République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

UNIVERSITE DE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE

FILIERE : GENIE ELECTRIQUE

OPTION : MICRO-ELECTRONIQUE

Thème

Etude du couplage dans les guides d'onde à cristaux Photoniques bidimensionnels

Présenté par :

Boudraa Ali

Encadré par :

Dr: Kahlouche Ahmed

N˚d'ordre :

Promotion : Juin 2015

Dédicace

Je dédie ce modeste travail, à toi ma chère mère, pour tout ce que tu as fait pour Moi, et pour mes frères et mes sœurs, pour vous contribution morale et matérielle à la prospérité de notre famille. Tous les mots et les expressions n'expriment pas ma reconnaissance et ma gratitude envers toi, à mon cher père, pour ton soutien constant et inconditionnel, pour tes conseils et tes encouragements.

À tous les membres de ma chère famille en particulier mes frères, mes sœurs ,mes belles-sœurs, sans oublier mes beaux-frères qui ont toujours été là pour moi, qui ont su par tant de sacrifices me soutenir et m'encourager durant toutes mes années d'étude et sans lesquels je n'aurais jamais réussi.

À mes amis, Avec lesquelles je partage des moments inoubliables dans ces années d'étude.

À tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail, Qu'ils m'excusent de ne pas pouvoir les citer au risque d'oublier quelqu'un.

ALI

Remerciements

Ce travail du mémoire a été effectué au sein de faculté de technologie département d'électronique université de M'sila. C'est pourquoi mes remerciements vont en premier lieu à mon encadreur de mémoire le docteur KAHLOUCHE Ahmed. Qu'il trouve ici l'expression de ma grande gratitude pour avoir su me faire profiter de son expérience scientifique avec beaucoup de compétence et d'efficacité.

J'exprime mes sincères remerciements à monsieur le président, d'avoir accepté de présider le Jury de ce mémoire. Je tiens également à remercier les membres de jury, qui ont bien voulu accepter de faire partie du jury.

Je tiens à remercier aussi l'ensemble de mes collègues du département d'électronique trouveront ici l'expression de toute ma sympathie.

Enfin, je remercie toute personne ayant de près ou de loin contribué à l'élaboration de ce modeste travail et l'ensemble des enseignants qui ont assuré notre formation durant toutes ces années d'étude.

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I: GENERALITE SUR LES CRISTAUX PHOTONIQUES

Figure I.1 : Représentation schématique de cristaux photoniques unidimensionnels (1D), bidimensionnels (2D) et tridimensionnels (3D)**……...……...……**5

Figure I.2 : Exemples de cristaux photoniques naturels prise par microscope électronique à balayage : (a) Les opales naturelles constituées d'un réseau quasi-périodique de billes de silice, (b) Les papillons nommées Princeps nireus **.....** 6

Figure I.3: Structure périodique unidimensionnelle**……..**7

Figure I.4 : Structure « La Yablonovite »**……..**8

Figure I.5 : Exemples des structures artificiels 3D : structure cubique (1), tas de bois (2), structure spirale (3), quasi-diamant (4)**……...**8

Figure I.6 : Structure périodique 2D connectée**…….....**9

Figure I.7: Structure périodique 2D déconnectée**……**10

Figure I.8 : Image Microscope à Balayage Electronique (MEB) d'un cristal photonique gravé dans une hétéro-structure**……..**10

Figure I.9 *:* Le réseau carré**……..**11

Figure I.10 : Le réseau triangulaire**……..**11

Figure I.11 : Structure graphite**……**12

Figure I.12 : Structure Nitrure de Bore**……**12

Figure I.13 :(a) Défaut lacunaire ; (b) et (c) Défauts de substitutions**…….....**14

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

Figure I.15 : Différents types de guides d'ondes**……**15

Figure I.16 : Représentation du guide planaire à couches diélectriques**……...……..**16

Figure I.17 : Réflexion et réfraction d'un rayon optique à l'interface de deux milieux d'indice de réfraction n_1 et n_2 **……...…**16

Figure I.18 : Représentation réelle d'un guide d'onde de largeur W à base d'un CP2D **…..**17

Figure I.19 : Exemple de guides d'ondes dans un cristal photonique hexagonal**……**17

Figure I.20 : Virage réalisé dans un cristal photonique bidimensionnel**……..**18

Figure I.21 : Guide à cavités couplées réalisé dans un cristal photonique bidimensionnel**….**19

Figure I.22 : Principe de guidage dans les guides à cavités couplées**……..**20

Figure I.23 : Couplage entre guide à cristal photonique et guide à cavités couplées via un taper formé par la variation progressive du rayon des tiges situées entre les cavités**……...**21

CHAPITRE II : OUTILS DE SIMULATION

Figure II.1: Fenêtre principale du programme CAD**……...**27

Figure II.2: La fenêtre de démarrage (startup Window)**……..**28

Figure II.3: Nouvelle fenêtre pour réaliser un nouveau composant ou nouveau circuit**…….**28

Figure II.4: Arrangements de disposition de la rangée XZ**……..**29

Figure II.05: Disposition de rangée dans la fenêtre de CAD**……...**29

Figure II.6: Fenêtre des paramètres globales du circuit**……..**30

Figure II.7: L'éditeur du Tableau de symboles**……..**30

Figure II.8: Profil d'indice de la structure à cristaux photoniques 2D**……..**31

Figure II.9: La fenêtre de paramètres de simulation de BandSolve où des paramètres numériques de base de simulation sont entrés**……..**32

Figure.II.10: La fenêtre de paramètres de simulation de Full WAVE où des paramètres numériques de base de simulation sont entrés**……..…...**32

Figure II.11: Diagramme des bandes pour les modes TE et TM dans la structure FCP**…….**33

Figure II.12: Création de la cavité H1 avec le moniteur de temps placé au centre (à la place de la tige enlevée)**…….**36

Figure II.13: Le profil d'indice calculée de la structure de défauts**……**37

Figure II.14: La boîte de dialogue des paramètres de simulation (FullWave) **……...**37

Figure II.15: (a) Le spectre de longueurs d'onde trouvée à partir de la simulation de l'impulsion de la structure de défauts (b) les commandes utilisées pour afficher (WinPlot)**…**38

Figure II.16: Le mode de cavité calculée pour la longueur d'onde de résonance λ0= 1.1011µm de cette structure**……..**38

CHAPITRE III: Résultats et interprétations

Figure III.1: (a) Schéma d'un cristal photonique bidimensionnel formé par un réseau triangulaire de trous d'air percés dans le Inp, (b) la distribution de l'indice de réfraction.**.....**42

Figure III.2 : Diagramme de bande d'un cristal photonique 2D en polarisation TM pour n=1.55, r=0.19µm et a=0.5µm**……..**42

Figure III.3: Transmittance en fonction de la longueur d'onde normalisée pour n=1.55,r=0.19**……**43

Figure III.4 : Carte des bandes interdites en fonction de rayon des trous d'air**……...**44

Figure III.5 : Carte des bandes interdites en fonction de la période du réseau **……..**44

Figure III.6 : Vue de dessus de la cavité H1 formé par l'omission d'un trou d'air.Le paramètre maille et le rayon des trous sont respectivement a = 0.5µm et r =0.19µm**……..**45

Figure III.7: (a) Vue de dessus de la cavité H1 (silicium) formé par substitution, (b) Le spectre de transmission pour a = 0.5µm et r =0.19µm**……..**46

Fgure III.8: Vue de dessus de la cavité H1formé par la substitution d'un cylindre d'air par une tige de Gallium. Le paramètre maille et le rayon des trous sont a = 0.5µm et r =0.19µm**…….....**46

Figure III.9 : Spectre de transmission d'une cavité H1 pour trois marteaux, de paramètre de maille a=0.5µm constitué de tiges diélectrique de rayon r = 0.19µm**……..**47

Figure III.10: (a) Exemple de Cavité H1dans un réseau triangulaire de période 0.5µm et le rayon des trous d'air r=0.19µm, (b) le spectre de transmission**……**47

Figure III.11 : (a) Exemple d'une Cavité hexagonale H1 , (b) le spectre de transmission en fonction de la longueur d'onde **……**48

Figure III.12 : (a) vue de dessus d'un guide d'onde droit W1, (b) Le spectre de transmission du guide d'onde de référence W1 en fonction de la longueur d'onde**……..**49

Figure III.13: Guides à cavités couplées dans un cristal photonique hexagonale suivant la direction ΓM**……..**50

Figure III.14 : Structures d'un guide d'onde droit W1 : (a) à base de InP, (b) à base de Silicium et (c) à base de GaAs**……...**51

Figure III.15 : Le spectre de transmission pour trois types de guides W1 : vert pour le silicium, rouge pour l'indium de phosphore et noir pour le GaAs**……...**51

Figure III.16 : Guides à cavités couplées dans un cristal photonique bidimensionnels à réseau hexagonale suivant la direction ΓM**……...**52

Figure III.17 : Le spectre de transmission pour trois types de Guides à cavités couplées suivant la direction ΓM : noir pour le (a), rouge pour (b) et vert pour le (c)**……**52

Figure III.18: Guides à couplage par cavités suivant la direction ΓK réalisé dans une structure connectée à cristal photonique 2D à base de GaAs**……**53

Figure III.19: Guides à couplage par cavités suivant la direction ΓK réalisé dans une structure connectée à cristal photonique 2D à base de Silicium**……**54

Figure III.20: Guides à couplage par cavités suivant la direction ΓK réalisé dans une structure connectée à cristal photonique 2D à base de l'Indium de Phosphore**…….**55

Figure III.21: le spectre de transmission pour trois types de Guides à cavités couplées suivantla direction ΓK : rouge pour le silicium, vert pour l'indium de phosphore et noir pour le GaAs**……..……**55

Résumé

Les cristaux photoniques sont des structures dont l'indice diélectrique varie périodiquement selon une ou plusieurs directions de l'espace. Dans ces derniers apparaissent des bandes d'énergie interdites pour le champ électromagnétique, interdisant la propagation de la lumière dans certaines directions et pour certaines énergies. Ces caractéristiques confèrent aux cristaux photoniques des propriétés attrayantes quant à de nombreuses applications en optique intégrée. La fabrication de cristaux photoniques à trois dimensions est fastidieuse, et encore mal maîtrisée. Nous nous sommes limités dans ce travail à l'étude des cristaux photoniques à deux dimensions.

Le guide d'onde à cristaux photoniques W1 est l'un des dispositifs qui ont été largement explorés. La plupart de ces guides d'ondes sont conçus et fabriqués dans des réseaux triangulaires à trous d'air circulaires.

L'objectif de ce travail est l'étude du couplage dans les guides à cristaux photoniques bidimensionnels afin de minimiser les pertes de couplage entre les cristaux photoniques et le monde extérieur.

Mots clés: Cristaux photoniques 2D, bande interdite, guide d'onde, optique intégrée, Fullwave, Bandsolve.

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE…….. 2

CHAPITRE I: GENERALITE SUR LES CRISTAUX PHOTONIQUES

I.1. Introduction……..... 5

I.2. Définition…….. 5

I.3.Différents types des cristaux photoniques…….. 7

I.3.1. CRISTAUX photoniques unidimensionnels …….. 7

I.3.2. Cristaux photoniques tridimensionnels……... 7

I.3.3. Cristaux photoniques bidimensionnels……... 9

a- Structures dites «connectées» ……..... 9

b- Structures dites «déconnectées» ……..... 9

I.4. Différentes familles de cristaux photoniques bidimensionnels……... 10

I.4.1. Réseau carré……..... 10

I.4.2. Réseau triangulaire…….. 11

I.4.3. Le réseau hexagonal……..... 12

* Structure graphite……. 12

* Structure nitrure de Bore…….. 12

I.5. Analogie électron- photon…….. 13

I.6. Différents types de défauts……..... 13

I.6.1. Défauts ponctuels ……..... 13

I.6.2. Défauts étendus…… 14

I.7. Guides d'ondes à cristaux photoniques ……..... 14

I.7.1. Théorie des guides d'ondes classiques…… 15

I.7.2. Guide d'onde planaire ……... 15

I.7.3. Différents types des guides d'ondes…….. 16

I.7.3.1. Guide d'onde linéique……. 16

I.7.3.2. Guide d'onde courbée……. 18

I.7.4. Couplage entre guide à cristal photonique et guide à cavités couplées…… 18

I.7.4.1. Guide à cavités couplées……. 18

I.7.4.2. Principe de fonctionnement……. 19

I.7.4.3. Technique de couplage utilisée……... 20

I.8.Conclusion……..... 21

CHAPITRE II : OUTILS DE SIMULATION

II.1. Introduction……. 23

II.2. Méthodes de modélisation…….. 23

II.2.1. La méthode des ondes planes (PWE)…….. 23

II.2.2. La méthode FDTD……... 24

II.3. Présentation du logiciel Rsoft CAD…… 25

II.3.1. Environnement de CAD……... 25

II.3.2. Simulateur « BandSolve»…….. 26

II.3.3. Simulateur « FullWave»…….. 26

II.4. Les étapes de simulation d'un CP2D…….. 27

II.4.1. Créer un nouveau circuit…….. 27

II.4.2. Générer la structure de réseau…….. 29

II.4.3. Régler les paramètres globales……. 30

II.4.4. Définition des variables……... 30

II.4.5. Vérifier la structure…….. 31

II.4.6. Réglage des paramètres de simulation……. 31

II.4.7. Lecture des résultats…… 32

II.5. Diagramme des bandes……... 32

II.6. Calcul des modes de cavité …… 33

II.6.1. Procédure de calcul des résonances de la cavité…….. 34

II.6.2. Calcul du mode de Profile ……... 34

Méthode 1: semi-automatique de calcul de la mode…….. 35

Méthode 2: Utilisation de la sortie du territoire d'un moniteur de temps……... 35

II.7. Exemple de calcul de mode pour la cavité hexagonale ……. 36

a- Création de la cavité hexagonale ……... 36

b- Vérification de la structure …… 37

c- calcul des résonances ……. 37

d- affichage du spectre…… 38

e. Mode de calcul ……. 38

II.8. Conclusion…….. 39

CHAPITRE III: Résultats et interprétations

III.1. Introduction……... 41

III. 2. Définition de la structure d'étude……. 41

III.3. La bande interdite photonique…….. 42
III.4.La Carte des bandes interdites…… 43
III.5. Etude de la cavité hexagonale H1…….. 45
III.5.1. La structure étudiée ……..... 45
III.5.2. Cavité H1 par Substitution……. 45
III.5.3. Influence de la position de la cavité……..... 47
III.6. Les guides d'ondes…… 48
III.6.1. La transmission suivant la direction ΓK…… 48
III.6.2. La transmission suivant la direction ΓM……... 49
III.7. Evaluation des pertes…… 50
III.7.1. Les pertes linéiques suivant ΓK…….. 51
III.7.2. Les pertes linéiques suivant ΓM…… 52
III.8. Guides à cavités couplées…….. 53
III.9. Conclusion……. 56
Conclusion générale……... 58
Bibliographie…….. 60

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Les cristaux photoniques sont l'analogue des semi-conducteurs pour le contrôle des photons, les cristaux photoniques sont des structures dont l'indice de réfraction varie de manière périodique à l'échelle de la longueur d'onde que l'on souhaite contrôler, sur une ou plusieurs directions de l'espace. Cette variation périodique de l'indice optique suivant les différentes directions entraîne l'apparition des gammes de fréquence pour laquelle la lumière ne peut alors plus se propager. Par analogie avec les semi-conducteurs ces bandes de fréquences sont appelées Bandes Interdites Photoniques (BIP). Ces cristaux photoniques sont imaginés initialement en 1987 par E.yablonvitch et S.john [1].

Le domaine de l'optique intégrée, forme un vaste champ d'applications des cristaux photoniques. La conception de dispositifs optiques intégrés se base sur une ingénierie de défauts structurels, simples ou étendus, induisant dans la bande interdite photonique d'un cristal photonique bidimensionnel des états autorisés (modes de défauts). Les cristaux photoniques bidimensionnels offrent le meilleur compromis entre des propriétés intéressantes, notamment pour le domaine des composants pour l'optique intégrée, et une technologie de fabrication.

Les cristaux photoniques bidimensionnels étant d'excellents miroirs dans la bande interdite photonique, ils peuvent guider à volonté un signal lumineux, fonctionnalité de base de l'optique intégrée. Les cristaux photoniques représentent d'une part, des nouvelles voies pour la transmission de signaux avec hauts débits de transfert et insensibilité aux perturbations électromagnétiques. D'autre part, la miniaturisation des composants existants présente une grande motivation des recherches dans le domaine des cristaux photoniques [4].

Dans ce travail de mémoire nous nous sommes intéressés à l'étude des propriétés optiques des guides d'ondes à cristal photonique bidimensionnel fabriqués dans une matrice semi-conductrice à base de Phosphure d'indium. Ce manuscrit est constitué de trois chapitres:

Dans le premier chapitre, nous avons présenté brièvement les propriétés théoriques des cristaux photoniques bidimensionnels ainsi qu'une étude du guide d'onde à cristaux photoniques.

Dans le deuxième chapitre, nous décrirons les logiciels de simulation utilisés dans ce travail pour modéliser les propriétés des guides d'ondes à cristaux photoniques bidimensionnels structuré en réseau triangulaire en particulier: Le BandSolve basé sur la méthode des ondes planes et Le logiciel FullWave qui est basé sur la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD).

Le troisième chapitre est entièrement dédié à l'étude des propriétés de transmission et de réflexion dans un guide d'onde droit de type W1. Ensuite, nous insisterons sur l'évaluation des pertes

et nous étudierons l'influence d'un certain nombre de modifications apportées au guide W1 en vue d'améliorer la propagation de la lumière. Nous proposerons plusieurs leviers susceptibles d'améliorer les conditions de propagation de la lumière.

En fin, nous terminons ce mémoire par une conclusion.

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LES CRISTAUX PHOTONIQUES

I.1. Introduction

Les cristaux photoniques sont des matériaux dont le constant diélectrique varie de manière périodique à l'échelle de la longueur d'onde, suivant une ou plusieurs directions de l'espace. Dans ce premier chapitre, notre intérêt est porté sur les concepts de base des matériaux a bandes interdites photoniques et principalement sur les cristaux photoniques bidimensionnels (CPs2D). Tout d'abord, nous donnerons quelques définitions concernant les cristaux photoniques, les différentes classes des cristaux photoniques, les deux types de structures, le motif élémentaire et les différents types défauts [1].

D'autre part, nous donnerons l'analogie entre la propagation d'une onde électromagnétique dans ces milieux et la propagation des électrons dans un cristal photonique qui a mené à l'ouverture des bandes interdites photoniques.

I.2. Définition

Les cristaux photoniques sont des matériaux dont l'indice diélectrique varie de manière périodique à l'échelle de la longueur d'onde, sur une ou plusieurs directions de l'espace. La périodicité peut être unidimensionnelle 1D (miroir de Bragg), bidimensionnelle 2D ou encore tridimensionnelle 3D (Figure I.1). Cette 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. C'est l'analogie entre la propagation d'une onde électromagnétique dans ces milieux et la propagation des électrons dans un cristal photonique
qui a mené à l'appellation de ces bandes de fréquences «Bandes interdites Photoniques». La réalisation d'une périodicité sur toutes les directions de l'espace permet de réfléchir une onde Lumineuse quel que soit son angle d'incidence ou sa polarisation [2]

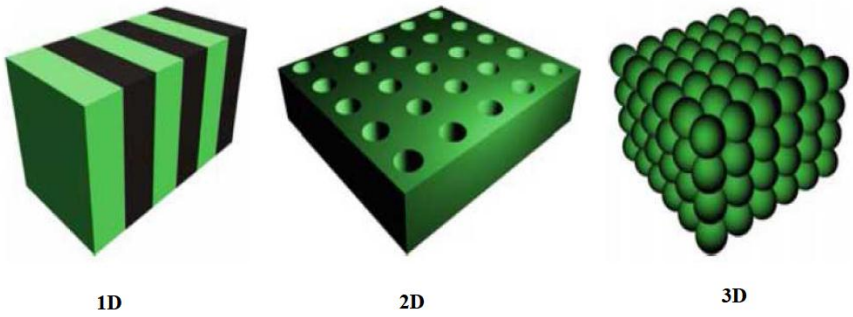
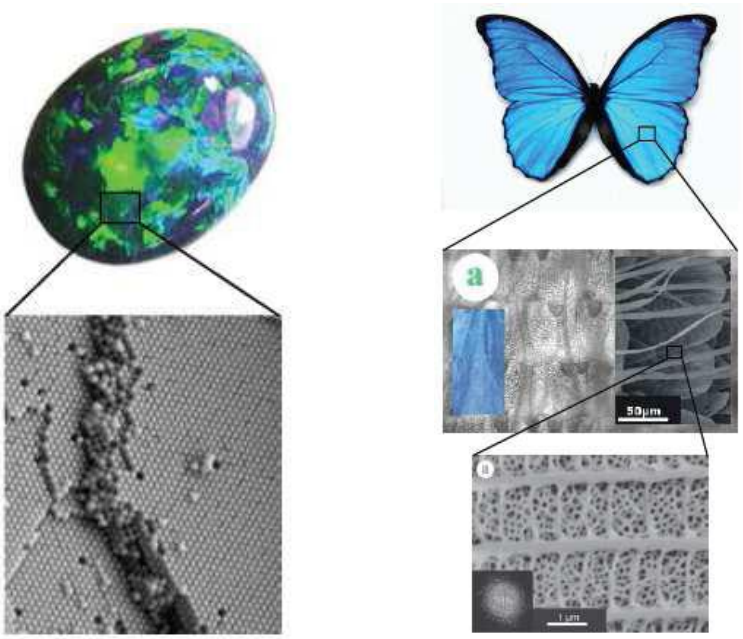


Figure I.1 : Représentation schématique de cristaux photoniques unidimensionnels (1D), bidimensionnels (2D) et tridimensionnels (3D).

Le problème de la propagation d'une onde électromagnétique dans un empilement multicouche périodique de diélectriques (cristal photonique 1D) connu plus généralement sous le nom de miroir de Bragg n'est en effet bien connu que depuis les années 60 [2]. Certaines espèces animales et minérales fabriquent et utilisent des structures présentant des périodicités d'indice dans une, deux ou trois dimensions de l'espace à des fins esthétiques et stratégiques depuis bien longtemps et ce n'est que finalement très récemment que l'homme y a trouvé un intérêt intellectuel (et financier). Ainsi, l'opale est une roche constituée de microbilles de silice reparties selon un arrangement régulier dans les trois dimensions de l'espace (Figure I. 2. (a)). De fait, c'est un cristal photonique naturel. L'opale n'est pas le seul exemple de cristal photonique naturel. On peut trouver dans la nature d'autres exemples comme celui des ailes de papillon Princeps nireus dont les magnifiques reflets bleu-vert sont dus à l'interaction entre la lumière ambiante et la micro-structuration naturelle de leurs ailes (Figure I. 2 (b)). Le phénomène physique sous-jacent étant la diffraction de la lumière par la micro structuration, responsable des interférences multiples dont la périodicité, qui peut être dans une, deux ou trois directions de l'espace, est de l'ordre de la longueur d'onde de la lumière incidente.



(a) **(b)**

Figure I.2 : Exemples de cristaux photoniques naturels prise par microscope électronique à balayage : (a) Les opales naturelles constituées d'un réseau quasi-périodique de billes de silice, (b) Les papillons nommées Princeps nireus [2].

I. 3. Différents types des cristaux photoniques

I. 3. 1. Cristaux photoniques unidimensionnels

Ces structures sont couramment utilisées sous le nom de réseau de Bragg [3]. Elles sont généralement réalisées par un empilement de couches d'indice de réfraction différent et d'épaisseur optique λg /4. λg: étant la longueur d'onde guidée autour de laquelle le matériau doit interdire la propagation des ondes électromagnétiques sous une incidence normale. Les réseaux de Bragg ont prouvé leur utilité dans de nombreuses applications : convertisseurs de modes pour fibres optiques, filtres sélectifs de longueur d'onde, multiplexeurs.

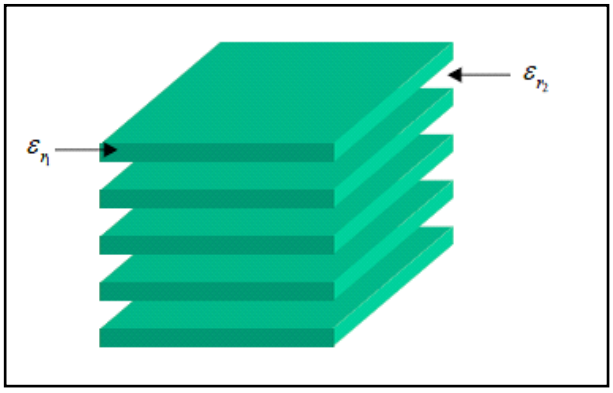


Figure I.3: Structure périodique unidimensionnelle [2].

Par rapport à un miroir de Bragg classique, celui à cristal photonique présente un avantage dans la mesure où il permet d'avoir une grande réflectance avec un nombre de couches réduit, ce qui permet de s'affranchir du même coup des problèmes de contraintes mécaniques. Ceci n'a été rendu possible que grâce à un contraste d'indice important.

I. 3. 2. Cristaux photoniques tridimensionnels

Les cristaux photoniques tridimensionnels (3D) suscitent encore beaucoup d'intérêts. Ce sont des structures tridimensionnelles périodiques suivant les trois directions de l'espace. Il existe un grand nombre de structures possibles. Le premier cristal photonique tridimensionnel a été fabriqué par S. Y. Lin et al. Il était formé de sphères de silicium arrangées selon une structure diamant. En 1993, E. Yablonovitch fabriquait un cristal photonique 3D en perçant chaque trou dans un bloc de plexiglas selon trois angles azimutaux séparés de 120° (Figure I. 4). Ce cristal photonique s'appelle d'après son inventeur "la Yablonovite". Avec ce cristal photonique, le concept de la bande interdite photonique a été démontré expérimentalement pour la première fois. De nombreuses méthodes de fabrication des cristaux photoniques tridimensionnels ont été proposées [3].

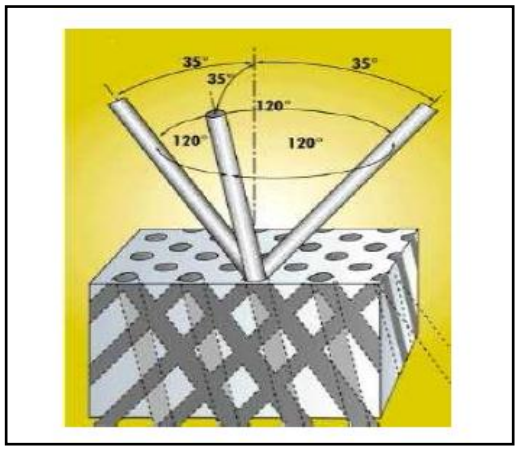


Figure I.4 : Structure « La Yablonovite »[4].

Auguste Bravais a établi un classement de différentes familles de cristaux. Il a montré que les cristaux peuvent se répartir en sept types de mailles (7 systèmes cristallins) et 14 types de réseaux (réseaux de Bravais). En réalité, peu de structures 3D possèdent une bande interdite complète. K. M. Ho et al [2] ont été les premiers à montrer théoriquement la présence d'une bande interdite complète dans une structure à symétrie cubique à face centrée (CFC) ou communément appelée structure diamant. La figure I.5 montre quelques exemples des cristaux photoniques artificiels 3D.

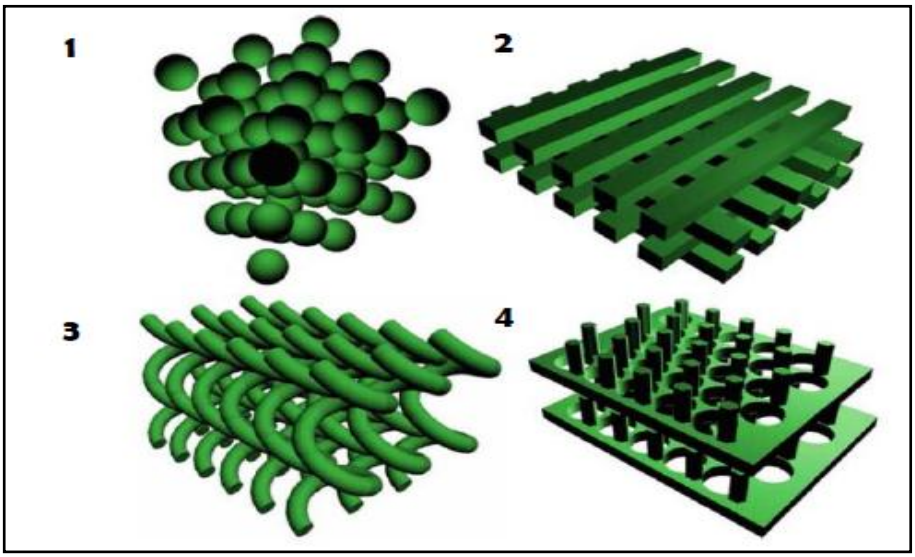


Figure I.5 : Exemples des structures artificiels 3D : structure cubique (1), tas de bois (2), structure spirale (3), quasi-diamant (4) [1].

Malgré les remarquables progrès reportés récemment, les technologies de fabrication des CPs 3D n'ont pas encore atteint des performances suffisantes pour envisager leur utilisation dans les prochaines générations de composants pour l'optique intégrée.

I.3.3. Cristaux photoniques bidimensionnels

Les cristaux photoniques bidimensionnels sont des structures périodiques suivant deux directions de l'espace et infinies suivant la troisième [3]. Il existe deux types de structures périodiques bidimensionnels:

a- Structures dites «connectées»

Dans ces structures l'indice de réfraction du motif élémentaire n_1 est inférieur à l'indice n_2 de la matrice diélectrique. Cette structure est constituée de trous d'air percés dans la matrice diélectrique comme il est montré sur la figure I.6.

b- Structures dites «déconnectées»

Dans ce cas, les motifs élémentaires sont d'indice n_1 supérieur à l'indice n_2 de l'espace inter-motifs comme il est représenté sur la figure I.7. Elles sont constituées de tiges diélectriques ou métalliques alignées périodiquement dans l'air.

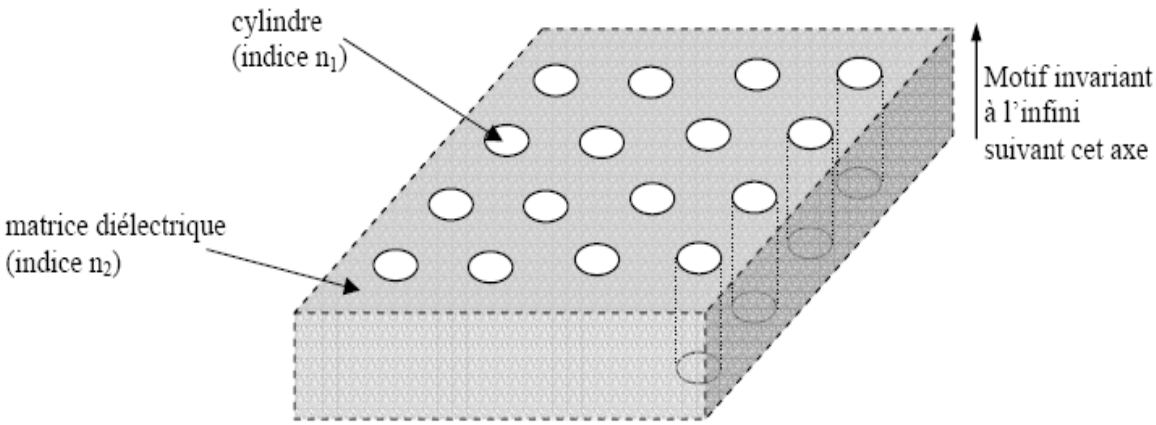


Figure I.6 : Structure périodique 2D connectée [5]

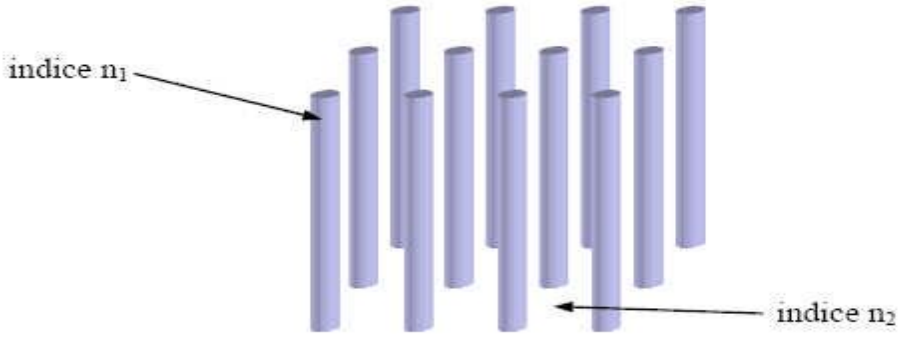


Figure I.7: Structure périodique 2D déconnectée [5].

Un cristal photonique 2D parfait est périodique dans le plan (Oxy) et infiniment long dans la direction (Oz) possède une bande interdite photonique dans le plan (Oxy). Ces systèmes n'existent pas dans la réalité. Pour compenser l'absence de bande interdite dans la direction perpendiculaire au plan de périodicité des cristaux 2D, la lumière peut être confinée dans une hétéro-structure d'indice. Cette dernière se compose d'une couche diélectrique de fort indice de réfraction (cœur) entourée de deux autres couches diélectriques d'indices de réfraction plus faibles (gaine) (Figure I. 7). Ces guides d'ondes planaires sont couramment utilisés en optique intégrée et sont facilement fabriqués par des techniques habituelles d'épitaxie.

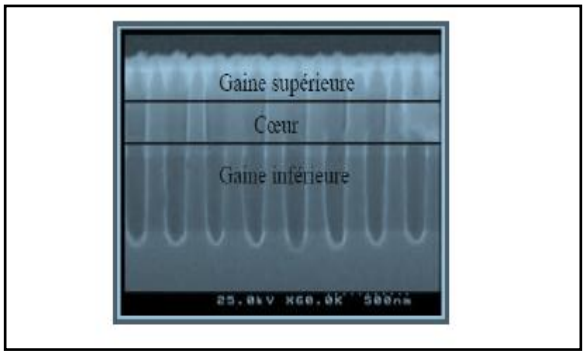


Figure I.8 : Image Microscope à Balayage Electronique (MEB) d'un cristal photonique gravé dans une hétéro-structure [6].

I.4. Différentes familles de cristaux photoniques bidimensionnels

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

I.4.1. Réseau carré

Les noeuds du réseau sont situés sur un carré de côté « a » (Figure I. 9). Il a été montré que ce type de réseau est très sensible à l'angle d'incidence et à la polarisation de l'onde

électromagnétique [3]. Il est ainsi difficile d'obtenir une bande interdite totale, c'est-à-dire une bande interdite qui empêche la propagation quelle que soit la polarisation.

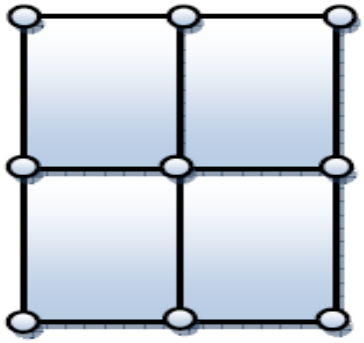


Figure I.9 : Le réseau carré [1]

I.4.2. Réseau triangulaire

Le réseau triangulaire, est le réseau 2D de plus haute symétrie dès lors que l'on se limite à un seul « atome » par maille. La zone de Brillouin est un hexagone. Chaque nœud du réseau est espacé de son proche voisin d'une même distance « a » (Figure I. 10). Cette structure est moins sensible à l'angle d'incidence que le réseau carré mais la bande interdite complète reste difficile à obtenir.

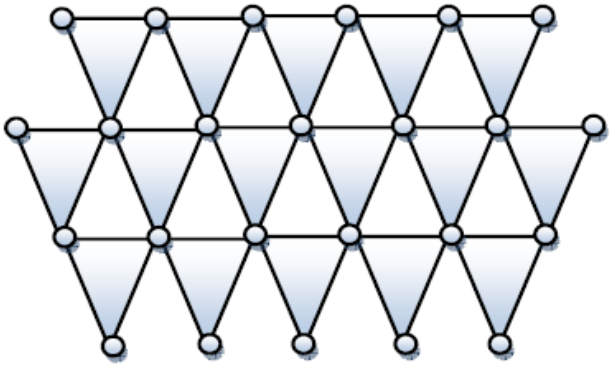


Figure I.10 : Le réseau triangulaire **[1]**

On peut imaginer des structures où les parties diélectriques sont déconnectées les unes des autres et des structures où les parties diélectriques sont connectées entre elles. Cependant, de part de sa géométrie, la structure « connectée » de trous dans le diélectrique offre un bon compromis lorsque le diamètre des trous est proche de la période du réseau. Dans ce cas, en effet, les parois des trous deviennent si fines que les parties diélectriques restantes sont presque déconnectées [4].

Une telle structure présente bien une bande interdite « complète ». Différentes réalisations expérimentales ont permis de le vérifier, d'abord dans l'infrarouge moyen, puis plus récemment aux longueurs d'onde des télécommunications optiques.

I.4.3. Réseau hexagonal

*** Structure graphite**

Sur un réseau hexagonal, si tous les noeuds sont identiques et espacés de « a », alors on appelle cette structure « graphite » car elle est similaire à la structure cristalline du graphite (Figure I. 11). À la différence du réseau triangulaire, il s'agit d'un réseau à deux « atomes » par maille. Le réseau réciproque est aussi un réseau hexagonal et la zone de Brillouin irréductible est la même que pour le réseau triangulaire avec les directions principales notées ΓM et ΓK [4]. La possibilité d'une bande interdite complète avait été prédite pour la première fois dans le cas d'un réseau de tiges diélectriques cylindriques.

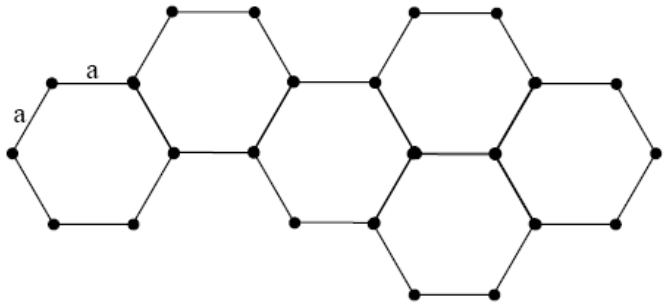


Figure I.11 : Structure graphite [7].

*** Structure nitrure de Bore**

Si un noeud diffère de son suivant par sa nature ou sa dimension, on obtient ainsi la structure cristalline du Nitrure de Bore (Figure I. 12). Celle-ci permet d'obtenir de larges bandes interdites.

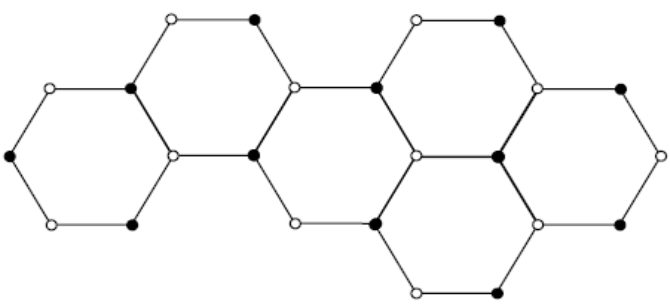


Figure I.12 : Structure Nitrure de Bore [7]

I.5. Analogie électron- photon

Les notions de «gap de photon » ou de « bandes interdites photoniques » sont issues de l'analogie entre électrons et photons ou, plus exactement, de celle entre fonction d'onde électronique et champ électromagnétique [8].

Les équations gouvernant la propagation de la lumière dans un cristal photonique sont les quatre équations de Maxwell.

$$\nabla \cdot \left(\varepsilon(r)E(r,t)\right) = 0 \qquad \text{I.1}$$

$$\nabla . H(r,t) = 0 \qquad \text{I.2}$$

$$\nabla \times E(r,t) = -\mu_0 \frac{\partial}{\partial t} H(r,t) \qquad \text{I.3}$$

$$\nabla \times H(r,t) = \varepsilon_0 \varepsilon(r) \frac{\partial}{\partial t} E(r,t) \qquad \text{I.4}$$

Après simplification des équations et en appliquant un ensemble d'opérations, on obtient

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\varepsilon(r)} \nabla \times H(r) \right) = \frac{\omega^2}{c^2} H(r) \qquad \text{I.5}$$

L'équation (I-5) est l'analogue formel de l'équation de Schrödinger décrivant le mouvement des électrons dans le potentiel périodique d'un cristal, $H(r)$ étant l'analogue électromagnétique de la fonction d'onde électronique $\psi(r)$ et $\varepsilon(r)$ l'analogue du potentiel atomique.

I.6. Différents types de défauts

Comme pour les semi-conducteurs, l'existence d'un défaut dans la périodicité du cristal va entraîner l'apparition de niveaux permis, appelés modes de défauts dans la bande interdite. La création d'un défaut consiste à briser localement la périodicité spatiale du réseau en ajoutant ou en enlevant localement un peu de matière diélectrique. Dans le cas d'un réseau de trous, le défaut consiste en l'omission d'un ou de plusieurs trous. On peut aussi créer des défauts en modifiant le rayon des trous.

Selon le nombre de trous modifiés, on peut distinguer plusieurs types de défauts dont les principaux sont les suivants :

I.6.1. Défauts ponctuels

Les défauts ponctuels sont créés en modifiant les caractéristiques d'une cellule du Réseau. Pour reprendre la terminologie de la physique du cristal, on peut réaliser alors des défauts lacunaires ou de substitution Figure I.12. Cela correspond à une micro-cavité à l'intérieur

du cristal photonique. Pour les cristaux photoniques constitués de trous dans un matériau diélectrique, (structure connectée), nous pouvons agir sur la géométrie de ces trous.

Les modes électromagnétiques introduits par le défaut sont appelés modes de défaut. Les caractéristiques de ces défauts ont été étudiées par plusieurs chercheurs. La transmission dans ces structures a été étudiée par Joanopoulos et al, qui ont montré théoriquement que les propriétés des modes de défauts peuvent être contrôlées en modifiant la taille et le type de défauts [8].

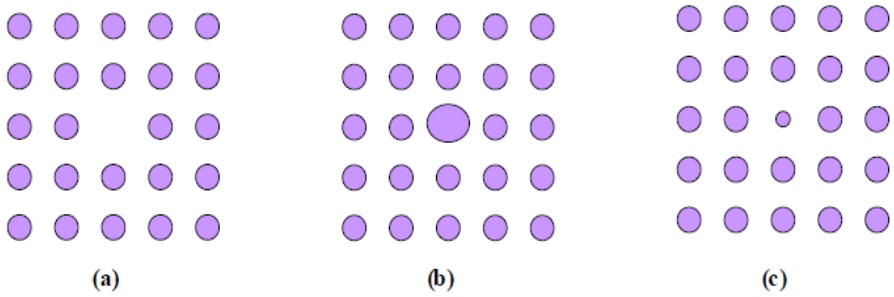


Figure I.13 :(a) Défaut lacunaire ; (b) et (c) Défauts de substitutions [6].

I.6.2. Défauts étendus

Parmi les défauts étendus, de dimension 1,2 ou 3, existent les défauts 1D (W1) (Figure I. 14). L'exemple de base est celui du guide d'onde linéaire W1 dans un cristal photonique2D. Une façon de réaliser un tel guide consiste à omettre une ou plusieurs lignes de trous.

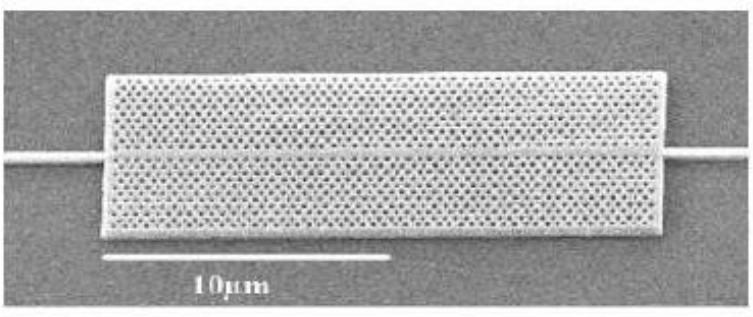


Figure I.14: Exemple de guide W1 à cristal photonique hexagonal de trous d'air sur un substrat de silicium sur isolant [8]

I.7. Guides d'ondes à cristaux photoniques

Le développement d'une optique intégrée à base de cristaux photoniques 2D passe par la conception et la réalisation de guides optiques performants. La première idée des guides d'ondes est apparue en 1994 sous l'impulsion de Joannopoulos, Meade et al, mais les premières réalisations ont été effectuées cinq à six ans plus tard [6].

Il est important de souligner que le mécanisme de guidage est complètement différent de celui existant dans les guides d'ondes classiques, puisque ce n'est pas la réflexion totale due à la différence d'indice de réfraction qui assure le guidage, mais l'existence d'une bande interdite photonique.

I.7.1. Théorie des guides d'ondes classiques

Le guide d'onde classique est un des fondements du développement de l'optique intégrée dans divers domaines, comme la communication optique et le traitement du signal optique. Il s'applique dans des fonctions de couplage, de modulation, de multiplexage, d'amplification. Généralement un guide est défini comme une structure permettant de confiner et de guider de la lumière. Il y a différentes sortes de géométries de guides, elles sont schématisées sur la figure I. 15.

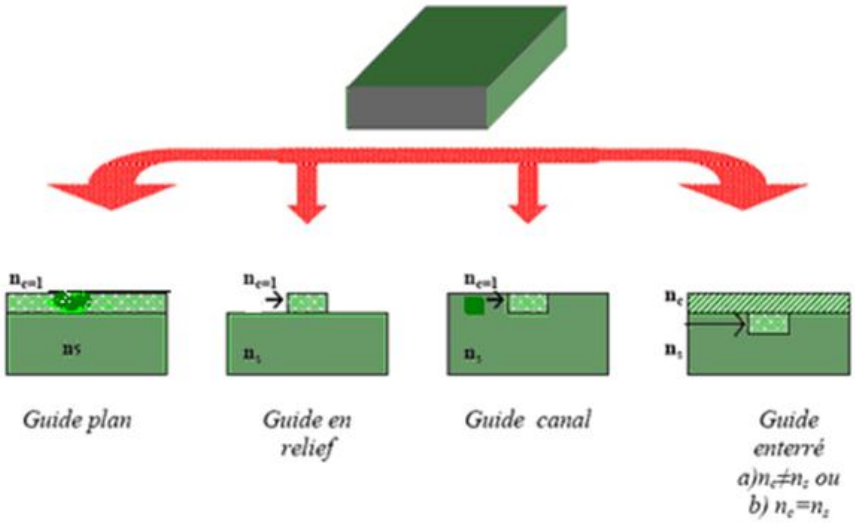


Figure I.15 : Différents types de guides d'ondes [7].

I.7.2. Guide d'onde planaire

Dans sa forme la plus simple, un guide classique est constitué d'une couche mince d'indice de réfraction n_f entourée d'un substrat d'indice $n_s \langle n_g$ et un revêtement supérieur d'indice $n_c \langle n_g$ (Figure I. 16) [6].

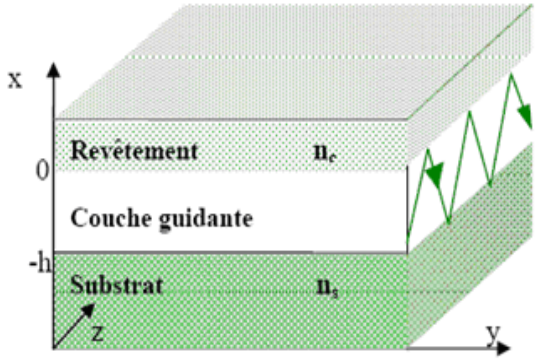


Figure I.16 : Représentation du guide planaire à couches diélectriques [7].

La lumière est confinée par réflexion totale aux interfaces couche-substrat et couche-revêtement. En considérant la lumière qui se propage dans la couche en tant que rayon lumineux, on obtient un trajet en forme de zigzag. Ce sont donc la réflexion aux interfaces diélectriques qui déterminent cette propagation (Figure I-16). Elles sont décrites par la loi bien connue de Snell-Descartes [8], à savoir (pour deux milieux d'indices de réfraction n_1 et n_2):

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2 \qquad \text{I-6}$$

Qui formule la dépendance entre l'angle de réfraction θ_2 et l'angle de réflexion θ_1 d'un rayon incident.

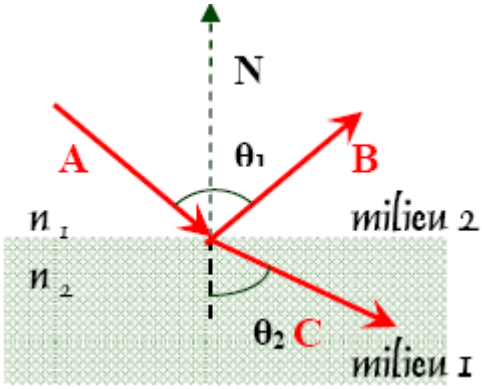


Figure I.17 : Réflexion et réfraction d'un rayon optique à l'interface de deux milieux d'indice de réfraction n_1 et n_2 [7].

I.7.3. Différents types des guides d'ondes

I.7.3.1. Guide d'onde linéique

Les guides à cristaux photoniques sont obtenus en créant un défaut linéique dans le cristal .Au sein de ces défauts, des modes ayant une fréquence appartenant à la bande interdite photonique peuvent exister. Pour des cristaux photoniques bidimensionnels, un guide à cristal photonique peut être crée en retirant (ou modifiant) directement une ou plusieurs rangées de

motifs du cristal photonique (Figure I. 18) [7]. Les guides formés de l'omission d'une ligne de trous sont appelés W1, ceux de deux lignes de trous W2, etc. …

Deux exemples sont rapportés sur la figure I-18 dans le cas d'un cristal 2D hexagonal.

-Le premier exemple (Figure I. 19 (a)) représente un défaut obtenu en retirant une rangée de motifs dans la direction ΓM.

-Le deuxième exemple (Figure I. 19(b)) correspond à un défaut obtenu en retirant une rangée de motifs dans la direction ΓK.

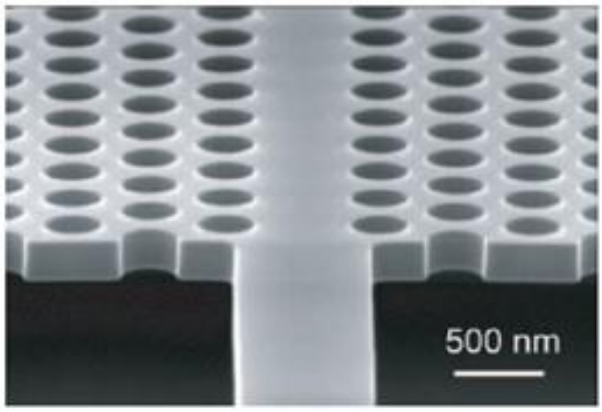
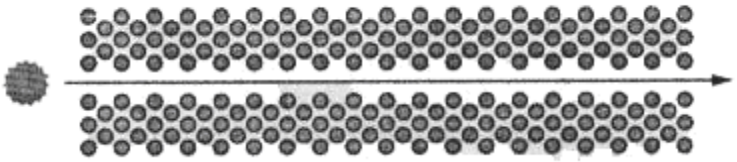
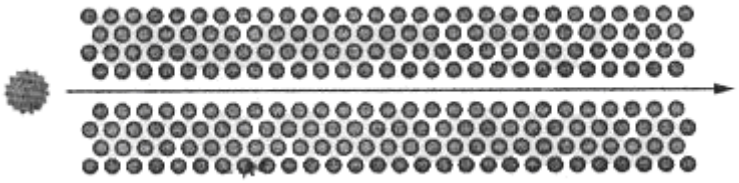


Figure I.18 : Représentation réelle d'un guide d'onde de largeur W à base d'un CP2D



(a) guide obtenu par retrait d'une rangée de motifs dans la direction ΓM .



(b) guide obtenu par retrait d'une rangée de motifs dans la direction Γk .

Figure I.19 : Exemple de guides d'ondes dans un cristal photonique hexagonal [6] .

L'enjeu principal de ces guides d'ondes concerne les pertes. Pour les guides larges (plusieurs rangées de trous omises), les pertes sont considérables

I.7.3.2. Guide d'onde courbée

Les guides courbés constituent également un domaine d'application privilégié des cristaux photoniques car ils permettent théoriquement de réaliser des virages avec des rayons de courbure de l'ordre de la longueur d'onde (figure I. 20). Dans le guide virage il y a des problèmes de réflexion et les pertes subsistent, ces virages peuvent être réalisés simplement en omettant de graver des trous dans les directions de symétrie du cristal (virages à 60 et 120°). Dans le cas des virages simples à 60°, les meilleurs résultats mesurés ont été des transmissions d'environ 80 à 90 % pour un guide étroit (W1) [6].

Le virage peut-être amélioré en ajoutant ou supprimant des trous ou encore en modifiant la topologie du coude.

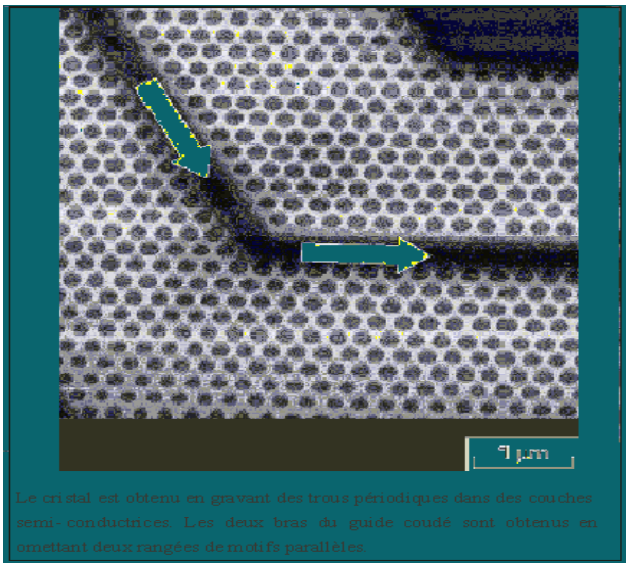


Figure I.20 : Virage réalisé dans un cristal photonique bidimensionnel [6].

I.7.4. Couplage entre guide à cristal photonique et guide à cavités couplées

L'efficacité de couplage dans les guides à cristaux photoniques linéaires a été largement étudiée au cours des dernières années. Cependant, seuls quelques travaux ont porté sur les guides à cavités couplées. Dans cette partie, nous nous intéresserons au couplage entre guide à cristal photonique et guide à cavités couplées. Nous verrons par la suite comment on peut améliorer l'efficacité de couplage entre ces deux types de guides.

I.7.4.1 Guide à cavités couplées

Dans la partie précédente, deux mécanismes de guidages pour les guides optiques ont été proposés. Le mécanisme le plus connu et le plus utilisé est celui des guides usuels basé sur la

réflexion totale interne. Le deuxième mécanisme est celui de la bande interdite photonique dans les guides à cristaux photoniques, basé sur les réflexions multiples sur les parois du cristal parfaitement réfléchissantes entourant le coeur du guide.

Dans cette partie, on propose un nouveau type de guide d'onde composé d'une chaîne de cavités (ou de défauts ponctuels) séparées les unes des autres par une ou plusieurs rangée de motifs dans un cristal photonique, c'est le guide à cavités couplées (Coupled Cavity Waveguide,CCW), appelé aussi guide de résonateurs optiques couplés (Coupled resonatoroptical waveguide, CROW). Les cavités sont conçues de telle sorte que leur fréquence de résonance se situe dans la bande interdite du cristal photonique . La direction d'alignement des cavités fixe la direction de propagation permise pour les ondes électromagnétiques. Un schéma descriptif de ce guide est illustré sur la figure 20.

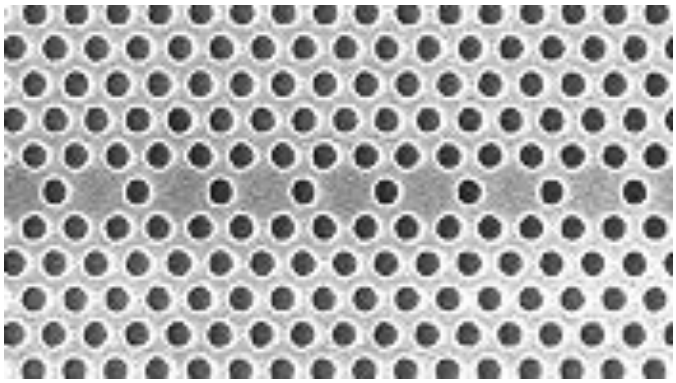


Figure I.21 : Guide à cavités couplées réalisé dans un cristal photonique bidimensionnel [6].

I.7.4.2 Principe de fonctionnement

La figure 21 illustre la base de transmission d'un guide à cavités couplées. Bien que les modes des cavités soient fortement confinés à l'intérieur des défauts, une infime partie se couple au mode de la cavité adjacente. On assiste, dans ces conditions, à un couplage des modes de résonance de cavités voisines. Un recouvrement suffisant de deux modes de cavités voisines permet le passage d'un photon d'une cavité à l'autre par saut de photon. C'est ce principe, qui est à la base du mécanisme de guidage dans les guides à cavités couplées.

Dans le cas d'un guide de longueur finie, de *N* cavités couplées, on s'attend à l'apparition d'une bande guidée présentant *N* pics de résonance. Ces pics de résonance sont dus aux réflexions en bout de structure. La fréquence centrale de la bande transmise peut être ajustée en modifiant la forme des cavités, tandis que, la largeur de la bande peut être modifiée par un

ajustement de l'espacement entre les cavités. Un plus grand espace entre les cavités conduit à une bande guidée plus étroite.

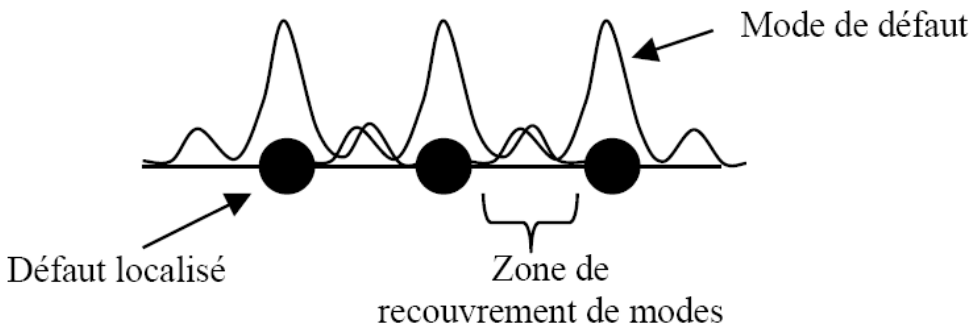


Figure I.22 : Principe de guidage dans les guides à cavités couplées [6].

En raison de leur faible vitesse de groupe des modes, les guides à cavités couplées sont d'excellent candidats quant à la mise en oeuvre de différentes fonctionnalités optiques, tels que les lignes à retard , les compensateurs de dispersion, la compression d'impulsions. On peut aussi utiliser ces guides à cavités couplées pour la fabrication de virages aigus à fort taux de transmission et sans réflexion ou comme fonction de démultiplexage.

I.7.4.3 Technique de couplage utilisée

Le guide à cavités couplées est très intéressant en raison de ses applications potentielles dans les circuits optoélectroniques intégrés. Toutefois, comme son nom l'indique, à cause de son comportement fortement résonant, le couplage de la lumière de manière efficace à l'entrée et à la sortie de ce type de guide reste un défi. Une méthode pour augmenter l'efficacité de couplage entre un guide à cavités couplées et un guide diélectrique a été démontrée par C. W. en minimisant d'abord le rayon des trous de sortie du guide à cavités couplées, ensuite, par l'insertion d'un trou de rayon plus faible dans les cavités de sortie à l'entrée et à la sortie du guide diélectrique. Une autre méthode basée sur l'ajout de quelques défauts à l'une des extrémités du guide CCW pour améliorer l'efficacité de couplage entre le guide à cavités couplées et un guide droit dans un cristal photonique unidimensionnel a été expérimentée .

Dans ce cas, une large bande en longueurs d'onde a été obtenue quant au spectre en transmission.

Dans notre étude, on s'intéresse au couplage entre un guide à cristal photonique d'une rangée de tiges manquante et un guide à cavités couplées formés dans un cristal photonique bidimensionnel. L'efficacité de couplage peut être atteinte en éliminant les pics de résonance dans le spectre de transmission et, donc, une bande de transmission plate peut être réalisée.

Pour se faire, et, comme dans le cas du couplage entre guide diélectrique et guide à cristal photonique, le couplage est assurée par un taper. Ce taper consiste à faire varier progressivement le rayon des tiges situées entre les cavités (figure I . 23) de façon à avoir un accord entre les modes du défaut linéaire et les modes de cavités. Cette technique a été démontrée expérimentalement dans en utilisant un cristal photonique bidimensionnel de trous d'air.

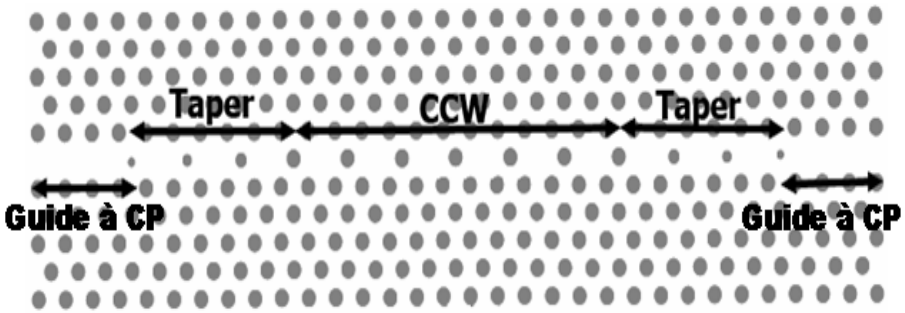


Figure I.23 *:* Couplage entre guide à cristal photonique et guide à cavités couplées via un taper formé par la variation progressive du rayon des tiges situées entre les cavités[6].

I.8.Conclusion

Les cristaux photoniques sont des matériaux dont le constant diélectrique varie de façon périodique, à l'échelle de la longueur d'onde, dans une, deux ou trois directions de l'espace. Cette périodicité est à l'origine de plusieurs propriétés intéressantes comme par exemple l'ouverture d'une bande photonique interdite interdisant la propagation de la lumière. La propagation de la lumière sur de grandes distances ne sera probablement pas réalisée avec ce genre de guides (guides à CP), mais sur de courtes distances à l'intérieur d'un circuit. Le développement d'une optique intégrée à base de CP2D passe par la conception et la réalisation de guides optiques performants. Ces derniers sont obtenus en insérant un défaut linéique dans le réseau périodique 2D.

CHAPITRE II

OUTILS DE SIMULATION

II.1.Introduction

Les matériaux à gaps photoniques semblent très prometteurs puisqu'ils permettent une amélioration des performances de nombreux systèmes existants (antennes, filtres, coupleurs), toute fois il ne faut pas oublier que les pertes dans ces structures sont non négligeables et peuvent présenter de nombreux inconvénients.

La complexité de la fabrication et de la caractérisation de structures à cristaux photoniques aux fréquences optiques rendent coûteuses en temps et argent les études expérimentales systématiques sur des dispositifs des cristaux photoniques. Le développement des méthodes de modélisation optiques précises et rapides reste donc primordial pour l'étude de ces structures.

Plusieurs méthodes ont été envisagées, comme la méthode des ondes planes « PWM», la matrice de transfert « MMT » et la méthode FDTD qui est la plus utilisée pour la modélisation des cristaux photoniques. De plus certains simulateurs ont été conçus pour faciliter cette tâche. Parmi ces simulateurs on peut citer deux moteurs de simulations le FULL WAVE et le BandSolve de Rsoft CAD.

II.2. Méthodes de modélisation

La modélisation électromagnétique des propriétés des cristaux photoniques nécessite en général un fort investissement en programmation et en analyse numérique. Parmi les modèles théoriques traitant les cristaux photoniques, on peut d'abord distinguer deux catégories: les cristaux de taille finie et les cristaux de taille infinie. On peut ensuite considérer la dimensionnalité des cristaux étudies (1D, 2D ou 3D). Les principales techniques de calcul utilisées pour les cristaux finis sont les méthodes des matrices de transfert (MMT), les théories de la diffraction par les réseaux et les différences finies dans le domaine temporel (Finite Difference Time Domain, FDTD) [9]. Le calcul de structures infinies est généralement basé sur une méthode de décomposition du champ en ondes planes (Plane Wave thode, PWM) [10].

Dans le cadre de ce mémoire, nous présenterons la méthode des ondes planes (PWM) et la méthode FDTD [3, 11, 12].

II.2.1. Méthode des ondes planes (PWM)

La technique de décomposition en ondes planes consiste à résoudre, dans l'espace fréquentiel, l'équation d'onde en développant le champ magnétique sur une base d'ondes planes. Cette méthode est très efficace pour calculer les diagrammes de bandes de cristaux infinis parfaitement périodiques. Elle permet d'obtenir les cartes de champ dans la structure, et donc la polarisation et les symétries des modes d'une structure photonique. Pour cela, plusieurs clés et

logiciels libres utilisant partiellement ou entièrement une décomposition en ondes planes ont été développés.

La méthode des ondes planes permet aussi de calculer certaines structures non périodiques comme les guides a cristaux photoniques ou les cristaux photoniques planaires via une technique de « supercellule ». Cependant, lorsque la structure ne présente aucune périodicité la méthode n'est plus valable. On peut utiliser d'autres méthodes telles que la méthode FDTD.

II.2.2. Méthode FDTD

La méthode FDTD (pour finite-difference time-domain) est une méthode générale de l'électromagnétisme utilisée pour résoudre les équations de Maxwell sur une structure de profil d'indice quelconque. Son originalité réside dans la résolution directe du système d'équation dans le domaine temporel et non dans le domaine fréquentiel, ce qui permet de visualiser la propagation d'une onde électromagnétique au sein des cristaux photoniques. Elle a été proposée initialement par Yee en 1966 [25]. Cette technique consiste a la discrétisation des équations de Maxwell dans l'espace et dans le temps avec des pas égaux Δ=Δx=Δz. L'espace temporel est aussi discrétisé avec un pas noté Δt.

Dans le cas où le matériau est isotrope, non dispersif, sans sources et transparent (constante diélectrique purement réelle), les équations de Maxwell s'écrivent comme suite dans un repère cartésien (x,y,z) [*,+]:

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

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

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = -\frac{1}{\mu}\left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial x}{\partial z}\right)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = -\frac{1}{\varepsilon}\left(\frac{\partial H_z}{\partial v} - \frac{\partial H_y}{\partial z}\right)$$

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

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

Dans le cas d'un modèle du cristal bidimensionnel dans un plan (xz) on peut distinguer deux systèmes indépendants. La première appelée TE (transverse électrique) fait intervenir les composantes (Hx, Hz, Ey) et la seconde appelée TM (pour transverse magnétique) fait intervenir les composantes (Ex, Ez, Hy).

Les équations de Maxwell temporelles deviennent des équations reliant le champ d'une cellule à celui des cellules voisines entre deux instants t et t+δt. La période de l'échantillonnage temporel δt utilisé pour résoudre le problème est très inférieure aux périodes optiques. Contrairement à la méthode des ondes planes, cette méthode ne recherche pas de solution harmonique, mais propage le champ dans un espace et une durée définis. Les équations sont résolues à partir des conditions initiales et des conditions aux limites de la grille de discrétisation. Généralement, une source de champ EM est placée dans l'espace puis éteinte, le champ évolue alors dans la structure d'après les équations de Maxwell discrétisées. Les valeurs du champ EM peuvent être enregistrées à différents temps de son évolution. Le comportement spectral d'une structure s'obtient alors par transformée de Fourier de son comportement temporel.

Cette méthode permet d'obtenir des diagrammes de bandes, mais elle est plus utilisée pour simuler la propagation de la lumière dans les structures finies a base de cristaux photoniques. Elle permet notamment d'obtenir les coefficients de réflexion et de transmission de structures a géométrie complexe, ce qui ne s'obtient pas aisément avec d'autres méthodes. Cette méthode est toutefois très coûteuse en temps de calcul et en espace de mémoire car la précision dépend directement du maillage spatio-temporel de la structure. Cette limitation nécessite souvent de simuler les structures étudiées sur des portions restreintes et des durées courtes.

Le principal inconvénient de la FDTD, qui tend cependant à s'estomper avec les évolutions des capacités informatiques, est qu'elle est très lente et demande des ressources informatiques importantes [26].

Au cours de ce mémoire, le logiciel de simulation utilisé est appelé FullWave de Rsoft CAD. Ce simulateur est basé sur la méthode FDTD.

II.3.Présentation du logiciel Rsoft CAD

II.3.1. Environnement de CAD

Le RSoft CAD est un programme de base de RSoft Photonique, il permet aux chercheurs et ingénieurs de créer des systèmes pour la conception des différents dispositifs tels que : des

guide d'ondes, des cavités résonantes, des filtres, des circuits optiques et d'autres dispositifs photoniques. Il agit en tant que programme de gestion pour les modules passifs de simulation du dispositif de RSoft : BeamPROP, FullWAVE, BandSOLVE, GratingMOD et DiffractMOD.

II.3.2. Simulateur « bandsolve»

L'objectif de bandsolve est de générer et analyser les structures à bandes interdites photoniques. La simulation est basée sur la méthode des ondes planes (PWM) pour les structures périodiques. bandsolve est idéal pour produire les structures de bandes pour les cristaux photoniques 2D et 3D.

A deux dimensions, il est nécessaire de considérer deux directions de propagation différente : TE (avec le champ E perpendiculaire à l'axe des trous) et TM (où E est parallèle à l'axe des trous). Ces deux polarisations sont découplées et donnent lieu à deux diagrammes de bandes indépendants. Il n'existe pas forcément une bande interdite dans les deux cas. En outre, il peut être appliqué à des structures comme les fibres à cristaux photoniques, qui sont complexes pour les autres techniques de simulation. BandSolve est particulièrement utile pour optimiser les propriétés des structures à cristaux photoniques, qui sont simulés par la méthode FDTD implémentée dans le logiciel FullWave, pour examiner les propriétés dépendant du temps comme les pertes, et pour calculer les distributions de champ dans des structures de dimensions finies [15].

bandsolve est destiné pour fonctionner avec les autres modules de simulation de Rsoft tels que BeamPROP et FullWAVE, il partage le même outil de CAD avec ces modules. En particulier, le bandsolve est spécialement utile pour optimiser les propriétés des cristaux photoniques.

II.3.3. Simulateur Full Wave

Le Full WAVE est un moteur de simulation complètement intégré qui calcule le champ électromagnétique en fonction du temps et l'espace dans une structure d'indice de réfraction donnée en réponse à une excitation électromagnétique donnée.

Full WAVE est conçu pour fonctionner avec les autres modules de simulation de RSoft tels que : BeamPROP, BandSOLVE, et Grating MOD puisqu'il partage le même outil de CAD avec ces modules. La simulation est basée sur la technique bien connue de différence finie dans le domaine du temps (FDTD). Cette méthode permet de calculer à chaque instant discret de l'espace, les composantes du champ électromagnétique dans chaque cellule (maille) parallélépipédique du volume tridimensionnel, à l'intérieur desquelles sont calculées les six

composantes orthogonales des champs électromagnétiques (Ex, Ey, Ez et Hx, Hy, Hz). Les équations de maxwell sont remplacées par un système d'équations qui relie le champ électromagnétique de chaque cellule aux champs des cellules voisines. En suite, ces équations sont résolues en fonction des conditions initiales et des conditions aux limites [16].

II.4. Les étapes de simulation d'un guide d'onde

La fenêtre de programme de Rsoft CAD comporte une barre de menus en haut de la fenêtre, une barre des outils qui porte plusieurs icônes et la ligne d'état (voir figure. II.1).

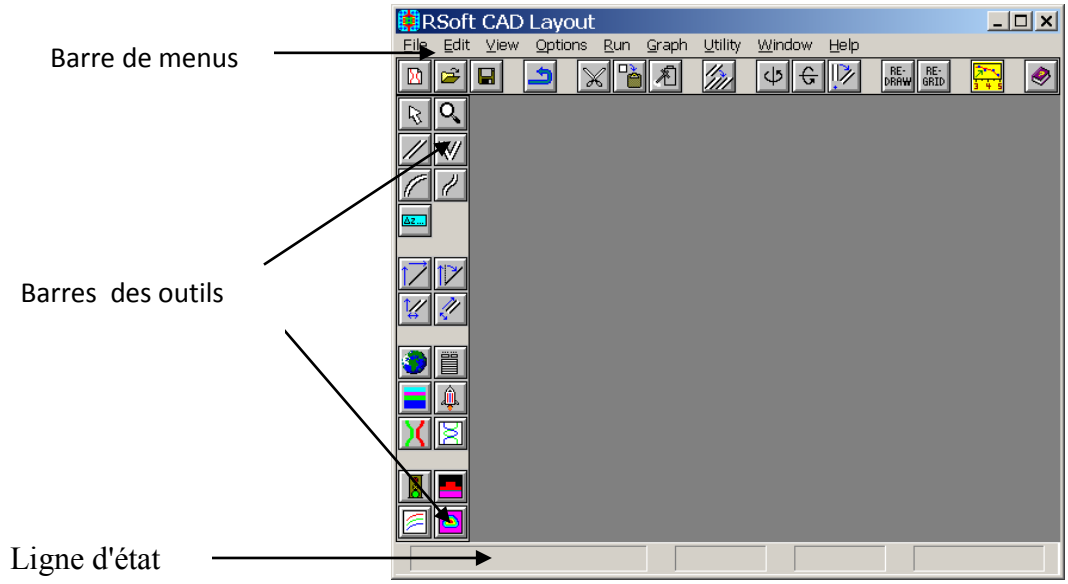


Figure II.1: Fenêtre principale du programme CAD [28]

Les menus permettent l'accès au divers dossier standard et les 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.

II.4.1. Créer un nouveau circuit

Pour créer un nouveau circuit on va cliquer sur l'icône New circuit  dans la barre d'outils supérieur. Alternativement, nous allons choisir File /New du menu. Le dialogue de démarrage de la figure II. 2 va apparaître.

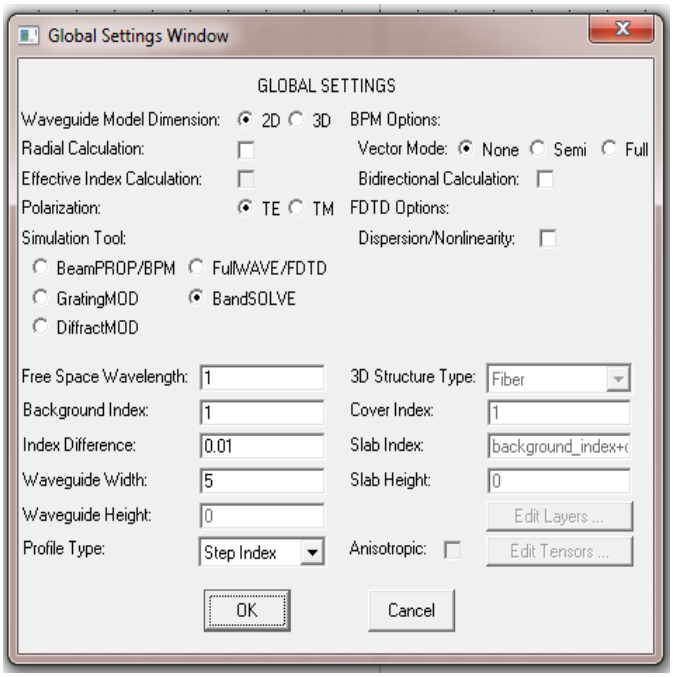


Figure II.2: La fenêtre de démarrage (startup Window) [17]

Il faut remplir la différence d'indice (Index différence), qui est la différence d'indice par défaut entre la couche guidante et l'indice de substrat (Background index), d'autre part, il faut choisir le type de la polarisation (Mode TE ou Mode TM). On peut aussi par cette option choisir le module de simulation parmi les six modules existants dans le logiciel RSoft bandSOLVE, FullWave, BeamPROP/BPM ou GratingMOD. Après l'introduction des informations dans la fenêtre de démarrage on va cliquer sur OK pour obtenir la fenêtre de la figure II.3.

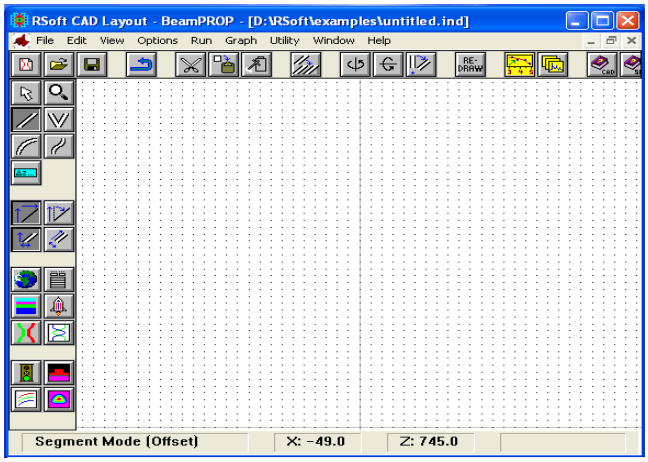


Figure II.3: Nouvelle fenêtre pour réaliser un nouveau composant ou nouveau circuit.

II.4.2. Générer la structure de réseau

Dans cette partie on va montrer comment créer un réseau en cristaux photoniques dans l'interface de CAD. Généralement, il existe plusieurs manières pour créer une structure de réseau dans l'interface de CAD. Cependant, la manière la plus facile est d'employer un des multiples utilités de disposition qui sont incluse avec Full WAVE afin d'expédier la création de ce réseau en utilisant Array Lay-out XZ (figure II.4).

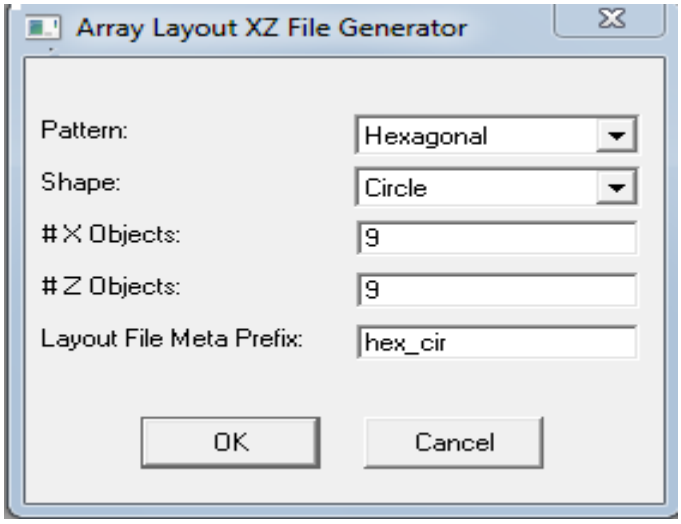


Figure II.4: Arrangements de disposition de la rangée XZ [17].

Après l'introduction des différentes données (type de réseau, forme de motif, le nombre de rangés et le nom du circuit) on clique sur le bouton **OK** pour obtenir la structure du cristal photonique qui apparaît sur la figure II.5.

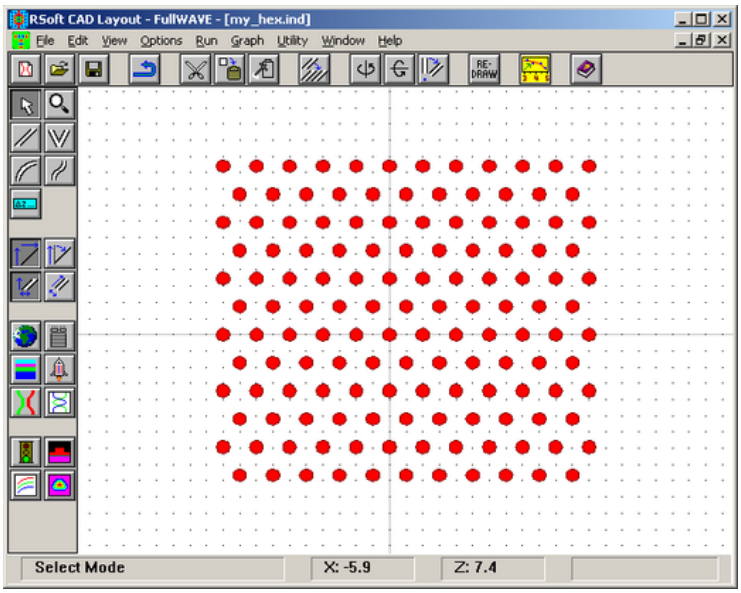


Figure II.05: Disposition de rangée dans la fenêtre de CAD.

II.4.3. Régler les paramètres globales

Pour définir les propriétés du réseau tels que l'indice de réfraction, la polarisation et pour choisir le module de simulation Full WAVE/ BandSolve parmi les autres modules existents à RSoft on clique sur l'icône  (global setting). La fenêtre de dialogue ci-dessous apparaît (Figure II. 6).

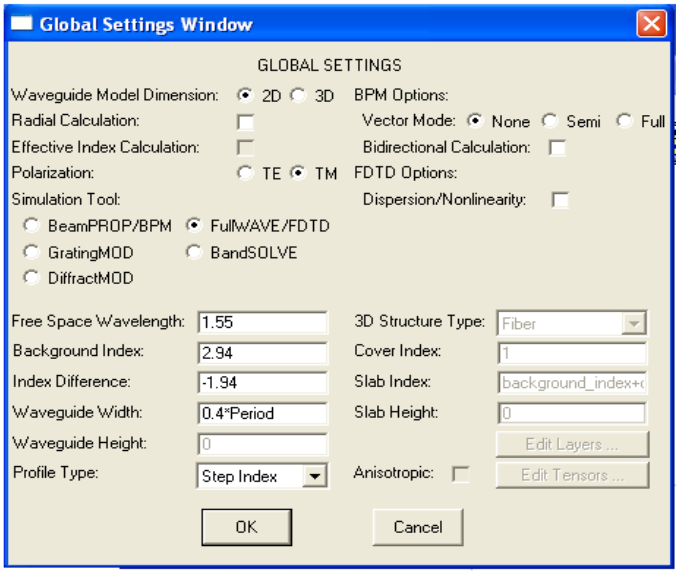


Figure II.6: Fenêtre des paramètres globales du circuit [17]

II.4.4. Définition des variables

Cliquer sur l'icône  (Edit symboles) dans la fenêtre de CAD, le tableau de symbole (Table editor) s'ouvre (Figure II.7). Ce tableau de symboles permet à l'utilisateur de créer ou modifier à la fois et intégrer les variables définies par l'utilisateur, ces variables peuvent être utilisées pour définir pratiquement n'importe quel paramètre de la structure (le rayon, la période, l'indice de réfraction, nombre de rangés).

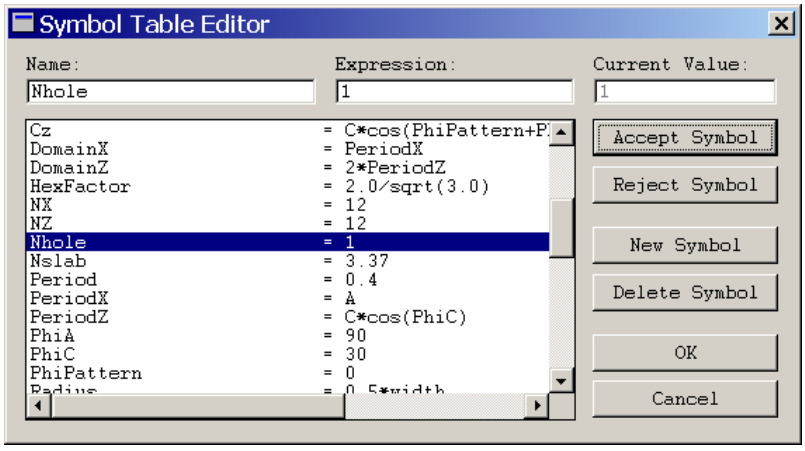


Figure II.7: L'éditeur du Tableau de symboles [17]

Ces symboles correspondent aux arrangements faits dans le nouveau circuit (New Circuit) de la boite de dialogue ci-dessus. Pour définir un nouveau symbole (par exemple Nhole=1), on clique sur new symbole puis en va entrer le nom et la valeur du symbole.

II.4.5. Vérifier la structure

Pour vérifier notre structure, nous avons simulé le profile de l'indice de réfraction dans le plan XZ .

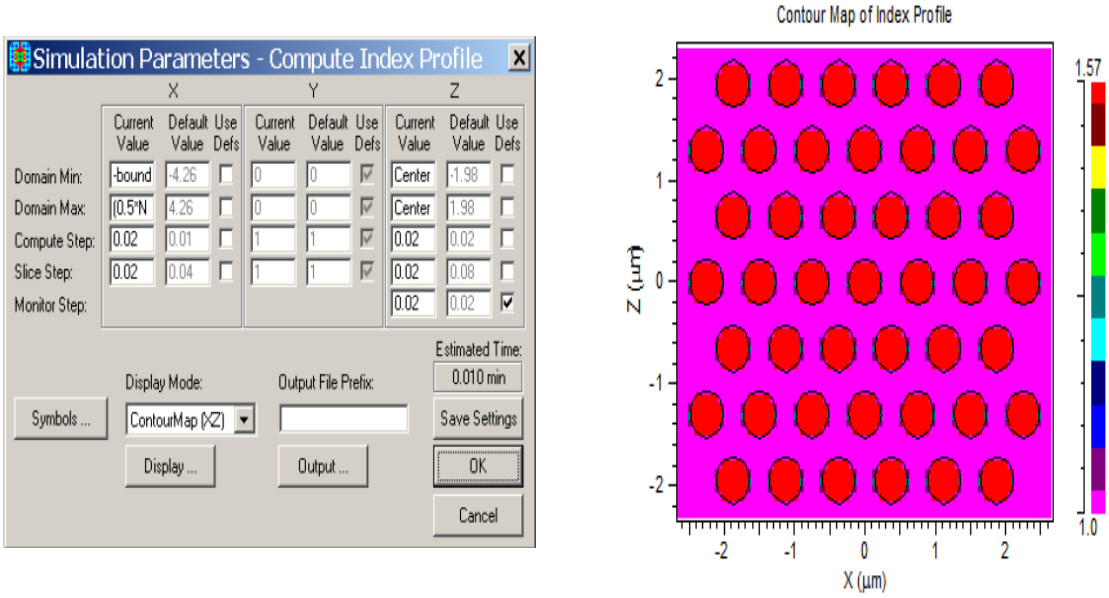


Figure II.8: Profil d'indice de la structure à cristaux photoniques 2D

II.4.6. 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 utilisé (BandSolve/FullWave) comme il est représenté sur la figure II.9 ou sur la figure II.10 respectivement. Une fois que les paramètres numériques et d'autres options sont acceptables, on clique sur **OK** pour commencer la simulation.

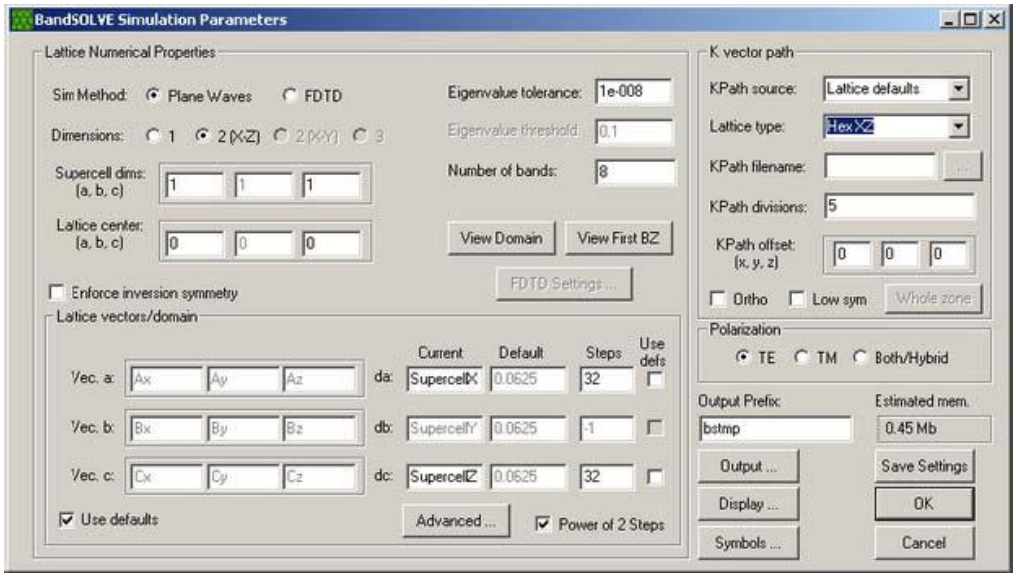


Figure II.9: La fenêtre de paramètres de simulation de BandSolve où des paramètres numériques de base de simulation sont entrés [17].

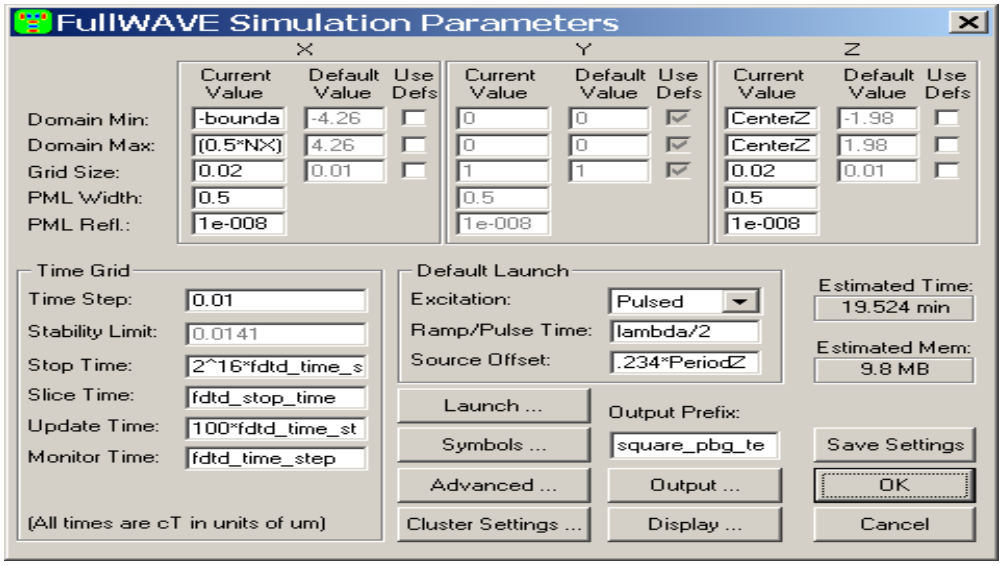


Figure.II.10: La fenêtre de paramètres de simulation de Full WAVE où des paramètres numériques de base de simulation sont entrés [17].

II.4.7. Lecture des résultats

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

II.5. Diagramme des bandes

Comme indiqué dans le premier chapitre, les zones de Brillouin aide 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 II.11 montre le diagramme des bandes correspondant à la structure de la fibre en cristaux photoniques (FCP) pour les modes TE/TM.

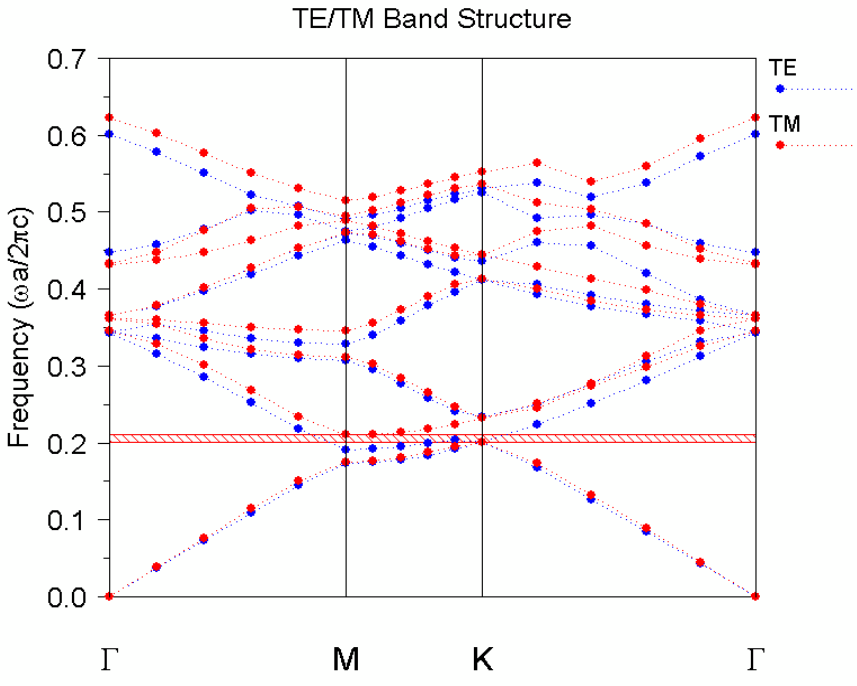


Figure II.11: Diagramme des bandes pour les modes TE et TM dans la structure FCP

On constate que les bandes des modes TE et TM dans le diagramme sont toutes reliés, cela signifie qu'il n'y a aucune bande interdite photoniques qui empêche la propagation des ondes. Cette propriété est due à la faible valeur de l'indice des trous par apport à l'indice de la couche guidante, donc l'onde se propage dans la zone d'indice le plus élevé de la bande interdite [18].

II.6. Calcul des modes de cavité

FullWave dispose de plusieurs options qui permettent le calcul des modes de cavité pour certains types de structures.

Il y a deux façons de calculer un mode de cavité en double alternance: via un processus semi-automatique ou manuellement grâce à l'utilisation de la sortie spatiale d'un moniteur de temps. Ces deux méthodes sont tout aussi puissantes, mais ils ont des forces différentes. La première méthode donnera des résultats plus rapides, mais il est un peu limité dans le type de sortie possible. La seconde méthode n'a aucune limitation sur le type de sortie, mais oblige l'utilisateur à configurer manuellement le calcul.

II.6.1. Procédure de calcul des résonances de la cavité

Le processus de calcul des longueurs d'onde de résonances de la cavité est un processus simple, et peut être décrit avec les étapes suivantes:

• Dessinez la structure souhaitée dans le CAD.

• Réglez l'excitation à Impulse.

• Lancer une forme appropriée dans le centre de la cavité.

• Utilisez un moniteur de temps pour mesurer le champ à l'intérieur de la structure de la cavité. Créer un moniteur de temps et de régler l'heure Type de moniteur à défaut Field. Essayez d'éviter les points de symétrie et / ou de noeuds pour assurer un bon comportement dans le temps.

• Réglez l'option de sortie du moniteur sur longueur d'onde moniteur dans la boîte de dialogue Options de sortie FDTD. Cette option est activée par défaut lors de l'utilisation d'une excitation d'impulsion.

• Définir une sortie préfixe du fichier et lancer la simulation FDTD.

• Déterminer les fréquences de résonance du spectre de longueurs d'onde contenues dans le fichier <prefix>.Pwn. Les données spectrales brutes sont contenues dans le fichier <préfixe>. Wmn.

Notez que si la résolution spectrale des résultats ne sont pas suffisants, la simulation doit être relancez avec un temps plus long arrêt.

II.6.2. Calcul du mode de Profile

Une fois que les résonances de la cavité ont été trouvées, les profils de modes peuvent alors être trouvé. Comme indiqué plus haut, il existe deux façons d'effectuer ce calcul. La méthode que vous choisissez dépend des résultats souhaités:

1. La première méthode consiste à calculer le mode de la cavité de la composante principale du champ sur l'ensemble du domaine de simulation à la longueur d'onde d'entraînement.

2. La deuxième méthode permet de mesurer le mode de la cavité d'un composant de champ arbitraire sur un domaine arbitraire à une ou plusieurs longueurs d'onde arbitraires.

Méthode 1: semi-automatique de calcul de la mode

Ce type de calcul de mode de la cavité est activé en définissant la FDTD_compute_mode variable à 1, avec la mise de plusieurs autres options de manière appropriée. Cette procédure se traduira par le calcul de la composante de champ principal d'un mode de la cavité du domaine de la simulation de l'ensemble.

• Assurez-vous que l'excitation est réglé sur Impulse.

• Réglez le fdtd_compute_mode variable à 1.

• Réglez la longueur d'onde de l'espace libre à celle de la longueur d'onde de résonance souhaitée.

• Relancez la simulation FDTD.

Le mode sera sauvegardé dans le fichier <préfixe>. m00, avec accompagnement fichier <prefix> . P00.

Méthode 2: Utilisation de la sortie du territoire d'un moniteur de temps

Version 2.0f de FullWave introduit une fonctionnalité de surveillance des temps étendue. Une telle possibilité est d'effectuer une DFT du champ se propageant sur un domaine à des valeurs de fréquence spécifiée. Comme nous le verrons, cela peut être utilisé pour calculer un mode de cavité.

• Assurez-vous que l'excitation est réglé sur Impulse.

• Créer un moniteur de temps dont le domaine définit la région désirée pour le calcul de mode.

• Définissez le type de sortie du territoire du moniteur de temps pour les composantes du champ souhaités.

• Réglez la longueur d'onde de l'espace libre dans la boîte de dialogue Paramètres globaux à celle de la longueur d'onde de résonance souhaitée.

• permettre une analyse de fréquence DFT pour le moniteur de temps afin de permettre l'analyse de fréquence spatiale du signal de sortie sélectionné. Les fréquences souhaitées peuvent être réglés. La gamme de fréquence par défaut correspond à la longueur d'onde de l'espace libre situé au-dessus.

• Si vous le souhaitez, définissez les paramètres de la grille de stockage et / ou la définition spatiale des données de mode.

• Exécutez la simulation FDTD.

Au cours de ce travail, on a utilisé la méthode semi-automatique pour le calcul du profile de mode.

II.7. Exemple de calcul de mode pour la cavité hexagonale

Au cours de cet exemple, on va présenter les étapes à suivre pour le calcul des modes liés aux défauts introduits à la structure étudiée ou les modes de résonances pour une cavité hexagonale.

a- Création de la cavité hexagonale

Pour réaliser des cavités hexagonales appelées «cavité H_X» en va enlever une ou plusieurs tiges du cristal photonique 2D dans un réseau triangulaire. Avec x est le nombre de tiges enlevé par côté de l'hexagone voir la figure II.12.

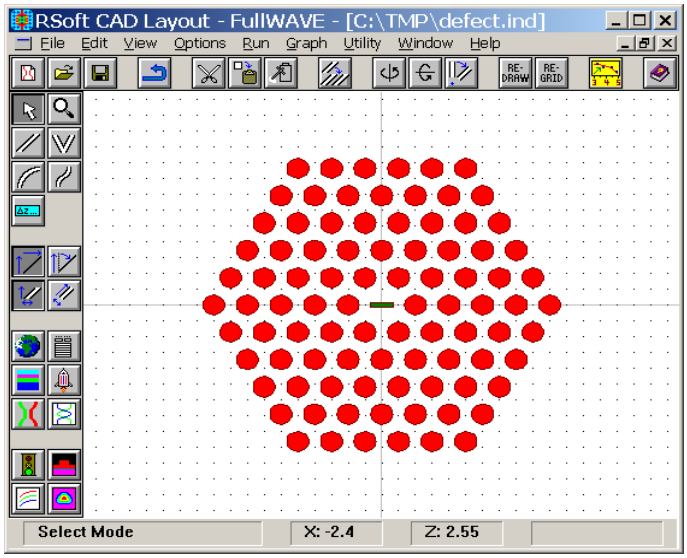


Figure II.12: Création de la cavité H1 avec le moniteur de temps placé au centre (à la place de la tige enlevée).

Ensuite, on insert le moniteur du temps au centre de la cavité pour enregistrer le l'intensité du champ calculé. Dans la barre du menu Sélectionner (options /insert/time monitor), appuyer sur ok et on garde les paramètres par défaut pour le moniteur du temps.

b- Vérification de la structure

La vérifier de la structure est faite à travers la distribution de l'indice de réfraction comme il est représenté sur la figure II.13.

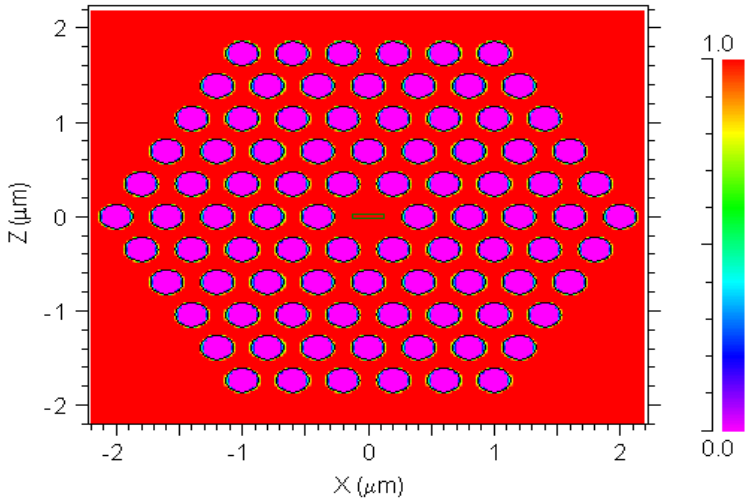


Figure II.13: Le profil d'indice calculée de la structure de défauts.

c- calcul des résonances

Pour déterminer les longueurs d'ondes de la résonances des modes de défauts, on va calculer le spectre de transmission obtenu en injectant une onde impulsion de type gaussienne. Puis on va appuyer sur OK pour lancer la simulation (voir la figure II.14)

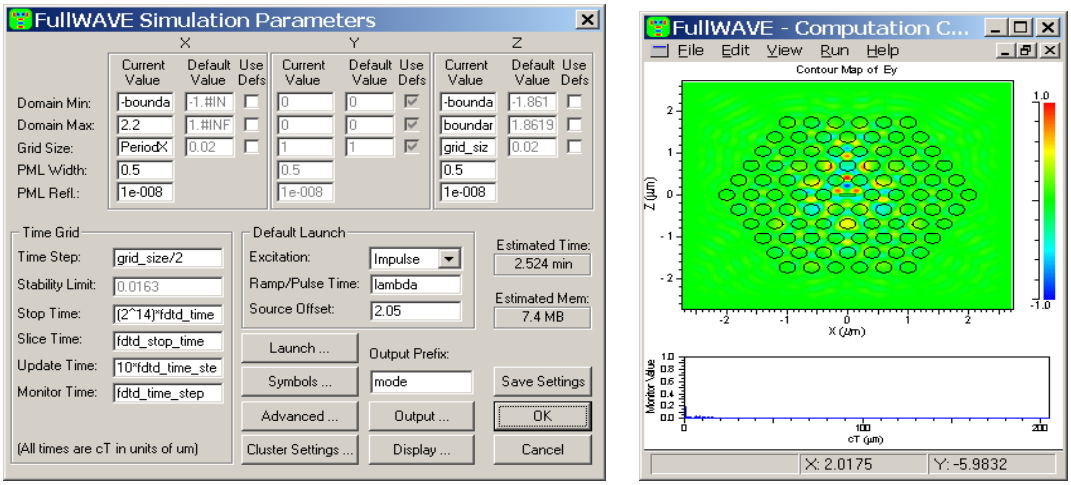
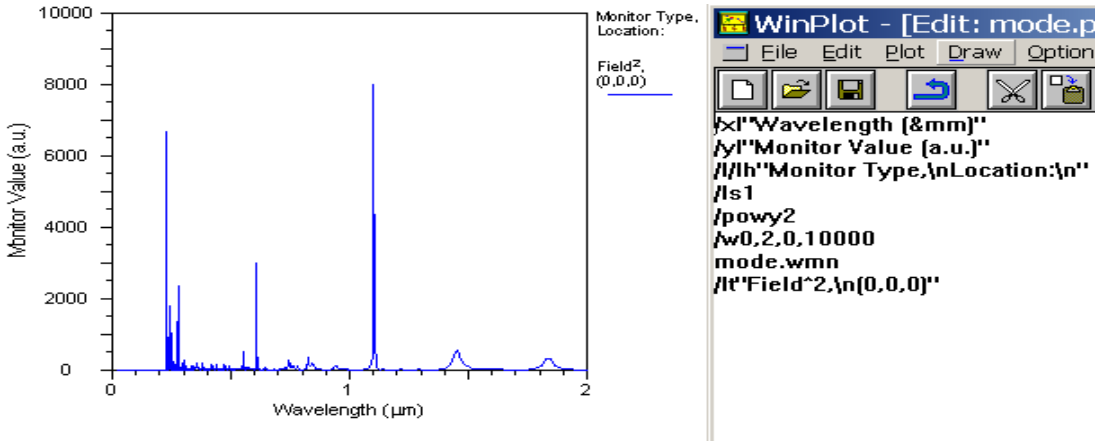


Figure II.14: La boîte de dialogue des paramètres de simulation (FullWave) .

d- affichage du spectre

pour l'affichage et le traitement des graphes, on va cliquer sur icône d'affichage des graphiques et on sélectionne le fichier dont l'extension est « prefixe.pwm ». Chacun des pics de ce graphe représente une longueur de résonnance de la structure. Pour redimensionner le domaine de sorte que l'ensemble graphique est visible, il faut aller à Edition (afficher pour accéder au "Edit") où des commandes d' intrigue pour ce fichier comme indiqué ci-dessous pour la figure II.15 (b).



(a) **(b)**

Figure II.15: a) Le spectre de longueurs d'onde trouvée à partir de la simulation de l'impulsion de la structure de défauts b) les commandes utilisées pour afficher (WinPlot).

e. Mode de calcul

Pour représenter le mode du profile associé à la longueur d'onde de résonance 1.1011µm. on va relancer la simulation en changant la longueur d'onde de l'espace libre λ=1.55 µm par λ= 1.1011µm dans la fenêtre des symboles globales. L'intrigue du mode est enregistré dans le fichier mode.p00, et les données brutes contenues dans le fichier mode.m00.

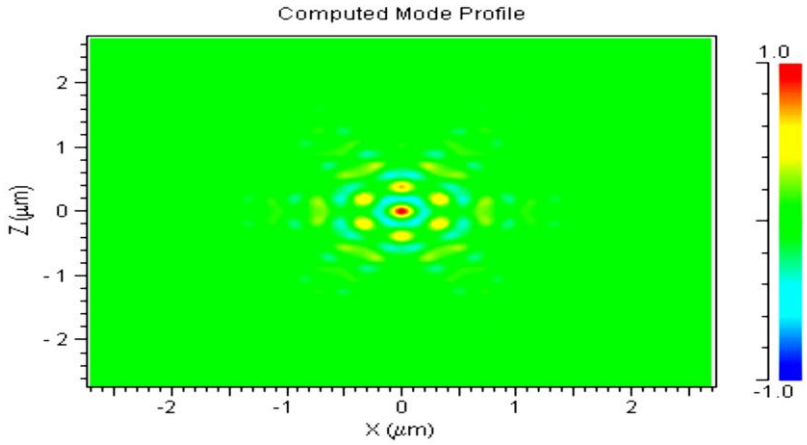


Figure II.16: Le mode de cavité calculée pour la longueur d'onde de résonance λ0= 1.1011µm de cette structure.

II.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les deux méthode de simulation (PWM et FDTD). Ensuite, nous avons décrit les deux modules de simulation le Bandsolve et le Fullwave de Rsoft CAD que nous avons utilisé dans le troisième chapitre. Tout d'abord, nous avons décrit les étapes de simulation pour l'étude et la modélisation de bande interdite photonique des cristaux photoniques bidimensionnels d'une structure non connectée. Nous avons étudié les résultats obtenus à l'aide de notre simulateurs en faisant varier les paramètres physiques et les paramètres géométriques et en étudiant leurs effets sur la bande interdite photonique de cristaux photoniques bidimensionnels à réseau triangulaire pour améliorer les effets sur la bande interdite photonique.

CHAPITRE III

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

III.1. Introduction

L'étude des matériaux et dispositifs à bandes interdites photoniques a débuté en laboratoire en 1997[1], avec l'objectif de modéliser et caractériser les propriétés optiques de ces structures. Ces matériaux à gaps photoniques semblent très intéressants puisqu'ils permettent une amélioration des performances de nombreux systèmes existants (guides, cavités, capteurs…). En ce qui concerne l'étude de telles structures, elle reste toujours très expérimentale, même si quelques équipes de recherche se lancent dans des études analytiques.

Le développement d'une optique intégrée à base de cristaux photoniques 2D passe par la conception et la réalisation de guides d'ondes optiques performants. Ces derniers sont obtenus en insérant un défaut linéique dans le réseau périodique triangulaire 2D. Dans ce travail, notre intérêt est porté sur les cristaux photoniques membranaires utilisant un réseau triangulaire de trous d'air percés dans une membrane diélectrique de Phosphure d'indium (n=3.42). Ce type de dispositif a été largement considéré, car il présente un fort confinement vertical. Ce dernier résulte du fort contraste d'indice entre le Phosphure d'indium(InP)et l'air.

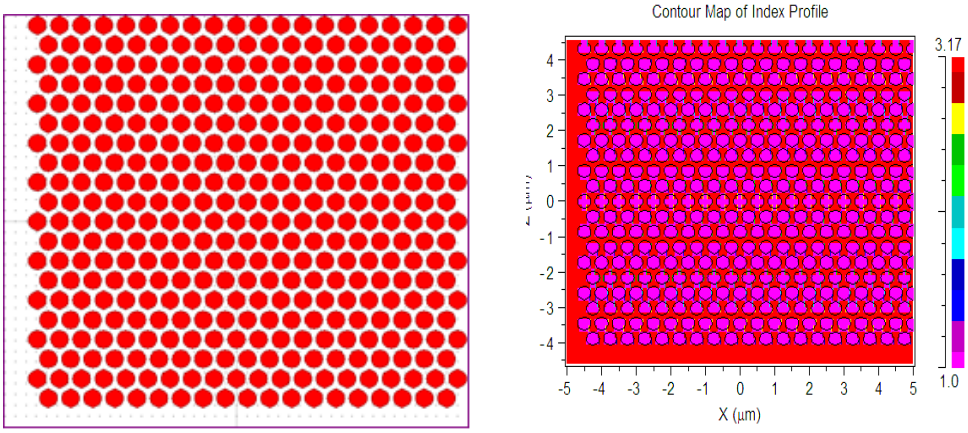
Avant d'aborder les structures avec défauts, nous entamons en premier lieu l'étude des structures bidimensionnelles sans défauts. Ensuite, nous étudierons la propagation de la lumière dans les guides d'ondes à cristaux photoniques fabriqués par ces mêmes structures après création d'un défaut linéique. Nous commençons notre étude par les structures les plus simples: un guide linéique constitué d'un rangé de trous manquant (appelé guide W1). La connaissance approfondie dans ce type de guide est essentielle car le guide W1 est l'élément de base nécessaire à la réalisation de structures plus complexes.

III. 2. Définition de la structure d'étude

Considérons un cristal photonique 2D à réseau triangulaire de trous d'air plongés dans une matrice de L'indium de phosphore (Inp). Le paramètre de maille et le rayon des trous sont respectivement a = 0.5µm et r =0.38a. L'indice de réfraction de la matrice est n=3.17.

La transmission en polarisation TM dans ce réseau sans défauts est calculée en injectant une onde lumineuse de longueur d'onde λ=1.55µm, la longueur d'onde de télécommunications. La structure fait 20 rangées de longueur et 20 rangées de largeur comme il est schématisé sur la figure III.1(a).

Pour vérifier notre structure, nous avons tracé sur la figure III.1(b) la distribution de l'indice de réfraction.



(a) (b)

Figure III.1: (a) Schéma d'un cristal photonique bidimensionnel formé par un réseau triangulaire de trous d'air percés dans le Inp, (b) la distribution de l'indice de réfraction.

III.3. La bande interdite photonique

Les cristaux photoniques bidimensionnels CP2D peuvent être définis comme un arrangement périodique dans le plan d'un motif élémentaire (trous d'air ou tiges de matériau) de taille submicronique. Par un choix convenable du rayon, de la période et de la forme du motif, il est possible de faire apparaître une bande interdite photonique (BIP) dans le spectre de transmission à travers la structure. Les structures à gap photonique (BIP) sont des structures périodiques dans lesquelles la propagation des ondes pour certaines bandes de fréquences est interdite.

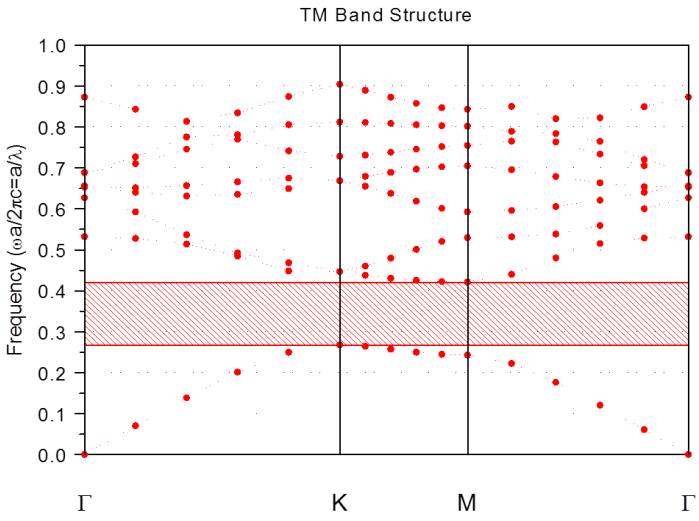


Figure III.2 : Diagramme de bande d'un cristal photonique 2D en polarisation TM pour n=1.55, r=0.19µm et a=0.5µm

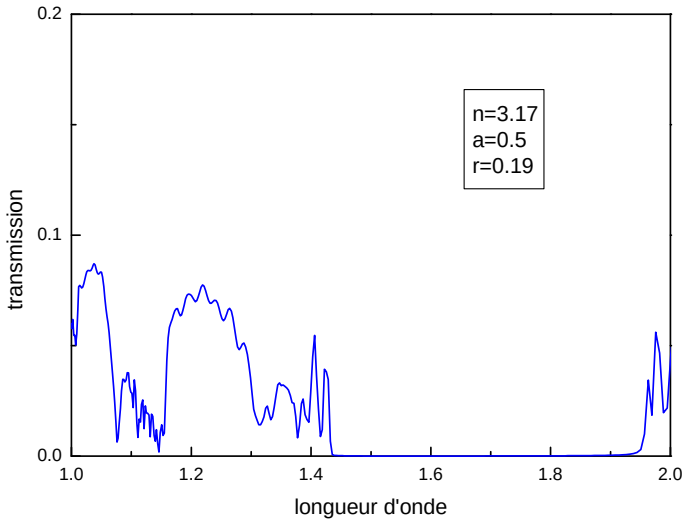


Figure III.3: Transmittance en fonction de la longueur d'onde normalisée pour n=3.17, r=0.19 et a=0.5µm

La figure III.2 montre le diagramme de dispersion obtenu en utilisant le logiciel Bandsolve d'un cristal photonique 2D triangulaire en fonction du vecteur d'onde k variant le long des directions de hautes symétries Γ , K, M et Γ (Première zone de brouillon). Alors que, la figure III.3 représente le spectre de transmission lorsqu'on injecte une onde lumineuse polarisée TM (transverse magnétique), il est obtenu en utilisant le simulateur Fullwave basé sur la méthode FDTD de Rsoft CAD à travers un réseau triangulaire de trous d'air percés dans une matrice de l'indium de phosphore (InP, n=3.17).

III.4. La Carte des bandes interdites

Le calcul de diagramme de bandes étudié précédemment nous renseigne entre autres, sur les propriétés (la position et la largeur) de bandes interdites photoniques pour chaque polarisation. Cependant, deux paramètres peuvent être encore ajustés afin de jouer sur celles-ci: l'indice de réfraction et le facteur de remplissage ou le rapport « r/a ». Donc pour un matériau donné (c.à.d pour un indice de réfraction donné), il est intéressant de connaître l'influence de la période ou le rayon sur la position et la largeur normalisée « $\Delta(a/\lambda)$ » des bandes interdites photoniques. Le calcul du diagramme de bande vu précédemment nous renseigne sur les propriétés (la position et la largeur) des bandes interdites pour chaque polarisation :

La figure III.4, représente un exemple sur la carte des bandes pour d'un matériau d'indice donné (n=3.17) On voit bien que pour les valeurs de r inférieurs à 0.1 ou supérieur à 0.25 il n'y a pas de bandes mais, il faut que r est compris entre 0.1 et 0.25 pour apparaître une bande interdite photonique de type TM.

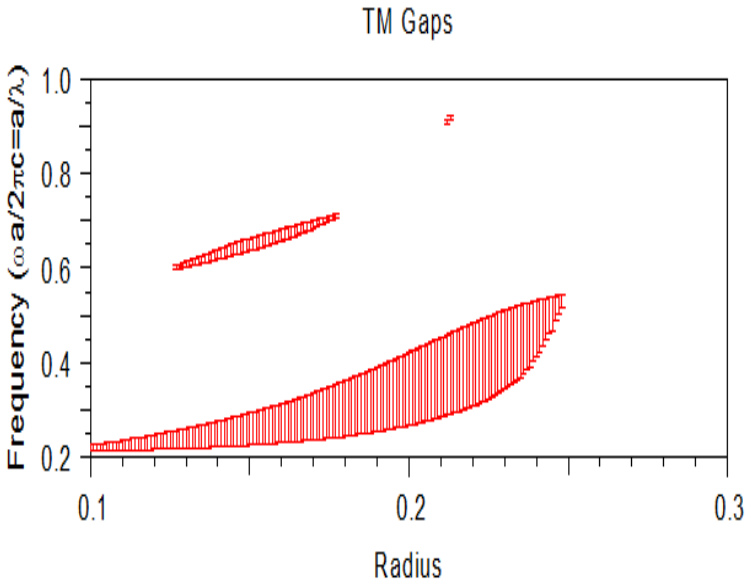


Figure III.4 : Carte des bandes interdites en fonction de rayon des trous d'air.

La figure III.5 représente la carte des bandes en fonction de la période lorsqu'on fait varier la période du réseau entre a=0.4µm et a=1µm, et en fixant le rayon des trous d'air à r=0.18µm. On constate l'apparition d'une bande interdite photonique maximale autour de 1.55µm pour une période a=0.5µm.

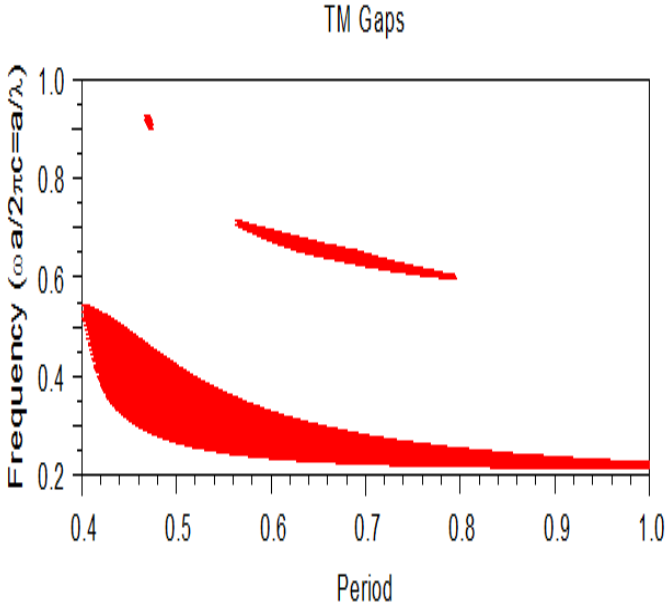


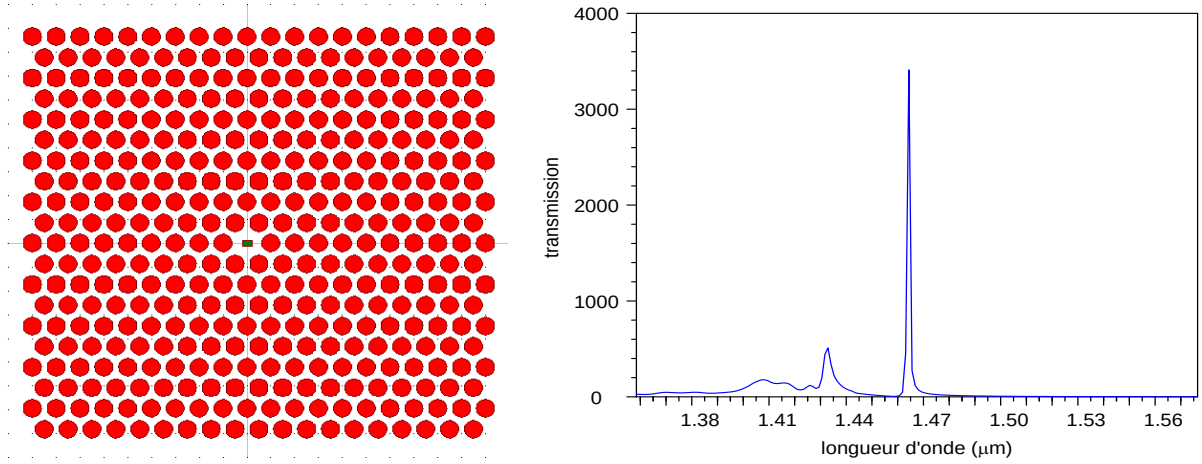
Figure III.5 : Carte des bandes interdites en fonction de la période du réseau

III.5. Etude de la cavité hexagonale H1

III.5.1. La structure étudiée

Considérons un cristal photonique à réseau triangulaire de 20X20 rangés formé par des cylindres diélectriques plongés dans l'air. Le paramètre de maille et le rayon des cylindres sont respectivement a=0.5µm et r=0.19. L'indice de réfraction des cylindres, supposé indépendant de la fréquence, est n =1.0.

La structure étudiée est une cavité hexagonale H1 obtenue par l'omission d'un trou d'air central du réseau 20X20 comme il est montré sur figure III.6(a). La figure III.6(b) représente le spectre de transmission en fonction de la longueur d'onde.



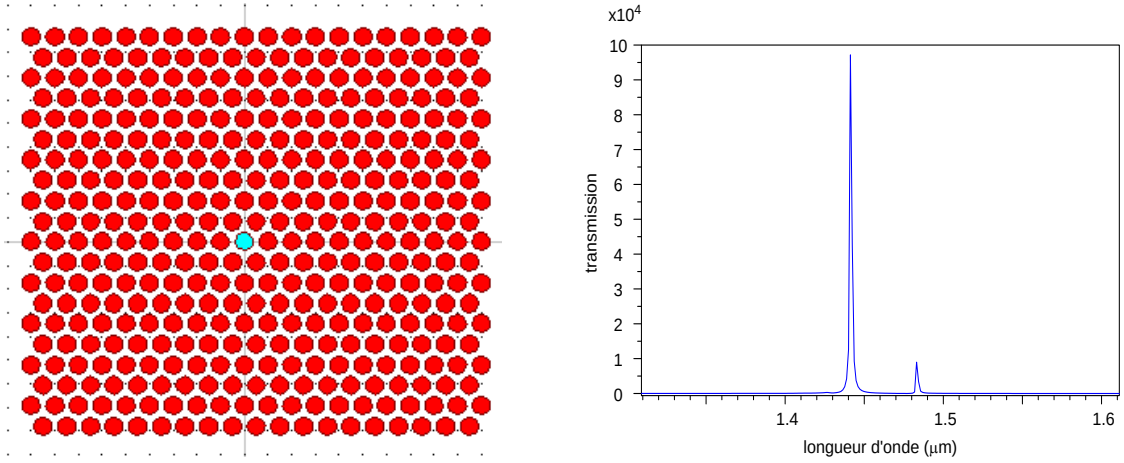
(a) (b)

Figure III.6: Vue de dessus de la cavité H1 formé par l'omission d'un trou d'air. Le paramètre maille et le rayon des trous sont respectivement a = 0.5µm et r =0.19µm

Pour une longueur d'onde de résonnance λ=1.4658, Le facteur de qualité calculé est de l'ordre de Q=977.02.

III.5.2. Cavité H1 par Substitution

La structure étudiée est une cavité hexagonale H1 obtenue par substitution d'un cylindre d'air situé au centre du réseau par une tige de silicium dont l'indice de réfraction est n=3.4, comme il est montré sur figure III.7(a). Sur la figure III.7(b), nous avons reporté le spectre de transmission obtenu par le simulateur FullWave.

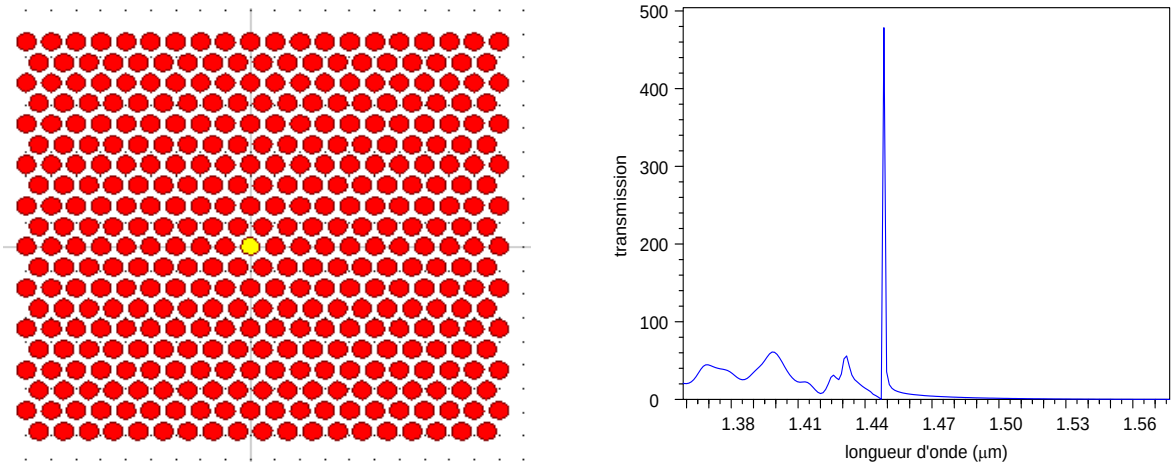


(a) (b)

Figure II.7: (a) Vue de dessus de la cavité H1 (silicium) formé par substitution, (b) Le spectre de transmission pour a = 0.5µm et r =0.19µm.

Pour une longueur d'onde de résonnance λ=1.4566, Le facteur de qualité calculé est de l'ordre de Q=662.

Sur la figure III.8(a), nous avons représenté une deuxième structure d'une cavité hexagonale H1obtenue en substituant le silicium par tige de GaAs (n=2.94). Alors que sur la figure III.8(b), nous avons reporté le spectre de transmission en fonction de la longueur d'onde.



(a) (b)

Fgure II.8: Vue de dessus de la cavité H1formé par la substitution d'un cylindre d'air par une tige de Gallium. Le paramètre maille et le rayon des trous sont a = 0.5µm et r =0.19µm.

La figure III.9, représente le spectre de transmission pour trois indices de réfraction. Il est clair que plus l'indice augmente, le coefficient de transmission augmente.

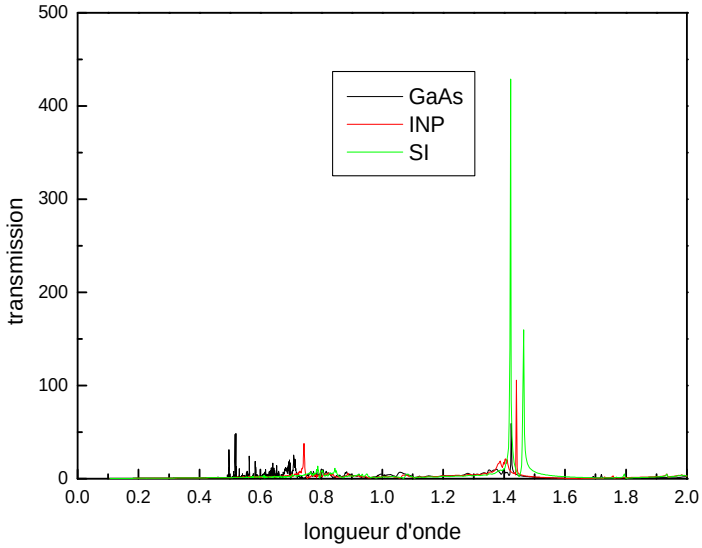
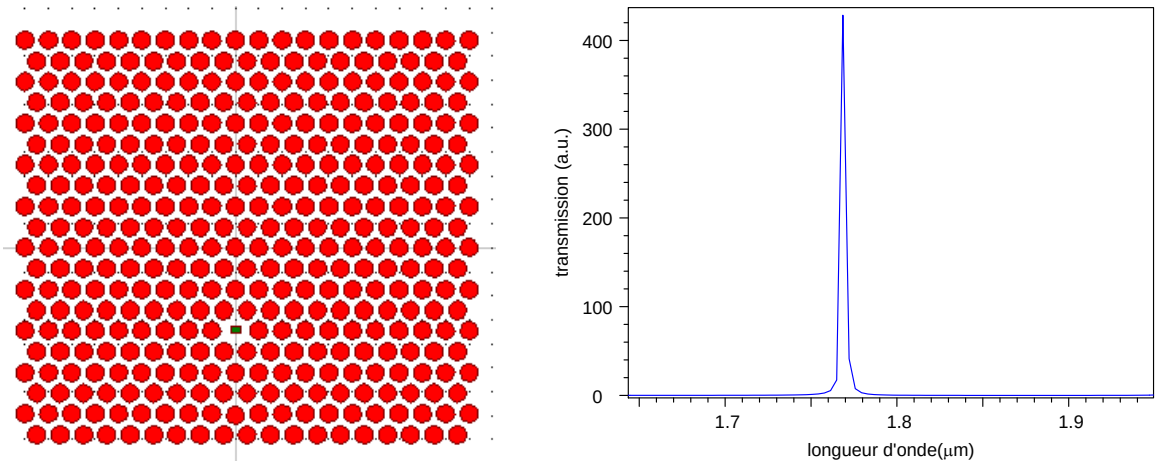


Figure III.9 : Spectre de transmission d'une cavité H1 pour trois marteaux, de paramètre de maille a=0.5µm constitué de tiges diélectrique de rayon r = 0.19µm.

III.5.3. Influence de la position de la cavité

Dans ce cas, l'injection de la lumière est effectuée suivant la direction ΓM. La structure étudiée est une cavité hexagonale H1 obtenue par l'omission d'un seule cylindre d'air suivant la direction de propagation, le réseau toujours est le même ; un réseau triangulaire de 20X20 rangées comme il est montré sur figure III.10(a). La figure III.10(b) représente le spectre de transmission en fonction de la longueur d'onde.

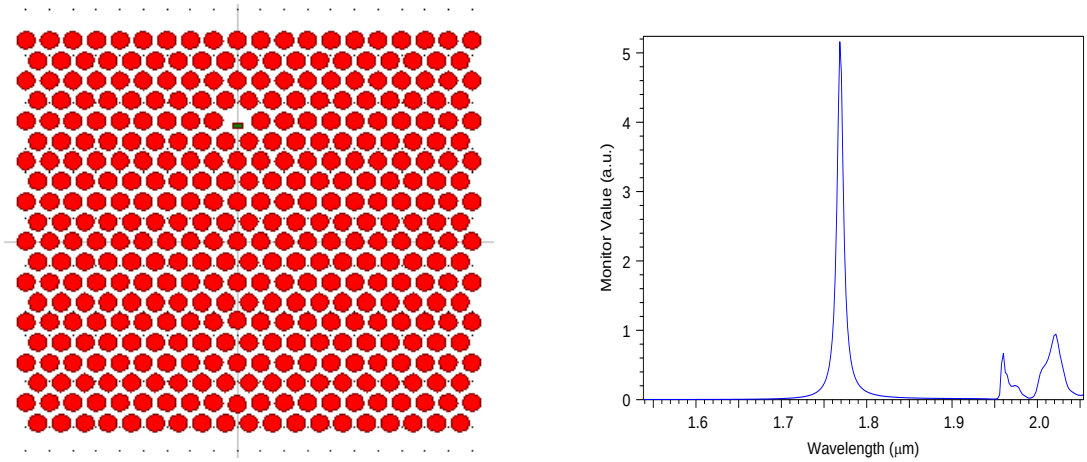


(a) (b)

Figure III.10: (a) Exemple de Cavité H1dans un réseau triangulaire de période 0.5µm et le rayon des trous d'air r=0.19µm, (b) le spectre de transmission.

Dans ce cas, Le facteur de qualité calculé est de l'ordre de Q=177.04 pour une longueur d'onde de résonnance λ=1.7704.

La troisième structure étudiée est une cavité hexagonale H1très éloignée de la source lumineuse suivant la direction ΓM. Elle est obtenue par l'omission d'un cylindre d'air du réseau 20X20 comme il est montré sur figure III.11(a). La figure III.11(b) représente le spectre de transmission.



(a) (b)

Figure III.11 : (a) Exemple d'une Cavité hexagonale H1 , (b) le spectre de transmission en fonction de la longueur d'onde

Dans ce cas, Le facteur de qualité calculé est de l'ordre de Q=213.25 pour une longueur d'onde de résonnance λ=1.77.

III.6. Les guides d'ondes

Les cristaux photoniques à bande interdite photonique ont connu un grand intérêt au cours de ces dernières années. En effet, de nombreux travaux de recherches ont été effectués par plusieurs groupes de recherche pour examiner la transmission, la localisation et le guidage de la lumière dans ces structures. Parmi les applications importantes, on trouve le guidage.

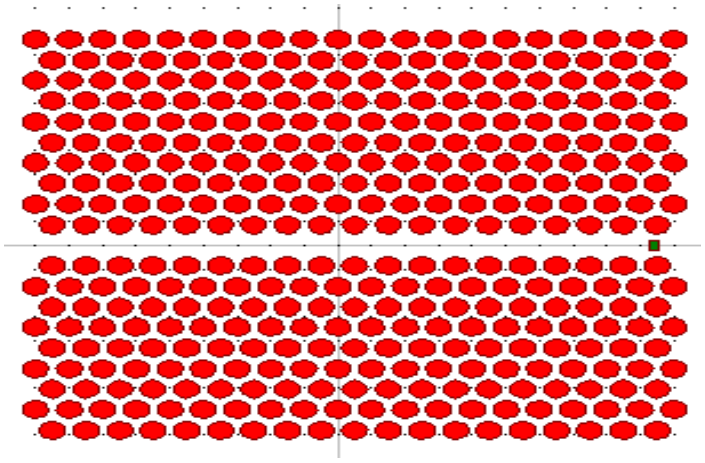
Le guide d'onde W1 obtenu en omettant un seul rangé de trous ou de tiges est l'un des structures qui a été largement explorée, la plupart des guides à cristaux photoniques sont conçus dans des réseaux triangulaires à trous d'air circulaires.

La fonction de guidage repose naturellement sur l'idée de bande interdite, pour laquelle la lumière est réfléchie, et de bande permise pour laquelle la lumière est transmise.

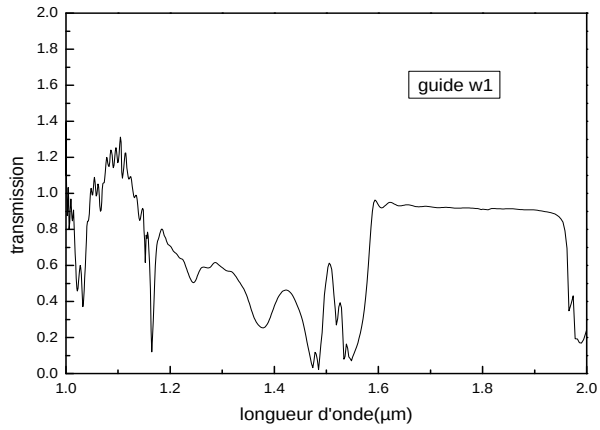
III.6.1 La transmission suivant la direction ΓK

La fonction de guidage repose naturellement sur l'idée de bande interdite, pour laquelle la lumière est réfléchie, et de bande permise pour laquelle elle est transmise. Le cristal photonique 2D du guide d'onde W1 simulé est obtenu en introduisant un défaut linéique dans le réseau, est

composé de 20 rangées de trous suivant l'axe perpendiculaire au guide (Z) et 20 rangées de trous suivant l'axe de propagation (X). La figure III.12(a) représente le guide d'onde simulé W1 obtenu par l'omission d'une rangée de trous suivant la direction des premiers voisins ΓK. La transmission en fonction de la longueur d'onde est mesurée en utilisant la méthode FDTD à travers le logiciel Fullwave de Rsoft.



(a)



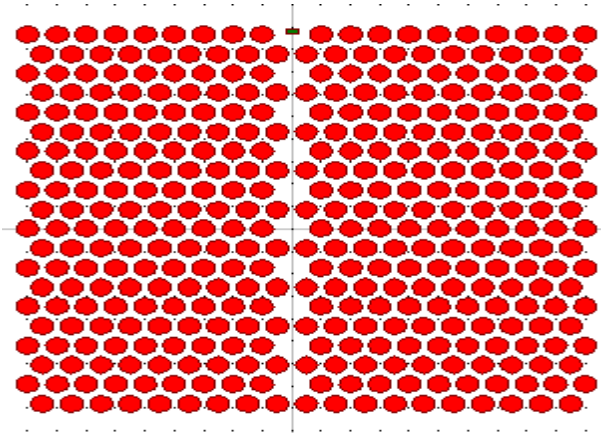
(b)

Figure III.12 : (a) vue de dessus d'un guide d'onde droit W1, (b) Le spectre de transmission du guide d'onde de référence W1 en fonction de la longueur d'onde.

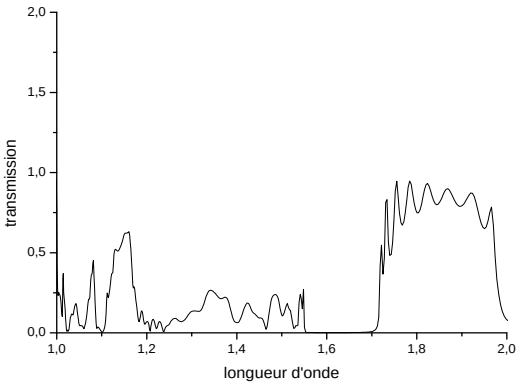
III.6.2 La transmission suivant la direction ΓM

La fonction de guidage repose naturellement sur l'idée de bande interdite, pour laquelle la lumière est réfléchie, et de bande permise pour laquelle elle est transmise. Le cristal photonique 2D du guide d'onde W1 simulé est obtenu en introduisant un défaut linéique dans le réseau, est composé de 20 rangées de trous suivant l'axe perpendiculaire au guide (Z) et 20 rangées de trous suivant l'axe de propagation (X). La figure III.13(a) représente le guide d'onde simulé W1 obtenu par l'omission d'une rangée de trous suivant la direction des premiers voisins ΓM.

La transmission en fonction de la longueur d'onde est mesurée en utilisant la méthode FDTD à travers le logiciel Fullwave de Rsoft (Figure III.13(b)).



(a)



(b)

Figure III.13: Guides à cavités couplées dans un cristal photonique hexagonale suivant la direction ΓM.

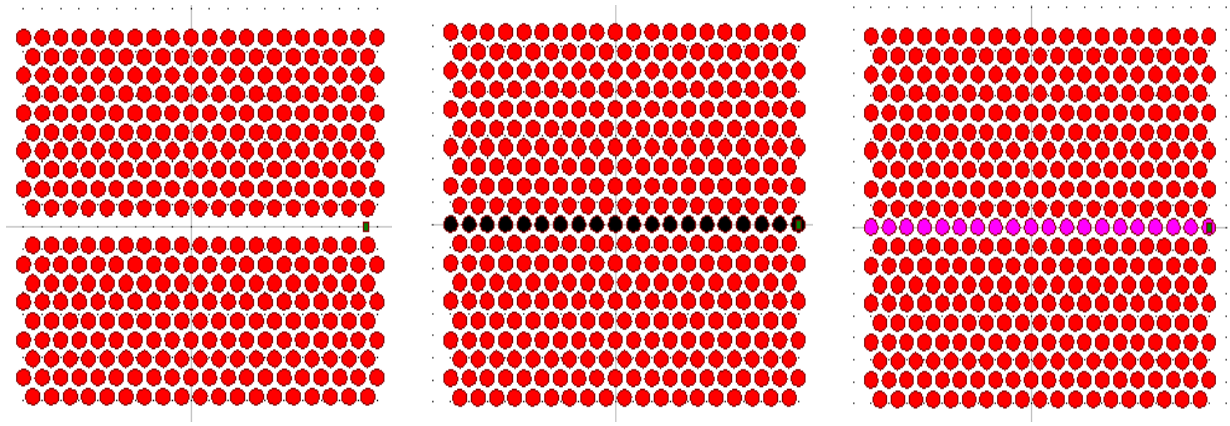
I.7 Evaluation des pertes

La mesure des pertes de propagation dans les guides à cristaux photoniques bidimensionnels fournit également une mesure de la qualité des cristaux photoniques dans la bande interdite photonique. Cette mesure est donc extrêmement utile dans la perspective des circuits intégrés optiques.

L'une des méthodes couramment utilisée pour la mesure des pertes de propagation dans les guides, qu'ils soient à cristaux photoniques ou non, consiste à comparer l'intensité des signaux se propageant dans des différents guides.

III.7.1 Les pertes linéiques suivant ΓK

Le calcul des pertes linéiques a été évalué en réalisant trois types de guides d'ondes droits W1. Ces derniers sont réalisés à cristaux photoniques sur trois membranes différentes l'indium de phosphore (InP n=3.17), L'arséniure de galium (GaAs n=2.94) et le silicium (n=3.4). Dans cette partie, l'injection de la lumière est effectuée toujours suivant la direction de propagation **ΓK**. La figure III.14. (a), (b) et (c) représente les trois structures étudiées.



(a) (b) (c)

Figure III.14 : Structures d'un guide d'onde droit W1 : (a) à base de InP, (b) à base de Silicium et (c) à base de GaAs.

En utilisant le simulateur FullWave, nous avons obtenu les spectres de transmission pour les trois guides d'ondes, les résultats sont reportés sur la figure III-15. D'après cette figure on peut constater que plus l'indice de réfraction augmente (le silicium en vert) plus le coefficient de transmission est élevé.

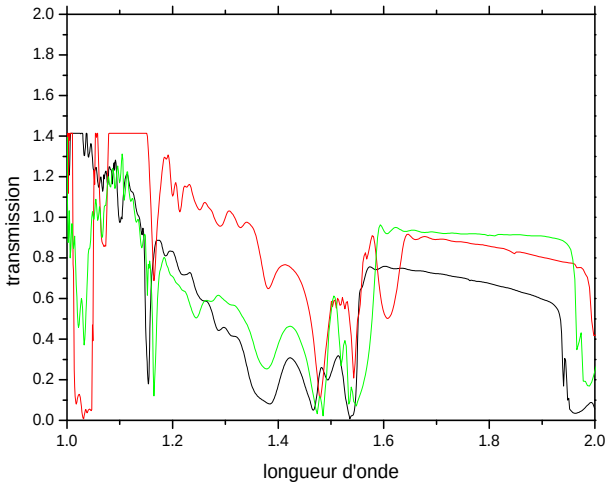


Figure III.15 : Le spectre de transmission pour trois types de guides W1 : vert pour le silicium, rouge pour l'indium de phosphore et noir pour le GaAs

III.7.2 Les pertes linéiques suivant ΓM

Dans cette section, on va évaluer les pertes linéiques à travers la propagation d'une onde lumineuse suivant la direction **ΓM**. Pour cela, trois guides à cavités couplées sont réalisés sur une membrane de l'indium de phosphore. La figure III.16 représente le schéma en dessus de ces trois guides d'ondes.

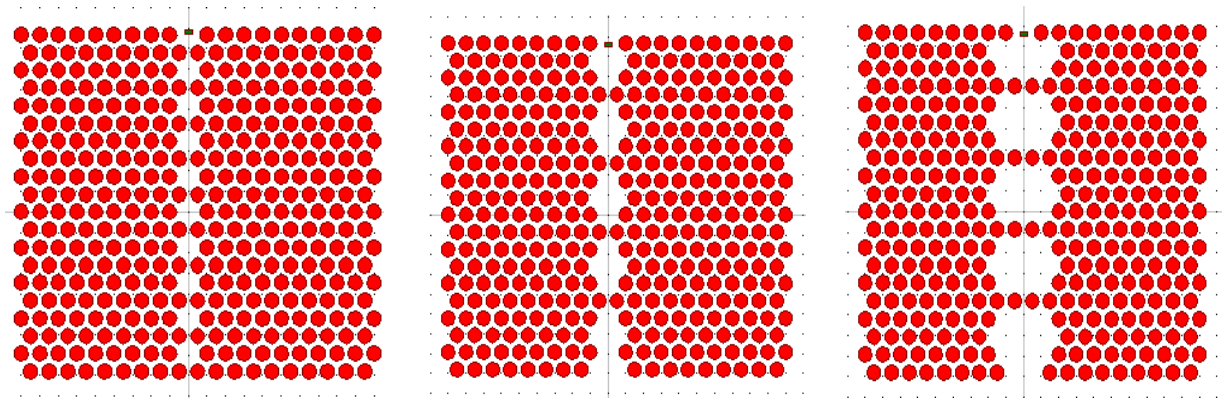


Figure III.16 : Guides à cavités couplées dans un cristal photonique bidimensionnels à réseau hexagonale suivant la direction ΓM.

Les spectres de transmission qu'on a obtenus par simulation à l'aide du logiciel FullWave de Rsoft CAD sont reporté sur la figure III.17.

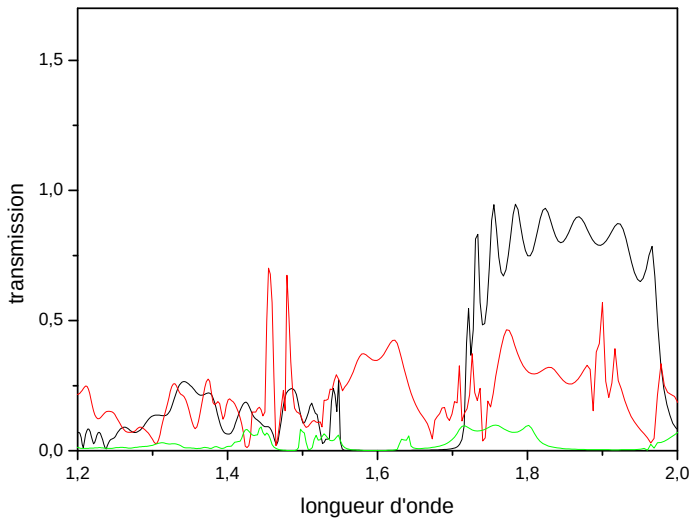


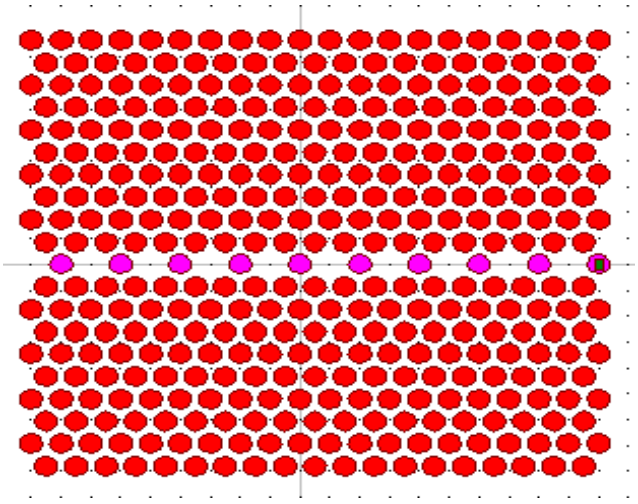
Figure III.17 : Le spectre de transmission pour trois types de Guides à cavités couplées suivant la direction ΓM : noir pour le (c), rouge pour (b) et vert pour le (a)

III.8 Guides à cavités couplées

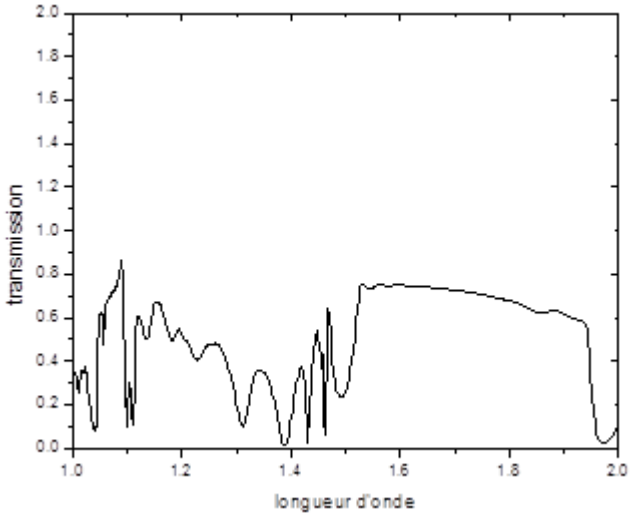
Le guide d'onde à cavités couplées est réalisé à base d'un cristal photonique bidimensionnel en un réseau triangulaire de trous d'air percés sur une membrane de InP (3.17). le long du guide W1 on insert des cylindres de même rayon remplis de GaAs (n=2.94).

Dans ce guide l'injection de la lumière sous forme d'une onde plane monochromatique à polarisation TM est effectuée suivant la direction ΓK (figure III.18(a)).

En utilisant le simulateur FullWave, nous avons reporté sur la figure III.18(b) le coefficient de transmission de ce guide en fonction de la longueur d'onde.



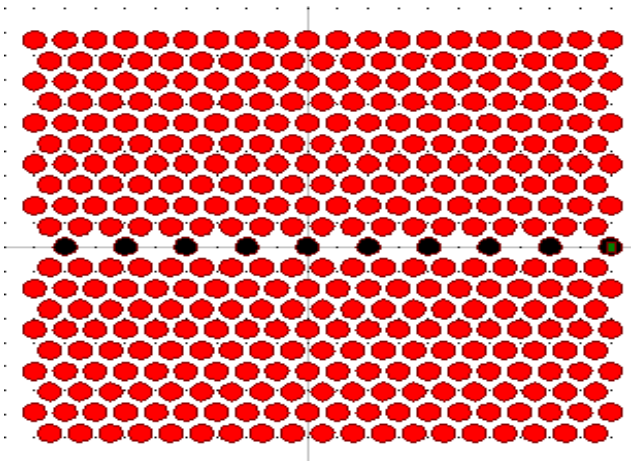
(a)



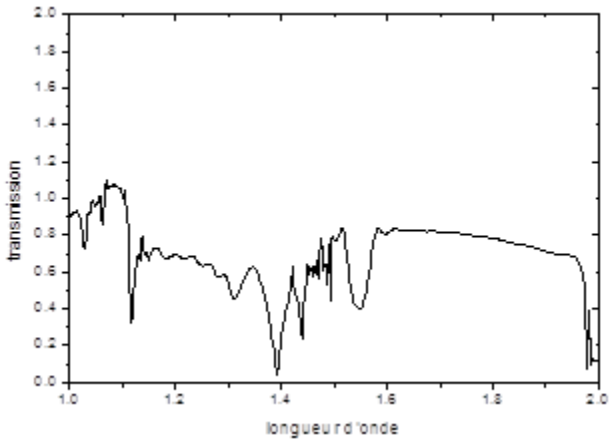
(b)

Figure III.18: Guides à couplage par cavités suivant la direction ΓK réalisé dans une structure connectée à cristal photonique 2D à base de GaAs

Dans cette partie, on va évaluer les pertes linéiques à travers la propagation d'une onde lumineuse suivant la direction ΓK. Pour cela, un guide d'onde droit à cavités couplées est réalisé à travers l'insertion des cylindres de même rayon que les trous du réseau, mais ils sont remplis de silicium (3.42) sur la même membrane de l'indium de phosphore. La figure III.19 représente le schéma en dessus de ces trois guides d'ondes.



(a)

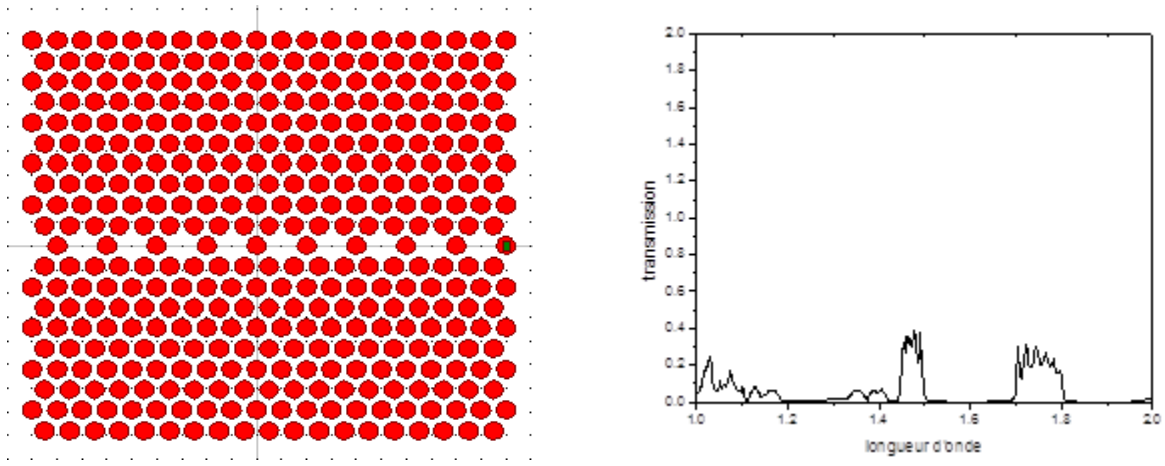


(b)

Figure III.19: Guides à couplage par cavités suivant la direction ΓK réalisé dans une structure connectée à cristal photonique 2D à base de Silicium

En utilisant le simulateur FullWave, nous avons obtenu le spectre de transmission pour ce guide d'ondes, le résultat est reporté sur la figure III-19(b).

En reprend dans ce cas la même structure, c'est-à-dire le guide d'onde droit W1 à cavités couplées ou les cavités sont obtenus par l'omission certain trous d'air. Ce guide est réalisé sur une membrane de l'indium de phosphore comme il est schématisé sur la figure III.20 (a). La figure III.20(b) représente le spectre de transmission en fonction de la longueur d'onde obtenu par la simulation en utilisant le FullWave.



(a) (b)

Figure III.20: Guides à couplage par cavités suivant la direction ΓK réalisé dans une structure connectée à cristal photonique 2D à base de l'Indium de Phosphore.

En utilisant le logiciel FullWave de Rsoft basé sur la méthode des différences finies dans le domaine temporelle FDTD, nous avons obtenu les spectres de transmission pour les trois guides d'ondes à cavités couplés suivant la direction de propagation ΓK, les résultats sont reportés sur la figure III-21. D'après cette figure on peut constater que plus l'indice de réfraction augmente (le silicium en rouge) plus le coefficient de transmission est élevé.

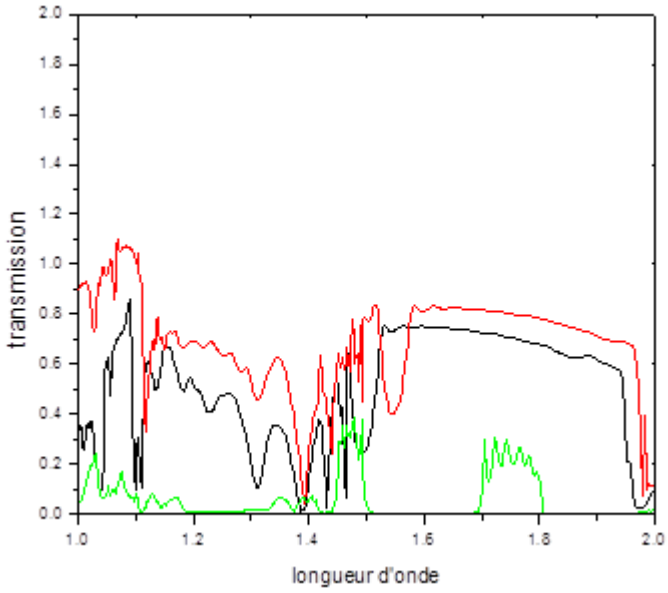


Figure III.21: le spectre de transmission pour trois types de Guides à cavités couplées suivant la direction ΓK : rouge pour le silicium, vert pour l'indium de phosphore et noir pour le GaAs

III.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons reporté les résultats de simulation obtenus à l'aide de notre simulateur Fullwave de Rsoft CAD lequel est destiné au calcul de la transmission dans les composants à cristaux photoniques tel que un guide d'onde et les cavités à cristaux photoniques.

Tout d'abord, nous avons commencé par l'étude d'un guide simple droit W1 réalisé sur membrane de InP, puison a essayer d'évaluer les pertes dans plusieurs guides à cavités couplés en faisant à travers le calcul des coefficients de transmission en fonction de la longueur d'onde pour trois types des matériaux suivant la direction de propagation ΓM.

Ensuite nous avons évalué les pertes linéiques dans les guides à cavités couplées suivant la direction ΓK.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Ce mémoire de master met en relief l'intérêt de l'utilisation des cristaux photoniques pour l'optique guidée. Ces matériaux, dont la constante diélectrique varie périodiquement à l'échelle de la longueur d'onde, ont la particularité de présenter des bandes interdites photoniques qui interdisent la propagation de la lumière dans la structure. L'utilisation de cet effet de bande interdite ouvre la voie à la réalisation de nombreuses fonctions optiques telles que le guidage.

Généralement, les guides d'ondes à cristaux photoniques s'obtiennent en créant des défauts étendus dans les cristaux photoniques bidimensionnels. Nous avons étudié deux types de guides d'ondes W1 selon la direction de propagation d la lumière. Les guides d'ondes ΓK et les guides d'ondes ΓM. Les guides étudiés sont réalisés à base de trois matériaux : le Silicium (Si), l'Indium de Phosphore (InP) et l'arséniure de galium (GaAs).

En fin nous avons simulé la propagation de la lumière dans les différents guides d'ondes à l'aide du logiciel Fullwave afin d'évaluer les pertes linéiques dans le guide d'onde à cristal photonique bidimensionnel, en fonction des paramètres physiques et géométriques. Les résultats obtenus montrent clairement que ces pertes sont fortement dépendent de propriétés physiques et géométriques.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

[1] Naili Ibrahim «Etudes des guides d'ondes à cristaux photoniques 2D», mémoire de master, Université de m'sila ,2014.

[2] Abri badaoui Hadjira, «étude et conception des micro composants a base des cristaux photoniques bidimensionnels», Thèse de doctorat, Université de TLEMCEN,2012

[3] DEHIRI YAZID « Etude et modélisation de la bande interdite photonique dans les cristaux Photoniques bidimensionnels : cas d'une structure déconnectée », mémoire de master, Université de m'sila,2012

[4] Aidi Abderrahmane « Etude et modélisation de la bande interdite photonique dans les cristaux Photoniques bidimensionnels :cas d'une structure connectée », mémoire de master, Université de m'sila,2012

[5] BenmerkhI Ahlem «influence des paramètres géométriques sur la cavité à cristaux photoniques bidimensionnels », mémoire de magister, Université de Constantine ,2008

[6] Bendjelloul Rahima «Etude du couplage dans les guides d'onde à cristaux photoniques», mémoire de magister, Université de Constantine, 2009.

[7] Bougriou Feida «uni etude theorique des materiaux a bandes interdites photoniques bidimensionnels : applications dans le domaine du guidage optique et la detection», Thèse de doctorat ,université de Constantine, 2013

[8] Boudelal Riad «etude de couplage d'un guide d'ondes avec une fibre optique application en optique integree pour les telecoms optiques», », mémoire de magister, Université de Constantine, 2010.

[9] Taflove, A., Advances in Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method. 1998: Artech House, Inc.

[10] M. PLIHAL, A.A. MARADUDIN, "Photonic band structure of two-dimensional systems: The triangular lattice", Physical Review B, Vol. 44, October 1991, pp. 8565-8571.

[11] Yannick MERLE «Etude de la dispersion électromagnétique dans les matériaux périodiques diélectriques bidimensionnels», Thèse de doctorat, Université de limoges, 2003.

[12] Barbara WILD « Etude expérimentale des propriétés optiques des cristaux photoniques bidimensionnels et de leur accordabillité », Thèse de doctorat, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 2006.

[13] K. S. YEE,« Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media », IEEE Transaction Antennas and Propagation, vol.14, 1966, pp. 302-307.

[14] Yohan 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 en sciences n 01-0081, L'institut national des sciences appliquées de Lyon, Décembre 2001.

[15] Benmerkhi Ahlem, «optimisation du confinement de la lumiere dans des cavites a cristaux photoniques», Thèse de doctorat, Université de Constantine ,2012

[16] Tanguy Jaffre, «Caractérisation des matériaux à bande interdite électromagnétique multi périodiques et leurs applications aux antennes», Thèse de doctorat Nº 03, université de limoges, 2005.

[17] RSoft Design Group, FullWAVE v3.0.1, Inc. 200 Executive Blvd. Ossining, NY 10562

[18] GRINE Farouk «Principe de la propagation des ondes dans une fibre a cristaux Photoniques». mémoire de Master, Université de Constantine, 2011.