Design of all optical logic gates in photonic crystal waveguides”. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 950-955, May 2015
- [8]. F.Parandin, Mohammad Mehdi Karkhanechi. “Terahertz all-optical NOR and AND logic gates based on 2D photonic crystals”, Superlattices and Microstructure, vol 101. 253-260,2017
- [9]. S Enaul haq, N Rangaswamy “Investigation on PhC based T-shaped Waveguide as All-Optical XOR, NOT, OR and AND Logic Gates”, IEEE International Conference on Industrial and Information System (ICIIS), 2017.
- [10]. J. Ouellete, "Seeing the future in photonic crystals," The Industrial Physicist, vol. 7, no. 6,14–17, 2002
- [11]. M Zavvari,., & Mehdizadeh, F.“Photonic Crystal Cavity with L3-Defect for Resonant Optical Filtering”. Frequenz, 68(11-12), 2014
- [12]. M Rai, Buddhi. “Modeling Transmission of Photonic Crystal Waveguide Modes Enhanced by Kerr Nonlinearity”. Dissertations. 70, Western Michigan University, 2012
- [13]. S Inoue, “Nonlinear Optical Polymer Photonic Crystals and Their Applications”. Organic Nanophotonics, 141 158, 2014
- [14]. L, Jian-Jun & Fan, Zhi-Gang & Xiao, Hao-Su & Zhang, Wang & Guan, Chun-Ying & Yuan, Libo. “Photonic band gap in Ge-based two-dimensional triangular lattice photonic crystals”. Journal of infrared and millimeter waves. 31. 35-41. [10.3724/SP.J.1010.2012.00035](https://doi.org/10.3724/SP.J.1010.2012.00035).(2012).
- [15]. R.Derdour & Lebbal, M. & Benmerkhi, Ahlem & Boumaza, T. & Bouchemat, Mohamed & Mirouh, F.Z Mirouh. An Optimized and Logic Gate with High Transmission and Low Losses Based on Y-junction. Acta Physica Polonica A. 135. 782-785. [10.12693/APhysPolA.135.782](https://doi.org/10.12693/APhysPolA.135.782). (2019).
- [16]. Billah, and all. “Hybrid integration of silicon photonics circuits and InP lasers by photonic wire bonding”. Optica. 5. [10.1364/OPTICA.5.000876](https://doi.org/10.1364/OPTICA.5.000876). (2018).
- [17]. Z. Diao, “Investigation of 2D photonic crystals and their applications on terahertz quantum cascade lasers”, Optical Trapping and Sensing," Thèse de doctorat, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, N° 5745, 2013
- [18]. Li, Zheng-Hong & Ji, Xiao-Fei & Asiri, Saeed & Wang, Luojia & Al-Amri, Mohammad. “Counterfactual logic gates”. Physical Review A. 102. [10.1103/PhysRevA.102.022606](https://doi.org/10.1103/PhysRevA.102.022606). (2020).
- [19]. Li, Manman & Yan, Shaohui & Zhang, Yanan & Chen, Xu & Yao, Baoli. (2021). “Optical separation and discrimination of chiral particles by vector beams with orbital angular momentum”. Nanoscale Advances. 3. [10.1039/D1NA00530H](https://doi.org/10.1039/D1NA00530H).

CONCLUSION



Conclusion générale

Développer les cristaux photoniques pour le traitement tout optique du signal, est une alternative prometteuse pour casser la limitation des circuits électroniques conventionnels. C'est pour cette raison que la communauté scientifique recherche une possibilité de contrôler le signal avec la lumière au moyen des cristaux photoniques. En basant sur l'application des cristaux photoniques comme une plateforme polyvalente pour créer des dispositifs optiques à l'échelle nanométrique ce qui rend les cristaux photoniques indispensables dans le domaine de la communication optique en raison de certaines propriétés majeures telles que la compacité, la vitesse de transfert des données élevée, la faible consommation d'énergie.

Dans cette thèse de recherche, notre but est de concevoir des portes logiques tout optique sur une base de réseau à cristaux photoniques à deux dimensions connectés possèdent des performances améliorées en termes de vitesse, de compacité, de rapidité, et de fiabilité, afin de rendre ces portes logiques toutes optiques adaptés aux opérations de la logique booléenne à grande vitesse. Les structures proposées ont été modifiées pour assurer l'intégralité de la bande conventionnelle qui couvre la gamme de fréquence qui s'étend de $1.50\mu\text{m}$ à $1.60\mu\text{m}$. Nous avons changé les paramètres des structures proposées pour assurer son fonctionnement dans la longueur d'ondes de communication $1.55\mu\text{m}$.

En basant sur les défauts d'interférences dans les structures à base des cristaux photoniques et sur le type des matériaux utilisés, comme le silicium (Si) et le germanium (Ge) et arséniure de gallium (GaAs) qui sont considérés parmi les matériaux semi-conducteurs, on a réalisé des portes logiques toutes optiques avec de hautes performances. Tels que ; la porte logique **AND** qui est utilisée dans les circuits électroniques et les systèmes de traitement de l'information pour la comparaison de bits, la sélection de bits, le multiplexage logique et la conception de circuits logiques. La porte **AND** sert également de porte d'échantillonnage dans les oscilloscopes à échantillonnage optique en raison de leur fonctionnement ultrarapide par rapport aux méthodes électriques traditionnelles. La porte logique **OR** est aussi largement utilisée dans les circuits électroniques et les systèmes de traitement de l'information pour l'addition binaire, la détection de niveau, la conception de circuits logiques et la commande de circuits. La porte logique tout optique **OR** est utilisée dans les systèmes optiques de traitement de l'information pour le traitement des signaux optiques, la conception de circuits optiques, le traitement des images et le traitement des données optiques.

De plus on a inversé les ports d'entrée et de sortie de notre structure étudiée, ce qui a donné un autre dispositif optique important dans le domaine de communication, qui est le diviseur de puissance. Ce dernier est très utilisé dans les applications optiques pour diviser la puissance optique et diriger la lumière vers différents dispositifs optiques ou pour séparer différents signaux optiques dans un système optique. Le diviseur optique peut être utilisé en conjonction avec d'autres composants optiques pour réaliser des fonctions optiques plus complexes.

A la fin de cette étude on peut conclure qu'il existe plusieurs approches pour concevoir des portes logiques à base de cristaux photoniques. L'une des approches courantes est l'utilisation de guides d'ondes optiques, qui permettent de contrôler la propagation de la lumière à l'intérieur de la structure. Une autre approche courante est l'utilisation de résonateurs optiques, qui permettent de confiner la lumière dans des régions de la structure où elle peut interagir avec d'autres composants optiques pour réaliser des fonctions logiques. Les cristaux photoniques peuvent également être utilisés pour réaliser des portes logiques optiques non linéaires.

En résumé, il est possible de concevoir des portes logiques à base de cristaux photoniques en exploitant les propriétés optiques des cristaux photoniques, telles que la bande interdite photonique, les guides d'ondes optiques, les résonateurs optiques et les propriétés optiques non linéaires.

Résumé

La réalisation des circuits intégrés optiques est un processus complexe qui implique des technologies avancées de fabrication de semi-conducteurs et des techniques de conception de circuits optiques. Les circuits intégrés optiques sont utilisés dans une variété d'applications, notamment les communications optiques, la détection optique et la mesure optique.

Dans notre thèse, on a proposé une nouvelle structure connectée d'un cristal photonique bidimensionnel, afin d'avoir des portes logiques AND/OR de taille très compacte avec des faibles pertes et une transmission satisfaisante. Elles sont conçues via une jonction à cristal photonique en forme de « Y » couplée avec deux microcavités pour maîtriser les interférences et contrôler le confinement de la lumière à l'intérieur de guides d'ondes.

Les résultats obtenus prouvent la fiabilité de la structure étudiée et l'efficacité des portes logiques proposées en termes de transmission, de rapport de contraste et de temps de réponse. Dans le même contexte, nous avons présenté une nouvelle structure d'un diviseur de puissance, en changeant les ports d'entrée/ sortie de la structure initiale ; les résultats trouvés sont très utiles dans plusieurs circuits optiques tels que la microscopie, l'analyse spectrale, les lasers, l'interférométrie, les réseaux de neurones optiques et dans la communication optique.

Mots clés : Cristaux photoniques, Effet d'interférence, Porte logique tout optique, FDTD, Taux de contraste, Transmission.

ملخص:

تعد عملية تحقيق الدوائر المتكاملة الضوئية عملية معقدة تنطوي على تقنيات متقدمة في تصنيع نصف النواقل وتقنيات تصميم الدوائر الضوئية. وتستخدم الدوائر المتكاملة الضوئية في مجموعة من التطبيقات، بما في ذلك الاتصالات الضوئية والكشف الضوئي والقياس الضوئي.

اقترحنا من خلال عملنا هيكل أو بنية جديدة متصلة لبلورة فوتونية ثنائية الأبعاد، من أجل الحصول على بوابات منطقية (أو/و) مضغوطة بحجم صغير وبخسائر منخفضة وارسال مرضي. مصممة باستخدام بلورة فوتونية مقترنة بفجوتين متناهييتين في الصغر للتحكم في التداخل واحتجاز الضوء داخل الواجهات الثلاث.

وقد أثبتت النتائج موثوقية الهيكل المدروس وفعالية بوابات المنطق المقترحة من حيث النقل ونسبة التباين وزمن الاستجابة.

في نفس السياق، يتم تقديم هيكل جديد لمقسم الطاقة، من خلال تغيير منافذ الإدخال والإخراج للهيكل الأصلي. النتائج المتحصل عليها مفيدة جدًا في الدوائر الضوئية المختلفة مثل المجهر، وتحليل الطيف، والليزر، والتداخل، وشبكات الأعصاب البصرية، والاتصال الضوئي.

الكلمات المفتاحية: بلورات فوتونية، تأثير التداخل، بوابة منطقية بصرية. نسبة التباين، الارسال.

Summary:

The realization of optical integrated circuits is a complex process that involves advanced semiconductor manufacturing technologies and optical circuit design techniques. Optical integrated circuits are used in a variety of applications, including optical communication, optical detection, and optical measurement.

We proposed a new connected structure of a two-dimensional photonic crystal, in order to have AND/OR logic with low losses and satisfactory transmission. They are designed using a photonic crystal "Y" junction coupled with two microcavities to control interference and confinement of light within the three waveguides.

The results demonstrate the reliability of the studied structure and the effectiveness of the proposed logic gates in terms of transmission, contrast ratio, and response time. In the same context, a new structure for a power splitter is presented, by changing the input/output ports of the initial structure. The results obtained are very useful in several optical circuits such as microscopy, spectral analysis, lasers, interferometry, optical neural networks, and optical communication.

Keywords: Photonic crystals, interference effect, all-optical logic gate, FDTD, contrast ratio, transmission.