

**République algérienne démocratique et Populaire Ministère de  
l'Enseignement supérieur et de la Recherche scientifique  
Université Mohamed Boudiaf - M'sila**



**Faculté:** Technologies  
**Filière:** Sciences et Technologies  
**Département:** Electronique  
**Spécialité:** Micro Electronique

**Mémoire présenté en vue de l'obtention du Master Académique**

**Présenté par: -Abdelhafid Achraf -**

**-Tiaiba Khaled -**

**Intitulé**

**Etude et simulation d'un filtre à cristaux  
photoniques**

**Sous la supervision des professeurs :**

**Encadrant : Dr.Farida Kebaili**

**Président du jury : Dr.Harhouz ahlam**

**Examinatrice : Mme.Chabane Rayane**

**Année universitaire : 2024 / 2025**



# Table des matières

Table des matières .....	I
Table des Figures .....	III
Liste des Tableaux .....	VI
Liste des abréviations .....	VII
Remerciements .....	VIII
Dédicaces.....	IX
Introduction générale .....	1
<b>Chapitre I : Généralités sur les Cristaux Photoniques</b>	
I.1. Introduction .....	4
I.2. Historique des cristaux photoniques.....	4
I.3. Les Cristaux photoniques .....	5
I.3.1. Définitions .....	5
I.3.2. Les différents Types de Cristaux photoniques .....	5
I.3.2.1. Les Cristaux photoniques Unidimensionnels (1D) .....	6
I.3.2.2. Cristaux photoniques bidimensionnels (2D).....	7
I.3.2.3. Les Cristaux photoniques tridimensionnels (3D).....	10
I.4. Les Caractéristiques géométriques et physiques .....	12
I.4.1. Paramètre du réseau.....	12
I.4.2. Symétrie.....	12
I.4.3. Facteur de remplissage.....	12
I.4.4. Contraste d'indice de réfraction.....	12
I.4.5. La Période .....	13
I.5. La bande interdite photonique .....	13
I.5.1. La Zone de Brillouin .....	13
I.5.2. Diagramme de bandes .....	15
I.6. Les Défauts dans un cristal photonique.....	16
I.6.1. Défauts ponctuels.....	16
I.6.2. Défauts étendus .....	17
I.7. Les applications des cristaux photoniques .....	18
I.7.1. Guides d'onde à cristaux photoniques .....	18
I.7.2. Filtres et multiplexeurs .....	20
I.7.3. Fibres optiques .....	22
I.8. Conclusion .....	22

**Chapitre II : Les filtres a cristaux photoniques**

**II.1 Introduction ..... 24**

**II.2 Définition et principe général des filtres optiques ..... 24**

**II.3 Limites des filtres classiques ..... 25**

**II.4 Apport des cristaux photoniques dans la conception de filtres ..... 26**

**II.5 Types de filtres à cristaux photoniques ..... 26**

**II.6 Méthodes d'analyse et de conception ..... 28**

**II.6.1. La méthode des ondes planes ..... 28**

**II.6.2. La méthode FDTD (Finite Difference Time Domain)..... 28**

**II.7 Caractéristiques de performance des filtres ..... 30**

**II.8 Applications des filtres à cristaux photoniques ..... 31**

**II.9 Conclusion\_ ..... 32**

**Chapitre III : Resultats da la simulation**

**III.1 Introduction ..... 34**

**III.2. Présentation de l'outil de simulation ..... 34**

**III.2.1. Définition du simulateur RSoft CAD ..... 35**

**III.2.2. Fenêtre principale du simulateur RSoft-CAD ..... 35**

**III.2.3. Modules de simulation associés ..... 36**

**III.2.3.1. Le module BandSolve ..... 36**

**III.2.3.2. Le module Fullwave ..... 38**

**III.2.4. Les étapes de simulation ..... 40**

**III.2.4.1. Création d'une nouvelle structure ..... 40**

**III.3 Méthodologie de conception du filtre ..... 43**

**III.3.1 Choix des paramètres structurels ..... 43**

**III.3.2 Étude de l'influence de la périodicité sur les bandes interdites ..... 44**

**III.4 Conception du filtre résonant à cristaux photoniques ..... 47**

**III. 5. Simulation ..... 48**

**III.5.1. Étude de l'effet du rayon r1 sur la réponse spectrale ..... 48**

**III.5.2. Étude e l'effet du rayon r2 sur la réponse spectrale ..... 51**

**III.5.3. Étude de l'effet de l'indice de réfraction sur la réponse spectrale ..... 52**

**III.6. Conclusion ..... 54**

**Conclusion générale ..... 55**

**Résumé ..... 57**

**Bibliographie ..... 58**

# Table des Figures

<b>Figure 1.1 :</b> Représentation schématique de cristaux photoniques unidimensionnels (1D), bidimensionnels (2D) et tridimensionnels (3D).....	6
<b>Figure 1.2:</b> Représentation nanostructure d'un cristal photonique à une dimension.....	6
<b>Figure 1.3:</b> Miroir de Bragg[].....	7
<b>Figure 1.4 :</b> Structure connectée [11].....	8
<b>Figure 1.5 :</b> Structure déconnectée [11].....	8
<b>Figure 1.6 :</b> Le réseau carré [13].....	9
<b>Figure 1.7 :</b> Structure triangulaire [12].....	9
<b>Figure 1.8 :</b> Le réseau hexagonal (Structure graphite) [14].....	10
<b>Figure 1.9 :</b> Structure « La Yablonovitch » [8].....	11
<b>Figure 1.10:</b> Structure « tas de bois » [16].....	11
<b>Figure 1.11:</b> Périodes d'un cristal photonique unidimensionnel.....	13
<b>Figure 1.12:</b> Représentation a) d'un réseau carré b) de son réseau réciproque et c) de sa zone de Brillouin.....	14
<b>Figure 1.13 :</b> Représentation a) d'un réseau triangulaire b) de son réseau réciproque et c) de sa zone de Brillouin.....	14
<b>Figure 1.14:</b> Représentation a) d'un réseau hexagonal b) de son réseau réciproque et c) de sa zone De Brillouin.....	15
<b>Figure 1.15:</b> Polarisation possible dans une structure à bande interdite photonique: TM et TE.....	15
<b>Figure 1.16 :</b> Diagramme de bandes d'un cristal photonique (réseau triangulaire) gravé dans un milieu diélectrique de l'indice de réfraction $\epsilon_{\text{substrat}} = 11.4$ avec un facteur de remplissage de $f = 0.30$ : (a) Polarisation TE ; (b) Polarisation TM [7].....	16
<b>Figure 1.17 :</b> (a) Défaut lacunaire ; (b) Défaut de substitution.....	17
<b>Figure 1.18 :</b> Exemple de défaut lacunaire (a) ; défauts de substitutions (b) et (c).....	17
<b>Figure 1.19 :</b> Exemple de guide W1 à cristal photonique hexagonal de trous d'air sur un substrat de silicium sur isolant [22].....	17

<b>Figure 1.20</b> : Différents composants à base de défauts linéaires, a) guide droit, b) virage à 120°et c) jonction Y.....	19
<b>Figure 1.21</b> : Signatures spectrales de cavités hexagonales obtenues par photoluminescence [23].....	19
<b>Figure 1.22</b> : (a) Exemple de cavité triangulaire dans un cristal photonique triangulaire avec un paramètre de maille 600nm (b) Spectre de photoluminescence d'une cavité triangulaire dans un cristal photonique triangulaire de trous d'air (Paramètre de maille a = 600nm, rayon r =200nm) plongé dans une matrice diélectrique ( $\epsilon=8.12$ ) [24].....	20
<b>Figure 1.23</b> : Schéma de principe d'un dispositif de multiplexage (Insertion ou extraction d'une certaine longueur d'onde).....	20
<b>Figure 1.24</b> : Exemple de filtre Add-Drop réalisé sur un substrat SOI. Les longueurs d'onde résonnantes de l'anneau peuvent éventuellement se coupler d'un guide à l'autre.....	21
<b>Figure 1.25</b> : Un principe parmi d'autres de filtre add-drop utilisant les CPs.....	21
<b>Figure 1.26</b> : Image par microscopie électronique d'un prototype de fibre optique conçu sur la base d'un cristal photonique [27].....	22
<b>Figure 2. 1</b> : Filtre interférentielle multicouche.....	25
<b>Figure 2.2</b> : (a)Illustration de la microcavité à cristal photonique, filtre a couplage de guide d'onde.....	27
<b>Figure 2.3</b> : <i>Diagramme de dispersion d'un BIP 2D en polarisation TM et TE</i> .....	29
<b>Figure 2.4</b> . Courbe de transmission d'un filtre à cristaux photonique.....	30
<b>Fi Figure 2.5</b> : Structure du démultiplexeur à base de résonateurs.....	31
<b>Figure 3.1</b> : Fenêtre principale du simulateur Rsoft- CAD.....	36
<b>Figure 3.2</b> : Fenêtre principale de Bandsolve.....	37
<b>Figure 3.3</b> : Diagramme de bande d'une structure carrée 2D.....	38
<b>Figure 3.4</b> : fenêtre principale des paramètres de simulation Fullwave.....	39
<b>Figure 3.5</b> . Fenêtre du programme de CAD principal.....	40
<b>Figure 3.6</b> : Fenêtre Array Layout Generator du logiciel rsoft CAD.....	41
<b>Figure 3.7</b> : Fenêtre de déclaration des variables.....	41
<b>Figure 3.8</b> : La structure affichée dans rsoft CAD.....	42

<b>Figure 3.9 :</b> a) Fenêtre « simulation paramètres » du module bandsolve b) Fenêtre « simulation paramètres » du module Fullwave.....	43
<b>Figure 3.10.</b> Représentation schématique de la structure bidimensionnelle à cristaux photoniques proposée.....	44
<b>Figure 3.11.</b> Schéma du diagramme de bandes de la structure cristalline photonique bidimensionnelle proposée pour $a=0.35, 0.4, 0.45, 0.5$ respectivement.....	45
<b>Figure 3.12.</b> Représentation schématique du filtre proposé.....	48
<b>Figure 3.13 :</b> Représentation des spectres de sortie du filtre pour différentes valeur de rayon de $r_1$ avec $r_2=0.08\mu\text{m}$ .....	50
<b>Figure 3. 14 :</b> Représentation des spectres de sortie du filtre pour différentes valeur de rayon de $r_2$ avec $r_1=0.125\mu\text{m}$ .....	52
<b>Figure 3.15 :</b> Représentation des spectres de sortie du filtre pour différentes valeurs d'indice de réfraction.....	53

---

## Liste des Tableaux

<b>Tableaux 3.1</b> : Variation de la longueur d'onde de résonance et le facteur de qualité en fonction du rayon $r_1$ , $r_2=0.08\mu\text{m}$ .....	51
<b>Tableaux 3.2</b> : Variation de la longueur d'onde de résonance et le facteur de qualité en fonction du rayon $r_2$ , avec $r_1=0.125\mu\text{m}$ .....	51
<b>Tableaux 3.3</b> : Variation de la longueur d'onde de résonance et le facteur de qualité en fonction d'indice de réfraction.....	53

# Liste des abréviations

Dans le cadre de ce travail, nous avons utilisé quelques abréviations dont nous rappelons la signification ci-dessous :

<b>BIP</b>	Bande Interdite Photonique
<b>CFC</b>	Cubique à Face Centrée
<b>CPs</b>	Cristaux Photoniques
<b>DBR</b>	Distributed Bragg Reflector
<b>FDTD</b>	Finite Difference in the Time Domain
<b>FWHM</b>	Full Width Half Maximum
<b>Hn</b>	Hexagonale
<b>LD</b>	Limite de la Détection
<b>Ln</b>	Linéaire
<b>N</b>	Indice de Réfraction
<b>PBG</b>	Photonic Band Gap
<b>TE</b>	Transverse Électrique
<b>TM</b>	Transverse Magnétique
<b>PWE</b>	Plane Wave Expansion
<b>Q</b>	Facteur de Qualité (Quality Factor)
$\lambda_0$	Longueur d'Onde Centrale
$\Delta\lambda$	Bande Passante
<b>WDM</b>	Wavelength Division Multiplexing
<b>SOI</b>	Silicon On Insulator
<b>E</b>	Permittivité Diélectrique
<b>BPM</b>	Beam Propagation Method
<b>CAD</b>	Computer-Aided Design

---

## Remerciements

### *Remerciements*

*Nous tenons tout d'abord à exprimer notre profonde gratitude à madame Kebaili Farida, notre encadrant, pour ses conseils précieux, sa disponibilité, ainsi que son soutien tout au long de la réalisation de ce mémoire. Ses remarques constructives et son accompagnement nous ont grandement aidés à mener à bien ce travail.*

*Nous remercions également l'ensemble du corps enseignant de l'Université de M'sila, Département d'électronique, pour la qualité de leur enseignement et les connaissances qu'ils nous ont transmises durant notre parcours universitaire.*

*Nous adressons nos sincères remerciements aux membres du jury, pour avoir accepté d'évaluer notre travail et pour leurs observations enrichissantes qui vont contribuer à améliorer la qualité de ce mémoire.*

*Enfin, nous remercions toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réussite de ce mémoire.*

---

# Dédicaces

## **Dédicaces**

*À celle qui a été et reste la source de tendresse, de force et de prières sincères dans les nuits difficiles... À ma chère mère, sans qui je ne serais jamais arrivé là où je suis aujourd'hui. Aucun mot de remerciement ne saurait exprimer toute ma gratitude envers toi.*

*À mon cher père, mon soutien et mon premier maître, qui a semé en moi les valeurs et cultivé la persévérance et la détermination. Merci pour ton soutien moral et matériel, et pour ta confiance constante en moi.*

*À mes frères et sœurs bien-aimés, vous êtes le pilier sur lequel je m'appuie, la force qui me pousse en avant. Pour chaque instant passé à mes côtés, pour chaque mot réconfortant et chaque sourire encourageant, je vous dis : qu'Allah vous récompense pour tout le bien que vous m'avez apporté.*

*À mes amis proches, qui ont été là dans les moments de joie comme dans les épreuves, merci pour votre sincérité et votre loyauté.*

*Et même à ceux avec qui j'ai partagé de brefs instants : votre présence a laissé une empreinte inoubliable.*

*Enfin, à ma professeure encadrante, qui ne m'a jamais ménagé son savoir ni ses conseils, j'exprime toute ma gratitude et mon estime pour son dévouement, sa patience et son accompagnement constant tout au long de ce travail.*

**ACHRAF**

**Dédicaces**

*À celle qui a été et reste la source de tendresse, de force et de prières sincères dans les nuits difficiles... À ma chère mère, sans qui je ne serais jamais arrivé là où je suis aujourd'hui. Aucun mot de remerciement ne saurait exprimer toute ma gratitude envers toi.*

*À mon cher père, mon soutien et mon premier maître, qui a semé en moi les valeurs et cultivé la persévérance et la détermination. Merci pour ton soutien moral et matériel, et pour ta confiance constante en moi.*

*À mes frères et sœurs bien-aimés, vous êtes le pilier sur lequel je m'appuie, la force qui me pousse en avant. Pour chaque instant passé à mes côtés, pour chaque mot réconfortant et chaque sourire encourageant, je vous dis : qu'Allah vous récompense pour tout le bien que vous m'avez apporté.*

*À mes amis proches, qui ont été là dans les moments de joie comme dans les épreuves, merci pour votre sincérité et votre loyauté.*

*Et même à ceux avec qui j'ai partagé de brefs instants : votre présence a laissé une empreinte inoubliable.*

*Enfin, à ma professeure encadrante, qui ne m'a jamais ménagé son savoir ni ses conseils, j'exprime toute ma gratitude et mon estime pour son dévouement, sa patience et son accompagnement constant tout au long de ce travail.*

KHALED

# Introduction générale

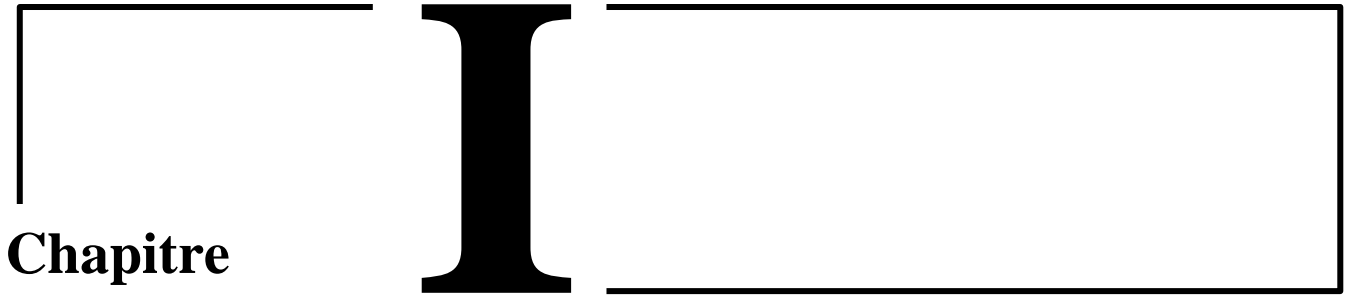
Au cours des dernières décennies, l'essor des technologies photoniques a profondément transformé les domaines des télécommunications, de la détection optique et du traitement de l'information. Parmi les structures les plus prometteuses dans ce domaine, les cristaux photoniques se distinguent par leur capacité à contrôler et manipuler la propagation de la lumière à l'échelle nanométrique, de manière similaire à celle des semi-conducteurs pour les électrons. Grâce à leur bande interdite photonique, ces structures permettent la conception de dispositifs compacts, efficaces et à hautes performances, tels que les guides d'ondes, les microcavités, et les filtres optiques [1].

Dans ce contexte, les filtres à cristaux photoniques jouent un rôle essentiel dans la sélection de longueurs d'onde spécifiques, que ce soit pour le multiplexage en longueur d'onde (WDM) dans les systèmes de communication optique, ou pour la conception de capteurs optiques sélectifs. L'étude approfondie de ces filtres permet ainsi d'optimiser les performances des dispositifs photoniques et de répondre aux exigences croissantes en matière de miniaturisation, de rapidité et d'efficacité énergétique [2-7].

Le présent mémoire s'inscrit dans cette dynamique et s'intéresse à la conception, l'étude et la simulation d'un filtre à cristaux photoniques en deux dimensions. Pour cela, nous utilisons le logiciel de simulation RSoft, un outil puissant et largement utilisé dans le domaine de l'optique intégrée et de la photonique. Grâce à ses capacités de modélisation par la méthode FDTD (Finite Difference Time Domain) et BPM (Beam Propagation Method), il permet d'analyser avec précision le comportement des structures photoniques et d'optimiser leurs paramètres[8].

L'objectif principal de ce travail est de proposer une structure de filtre performante, en étudiant l'influence de différents paramètres géométriques et optiques sur ses caractéristiques spectrales. Ce mémoire s'organise autour de trois axes majeurs : une première partie théorique consacrée aux fondements des cristaux photoniques, une

seconde dédiée aux filtres à cristaux photoniques. Nous y présentons les différentes configurations existantes, leurs principes de fonctionnement, ainsi que les critères de performance. La troisième partie est réservée à la conception, la simulation et l'analyse du filtre proposé à l'aide du logiciel RSoft. Les résultats obtenus sont discutés et comparés afin d'optimiser les performances du dispositif.



**Chapitre**

# Généralités sur les Cristaux Photoniques

## **I.1. Introduction :**

Au cours des dernières années, de nombreuses recherches ont été consacrées au développement de dispositifs optiques avancés et précis tirant parti des propriétés uniques des cristaux photoniques, capables d'influencer de manière particulière la propagation de la lumière [1]. Ces structures, à la fois inspirées de phénomènes naturels et créées artificiellement, permettent un contrôle inédit de la lumière.

Ce chapitre vise à introduire la notion de cristaux photoniques, à en décrire les principaux types et caractéristiques, puis à donner un aperçu des principes associés aux défauts pouvant apparaître dans ces structures.

## **I.2. Historique des cristaux photoniques :**

En 1987, dans le but de limiter l'émission spontanée de lumière dans les lasers et les semi-conducteurs, Eli Yablonovitch et Sajeev John ont proposé une nouvelle méthode de fabrication de miroir de Bragg, en s'inspirant du concept introduit par W. L. Bragg à la fin du XIXe siècle. Leur méthode s'est distinguée par l'introduction d'une structure multidimensionnelle, consistant en une périodicité tridimensionnelle obtenue par l'agencement régulier de sphères, de cylindres ou de poutres [2].

En 1991, Yablonovitch a concrétisé cette idée par une première structure fonctionnelle, opérant dans la gamme des longueurs d'onde centimétriques. Ce dispositif, nommé "Yablonovite", est un bloc de plexiglas usiné dans trois directions séparées par des angles de  $120^\circ$ , de manière à imiter la structure cristalline du diamant. Le matériau obtenu, désigné sous l'acronyme BIP, représente une adaptation tridimensionnelle des miroirs de Bragg pour les ondes micro-ondes.

Contrairement aux miroirs de Bragg traditionnels, qui reposent sur une superposition périodique de couches diélectriques et agissent dans une seule direction spatiale, les cristaux photoniques BIP tridimensionnels permettent l'apparition d'une bande interdite omnidirectionnelle, valable pour toutes les polarisations de l'onde [3]. Cette avancée a valu à Yablonovitch une reconnaissance remarquable [4].

### I.3. Les Cristaux photoniques :

#### I.3.1. Définitions :

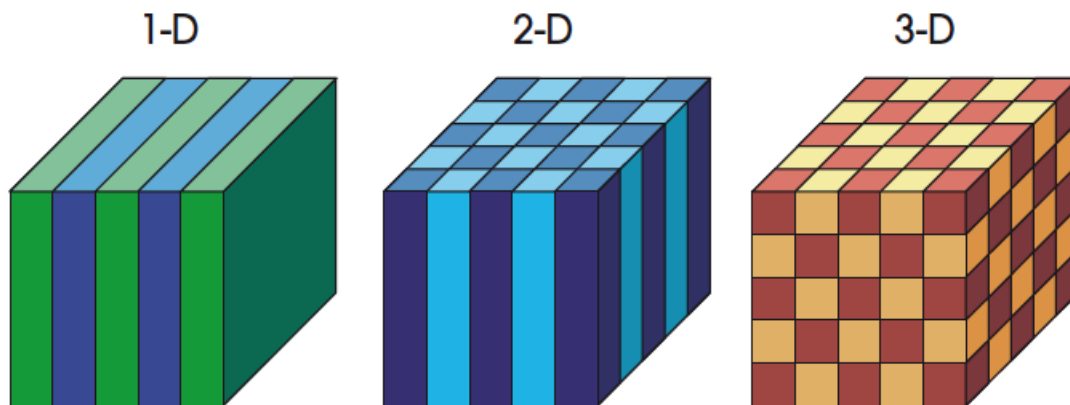
Les cristaux photoniques (CPs) sont des matériaux diélectriques nanostructurés, caractérisés par une variation périodique de leur indice de réfraction à l'échelle de la longueur d'onde, dans une ou plusieurs directions de l'espace [5]. Cette structuration engendre une plage de fréquences spécifique dans laquelle les ondes électromagnétiques ne peuvent pas se propager, connue sous le nom de bande interdite photonique (BIP), ou *photonic band gap* (PBG) en anglais. Ces cristaux ont la capacité de moduler la propagation des ondes électromagnétiques sans provoquer leur absorption, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives dans le contrôle et la manipulation de la lumière [6].

#### I.3.2. Les différents Types de Cristaux photoniques :

Il existe plusieurs types de cristaux photoniques, classés selon leur dimensionnalité, et pouvant se présenter sous différentes formes, parmi lesquelles :

- Cristaux photoniques 1D : formés par l'empilement de couches minces ou par des réseaux de Bragg.
- Cristaux photoniques 2D : constitués de réseaux de trous répartis sur une surface plane.
- Cristaux photoniques 3D : réalisés à partir de l'empilement de couches de billes de silice auto-organisées.

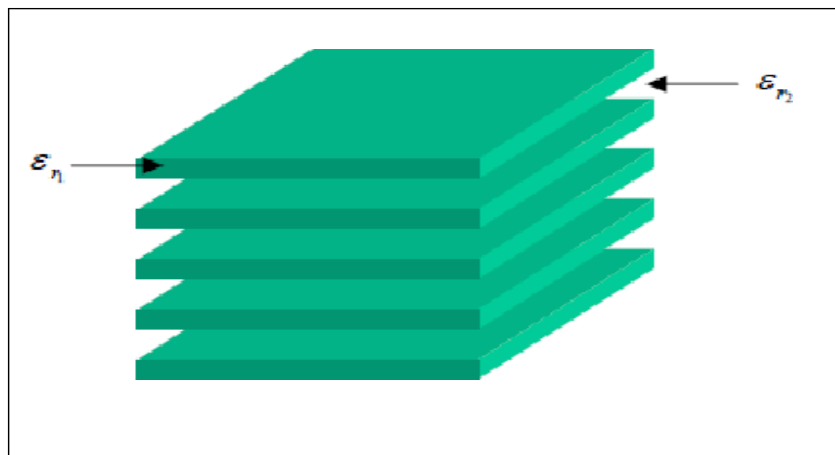
La structure des cristaux photoniques, représentée dans la figure (1.1), montre une modulation périodique de la permittivité diélectrique ( $\epsilon$ ) selon une, deux ou trois directions de l'espace.



**Figure 1.1 :** Représentation schématique de cristaux photoniques unidimensionnels (1D), bidimensionnels (2D) et tridimensionnels (3D).

### I.3.2.1. Les Cristaux photoniques Unidimensionnels (1D) :

Le cristal photonique le plus élémentaire est une structure dont la permittivité diélectrique varie périodiquement le long d'une seule dimension. Il est constitué d'un agencement alternatif de couches diélectriques présentant des permittivités distinctes, notées  $\epsilon_1$  et  $\epsilon_2$ , comme illustré dans la figure (I.2). Cette structure est couramment désignée sous le nom de miroir de Bragg [7].



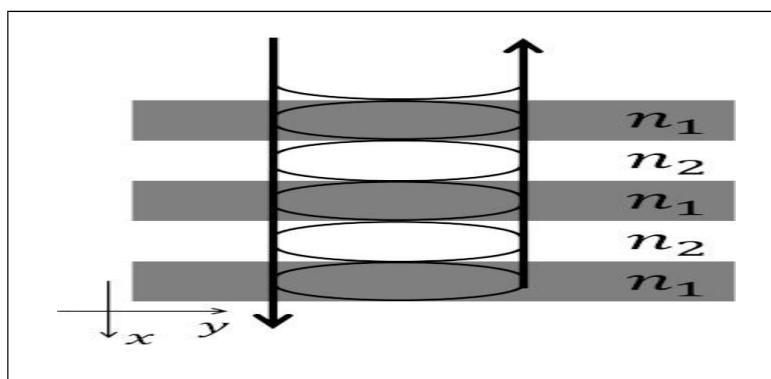
**Figure 1.2:** Représentation nanostructure d'un cristal photonique à une dimension [8].

Le DBR (Distributed Bragg Reflector) est un type de miroir de Bragg constitué d'une alternance de couches composées de deux matériaux ayant des indices de réfraction  $n_1$  et  $n_2$ . En répétant cette paire ( $n_1$ ,  $n_2$ )  $N$  fois, toutes les couches ont des épaisseurs physiques égales, respectivement :

$$\text{Indice } n_1 = \lambda_{\text{Bragg}}/4n_1 \quad (\text{I.1})$$

$$\text{Indice } n_2 = \lambda_{\text{Bragg}}/4n_2 \quad (\text{I.2})$$

Avec,  $\lambda_{\text{Bragg}}$  : la longueur d'onde de Bragg pour laquelle le maximum de réflectivité est obtenu [9].



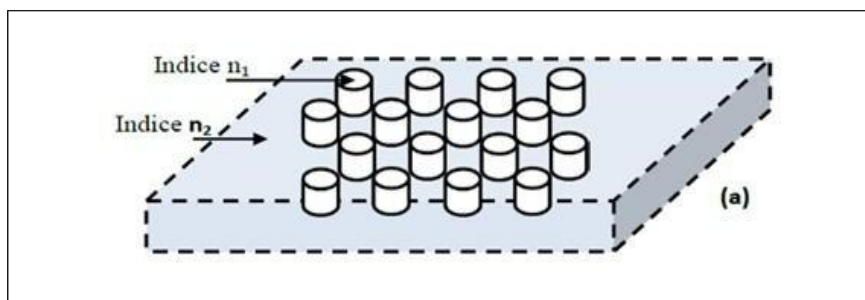
**Figure 1.3:** Miroir de Bragg

### I.3.2.2. Cristaux photoniques bidimensionnels (2D) :

Les cristaux photoniques bidimensionnels possèdent une périodicité dans deux directions spatiales, tout en étant supposés infinis dans la troisième. Cela implique que l'indice de réfraction est modulé selon les axes  $x$  et  $y$ . Ces cristaux peuvent être divisés en deux grandes familles : les structures dites « connectées » et celles qualifiées de « déconnectées ».

#### a) La structure connectée :

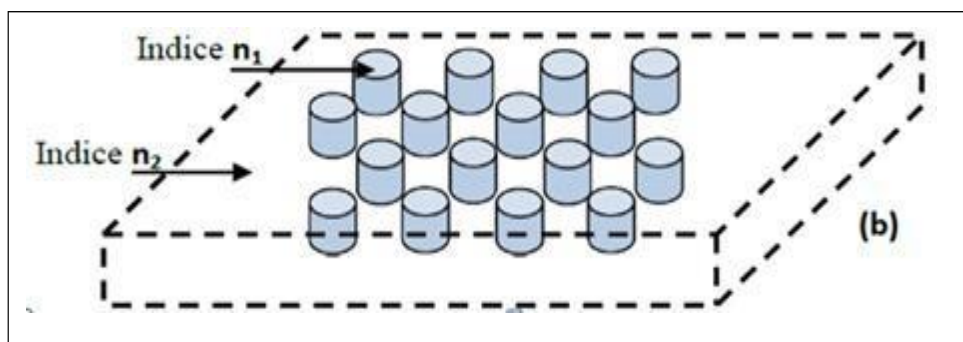
La structure connectée est illustrée dans la figure I.4. Dans ce motif élémentaire, l'indice  $n_1$  est inférieur à l'indice  $n_2$  de la matrice diélectrique [10].



**Figure 1.4 :** Structure connectée [11].

**b) La structure déconnectée :**

La structure déconnectée est représentée dans la Figure I.5. Dans ce motif élémentaire, l'indice  $n_1$  est supérieur à l'indice  $n_2$  de l'espace entre les motifs. Ces structures sont composées de tiges diélectriques alignées de manière périodique dans l'air [10].



**Figure 1.5 :** Structure déconnectée [11].

Plusieurs théoriciens ont tenté d'améliorer les dimensions des structures afin d'obtenir des bandes interdites complètes, même si elles sont peu utilisées. Il existe trois catégories principales de matériaux à BIP bidimensionnelle en fonction de la configuration du réseau [12].

➤ Réseau carré :

On trouve les nœuds du réseau sur un carré de côté «  $a$  » (Figure I.6). Selon des études, ce genre de réseau présente une grande sensibilité à l'angle d'incidence et à la polarisation de l'onde électromagnétique [13]. Il est par conséquent compliqué d'obtenir une bande interdite complète, c'est-à-dire une bande interdite qui empêche la propagation, peu importe la polarité.

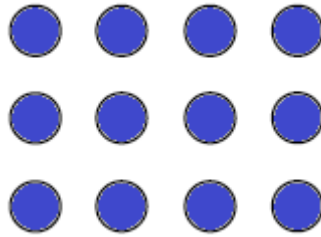


Figure 1.6 : Le réseau carré [13].

➤ **Réseau triangulaire :**

Le réseau triangulaire est le réseau en deux dimensions avec la symétrie la plus élevée, car il se restreint à un seul "atome" par maille. La région de Brillouin forme un triangle. La distance entre chaque nœud du réseau et son proche voisin est égale à «  $a$  » (figure I.7). Cette structure présente une sensibilité moins grande à l'angle d'incidence que le réseau carré, mais il est encore difficile d'obtenir une bande interdite complète [11].

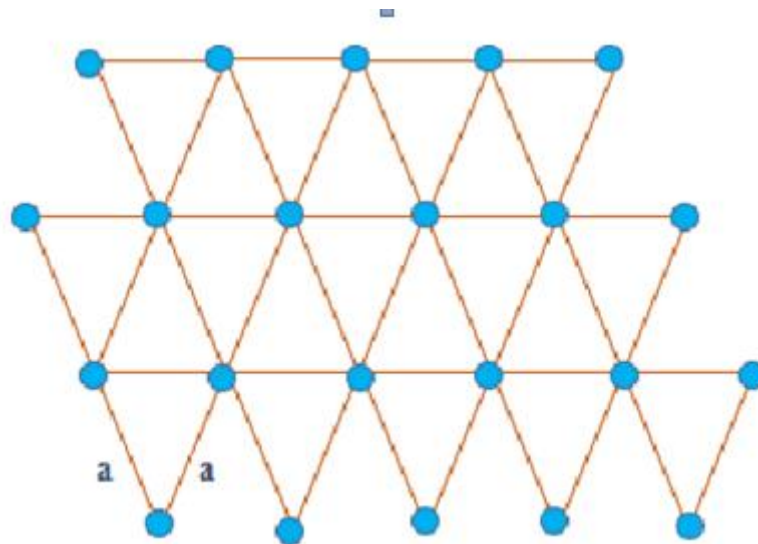
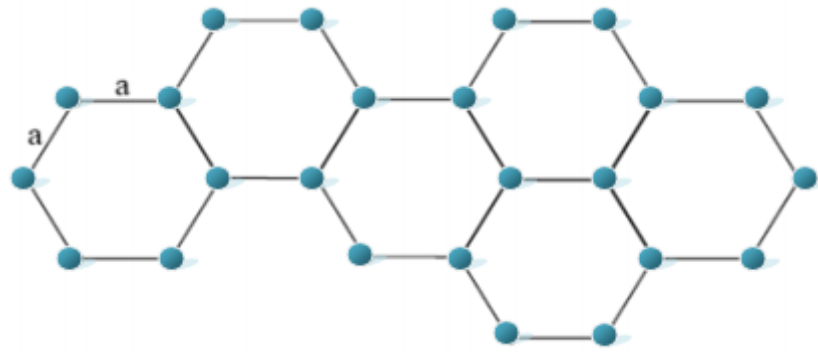


Figure 1.7 : Structure triangulaire [12].

➤ **Réseau hexagonal :**

Lorsque tous les nœuds d'un réseau hexagonal sont identiques et espacés de «  $a$  », on désigne cette structure comme étant similaire à la structure cristalline du graphite (Figure I.8). Contrairement au réseau triangulaire, il est constitué de deux "atomes" par maille. Pour la première fois, on avait anticipé la possibilité d'une bande interdite complète dans le cadre d'un réseau de tiges diélectriques cylindriques [14].



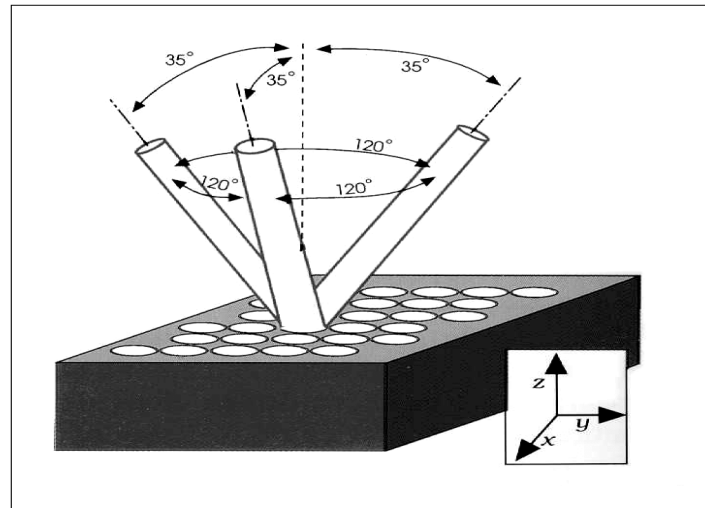
**Figure 1.8 :** Le réseau hexagonal (Structure graphite) [14]

### I.3.2.3. Les Cristaux photoniques tridimensionnels (3D) :

Le cristal photonique tridimensionnel est la seule structure capable de produire une bande interdite d'énergie dans toutes les directions de l'espace. Le tout premier cristal photonique 3D a été réalisé par K.M. Ho et ses collègues, en organisant des sphères de silicium selon une configuration de type diamant [15]. Toutefois, la Yablonovite, une structure tridimensionnelle conçue pour les micro-ondes, développée en 1993 par E. Yablonovitch, est fréquemment mentionnée [15]. Cette structure a été obtenue en forant du plexiglas suivant trois orientations azimutales séparées de  $120^\circ$ . Diverses méthodes ont été proposées pour la fabrication de cristaux photoniques tridimensionnels, mais deux recherches en particulier ont attiré une attention notable.

#### a) Yablonovitch :

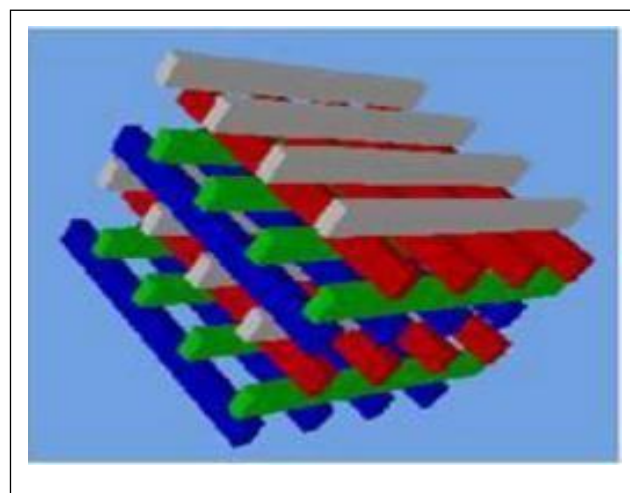
En 1993, E. Yablonovitch a créé les premiers cristaux photoniques tridimensionnels en perçant des trous dans un bloc de plexiglas à trois angles azimutaux différents de  $120^\circ$ , ce qui a donné un angle de  $35^\circ$  par rapport à la normale (figure I.9). La structure est très similaire à celle d'un diamant [15].



**Figure 1.9 :** Structure « La Yablonovitch » [8].

**b) Structure tas de bois :**

C'est une structure complète présentant une bande interdite, qui peut être facilement réalisée. Elle peut être construite selon une approche qui consiste à déposer des rubans de silicium polycristallin par couches successives, sans recourir à des tranchées de silice. Une fois que la structure est assemblée, la silice est sculptée pour former un cristal photonique 3D en silicium dans l'air (voir figure I.10) [15].



**Figure 1.10:** Structure « tas de bois » [16].

## **I.4. Les Caractéristiques géométriques et physiques :**

Les matériaux utilisés, leur agencement suivant un système cristallin donné, ainsi que les proportions qu'ils occupent au sein de la cellule élémentaire d'un cristal photonique, sont les éléments qui permettent de les différencier [10]. Plus précisément :

### **I.4.1. Paramètre du réseau :**

Il s'agit de la distance élémentaire séparant deux unités constitutives. Cette distance définit la plage spectrale dans laquelle le cristal photonique interagit avec l'onde électromagnétique [16].

### **I.4.2. Symétrie :**

La disposition des éléments constitutifs d'un cristal photonique définit la symétrie du réseau. Par exemple, pour un cristal photonique 3D composé de particules sphériques, on peut obtenir une symétrie cubique, hexagonale compacte (HC) ou cubique à faces centrées (CFC) [16].

### **I.4.3. Facteur de remplissage :**

Le facteur de remplissage dans l'air, noté  $f_{ff}$ , correspond au rapport entre la surface occupée par le motif et la surface totale de la cellule élémentaire du réseau, dans le cas d'un cristal photonique bidimensionnel constitué de trous d'air percés dans une matrice diélectrique [17].

### **I.4.4. Contraste d'indice de réfraction :**

Il s'agit du rapport entre les indices de réfraction des composants et de la matrice. Ce contraste donne une idée générale de la différence de diffusion entre les deux matériaux formant le cristal photonique. Pour une structure unidimensionnelle, le contraste d'indice de réfraction s'exprime par :

$$\delta = n_H / n_L$$

(I-3)

Avec :

$n_H$  : L'indice de réfraction de la couche diélectrique de haut indice.

$n_L$  : L'indice de réfraction de la couche diélectrique de bas indice.

Pour une structure bidimensionnelle, le contraste d'indice est la différence entre les indices du milieu et des motifs [16].

### I.4.5. La Période :

Ce paramètre géométrique, choisis selon le domaine de fréquence étudié, influe sur les caractéristiques de la bande interdite photonique. Par exemple pour un cristal photonique unidimensionnel, la période  $a = (a_1 + a_2)$  avec  $a_1$  l'épaisseur de la couche de permittivité  $\epsilon_1$  et  $a_2$  l'épaisseur de la couche de permittivité  $\epsilon_2$ .

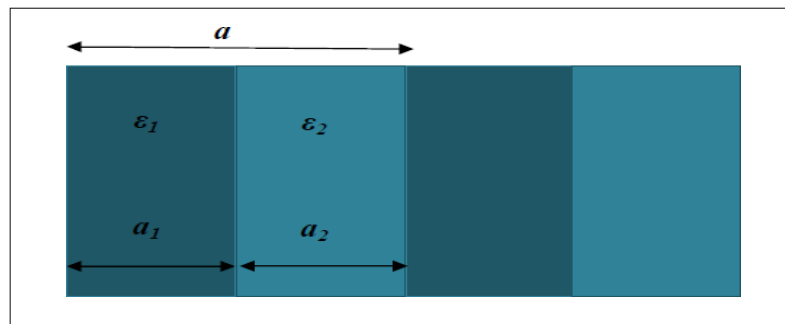


Figure 1.11: Périodes d'un cristal photonique unidimensionnel.

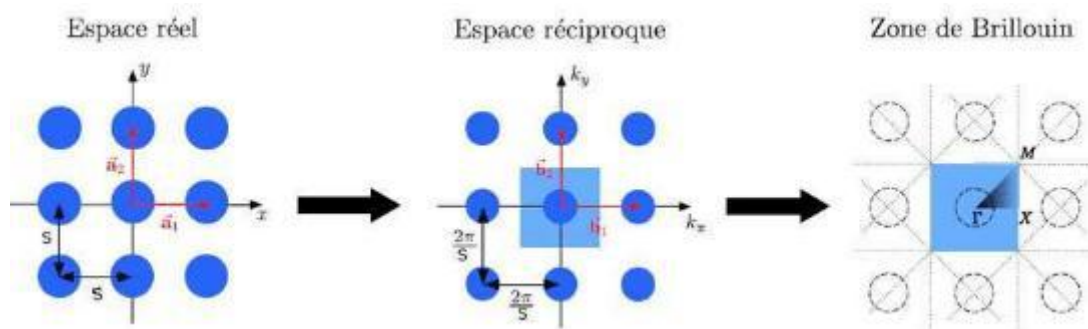
## I.5. La bande interdite photonique :

### I.5.1. La Zone de Brillouin :

Pour calculer les diagrammes de bandes, il est indispensable de considérer toutes les directions possibles de propagation pour chaque cristal. Comme en physique du solide [18], il est prouvé que, pour certaines symétries cristallines, l'étude peut se limiter aux vecteurs d'onde  $\mathbf{k}$  situés dans une région restreinte appelée zone de Brillouin irréductible. Le vecteur  $\mathbf{k}$  se déplace le long des directions de haute symétrie au sein de cette zone, qui fait partie du réseau réciproque.

#### a) Le réseau carré :

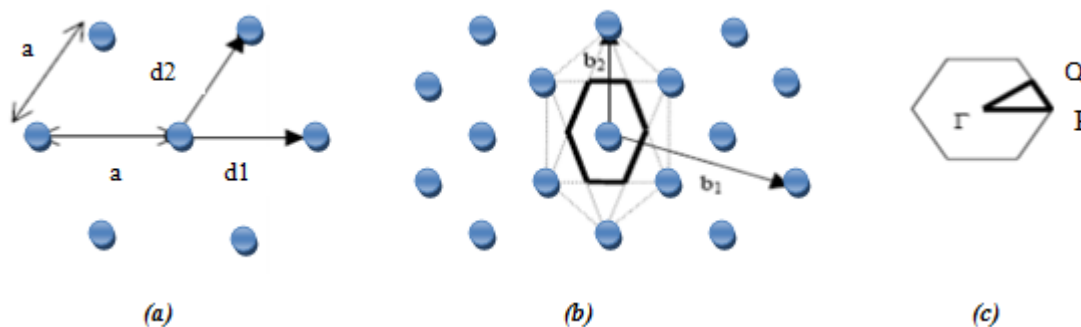
La maille primitive est un carré de côté «  $a$  ». Ce réseau est très sensible à l'angle d'incidence des ondes électromagnétiques. Sa zone de Brillouin est un triangle isocèle [19].



**Figure 1.12:** Représentation a) d'un réseau carré b) de son réseau réciproque et c) de sa zone de Brillouin.

### b) Le réseau triangulaire :

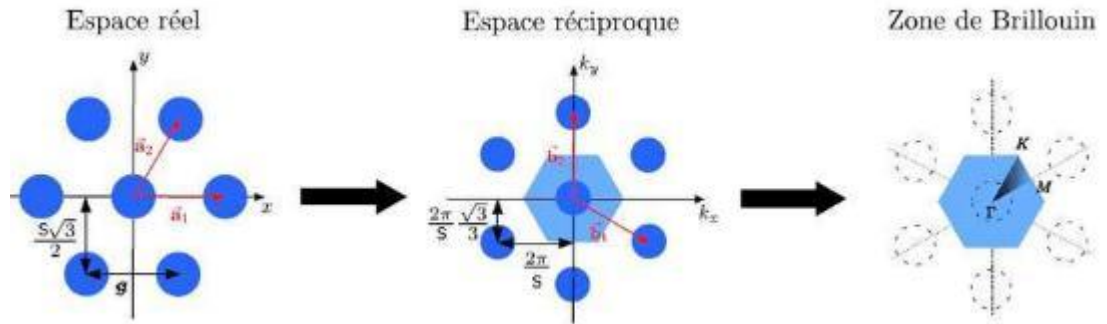
La maille primitive est un triangle équilatéral de côté « a » et la zone de Brillouin est un Hexagone [19].



**Figure 1.13 :** Représentation a) d'un réseau triangulaire b) de son réseau réciproque et c) de sa zone de Brillouin.

### c) Le réseau hexagonal :

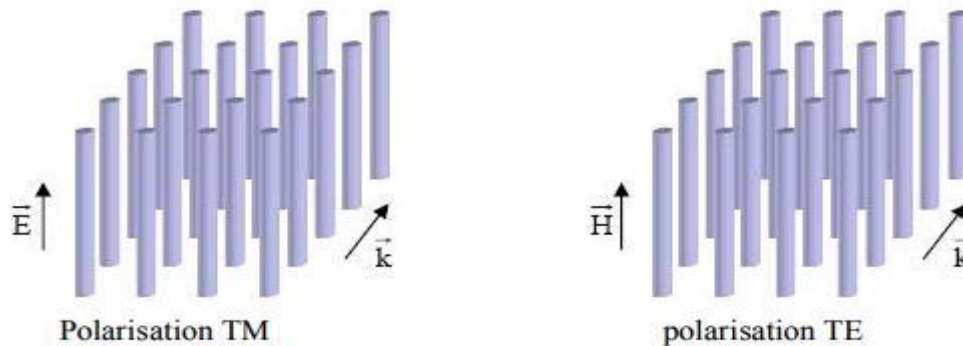
En ôtant quelques motifs au réseau précédent, un réseau hexagonal peut être obtenu, compromis entre les contraintes technologiques et les propriétés des réseaux triangulaires [19].



**Figure I.14:** Représentation a) d'un réseau hexagonal b) de son réseau réciproque et c) de sa zone De Brillouin.

**I.5.2. Diagramme de bandes :**

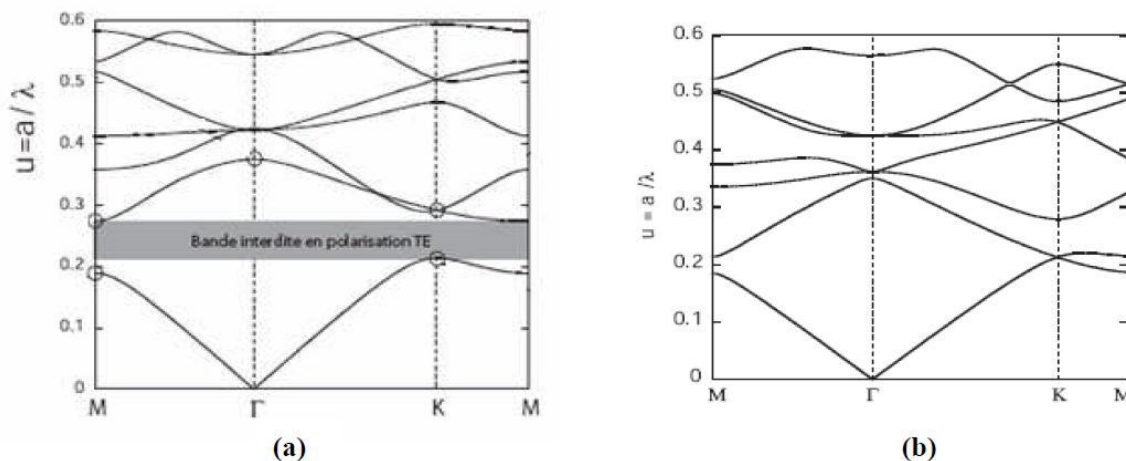
Prenons l'exemple d'un cristal photonique bidimensionnel constitué de tiges. Le calcul du diagramme de bandes de ce cristal fournit des informations sur les propriétés des bandes interdites photoniques, notamment leur position et leur largeur, pour chaque type de polarisation. Lorsque le champ magnétique  $\mathbf{H}$  est parallèle à l'axe des tiges, on parle de polarisation TE. En revanche, lorsque le champ électrique  $\mathbf{E}$  est aligné avec l'axe des tiges, il s'agit de la polarisation TM.



**Figure I.15:** Polarisations possible dans une structure à bande interdite photonique: TM et TE.

Un cristal photonique est caractérisé par sa structure en bandes, exploitée pour le calcul de diagrammes par la méthode de décomposition en ondes planes. Dans ce contexte, le facteur de remplissage  $f=0.30$  et le réseau du cristal photonique adopte une configuration triangulaire. Lors de l'observation de la polarisation TE, une bande interdite est identifiée entre  $u=a/\lambda=0.21-0.27$  (voir figure I.16 (a)). En revanche, pour la polarisation TM, aucune bande interdite n'est présente, comme illustré dans la figure I.16 (b). En effet,

l'ouverture de bandes interdites photoniques TE est plus avantageuse lorsqu'on relie des zones avec un fort indice de réfraction. À l'inverse, la connexion de zones de faibles indices de réfraction, telles que des piliers diélectriques dans l'air, favorise l'émergence d'une bande interdite en polarisation TM. [20]



**Figure 1.16 :** Diagramme de bandes d'un cristal photonique (réseau triangulaire) gravé dans un milieu diélectrique de l'indice de réfraction  $\epsilon_{\text{substrat}} = 11.4$  avec un facteur de remplissage de  $f = 0.30$  : (a) Polarisation TE ; (b) Polarisation TM [7].

## I.6. Les Défauts dans un cristal photonique :

Il existe deux types majeurs de défauts dans les cristaux photoniques : les défauts ponctuels et les défauts étendus. Les défauts ponctuels correspondent à une rupture locale de la périodicité, entraînant l'apparition de modes électromagnétiques à des fréquences discrètes, similaires aux défauts électroniques. Quant aux défauts étendus, comparables aux dislocations, ils peuvent engendrer des bandes de propagation permises dans des zones où, normalement, une bande interdite existerait dans un cristal parfait [17].

### I.6.1. Défauts ponctuels :

Les défauts ponctuels se produisent par la modification des propriétés d'une cellule du réseau. Il existe plusieurs méthodes pour créer ces imperfections temporaires dans les cristaux photoniques. On peut retirer, ajouter ou altérer un ou plusieurs motifs du cristal. Les défauts de type lacunaire ou de substitution sont illustrés dans les figures I.17 et I.18. Dans tous les cas, des cavités optiques se forment, où les modes de résonance se situent énergétiquement dans les bandes interdites du cristal [17].

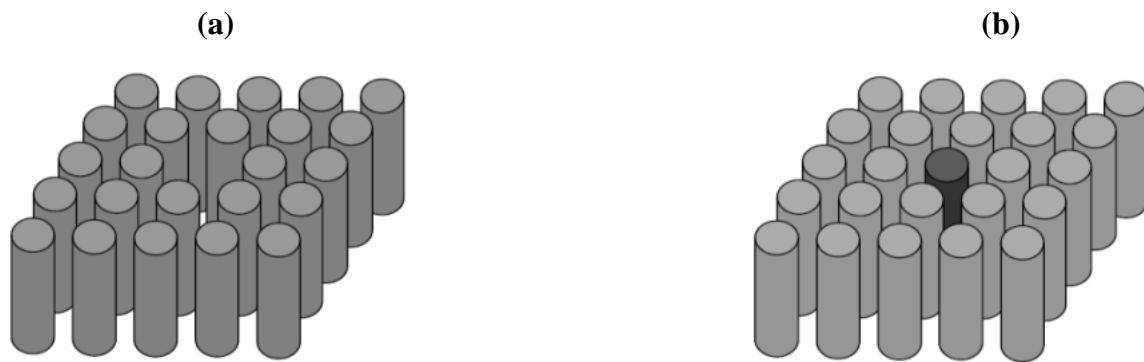


Figure 1.17 : (a) Défaut lacunaire ; (b) Défaut de substitution

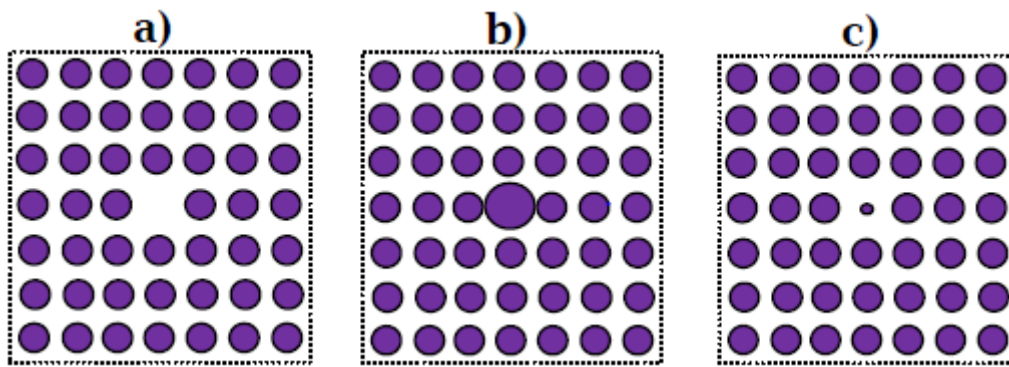
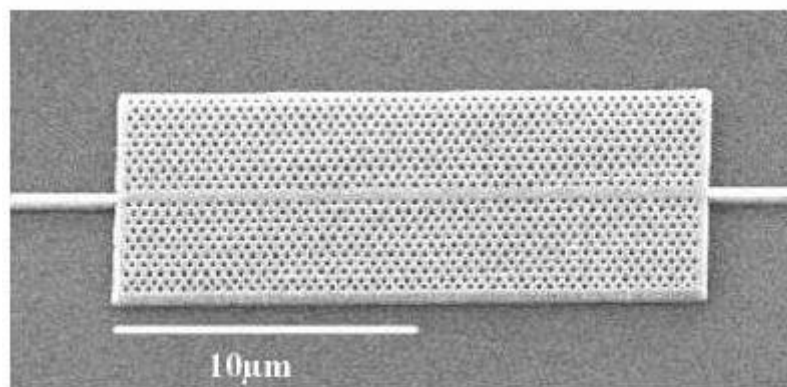
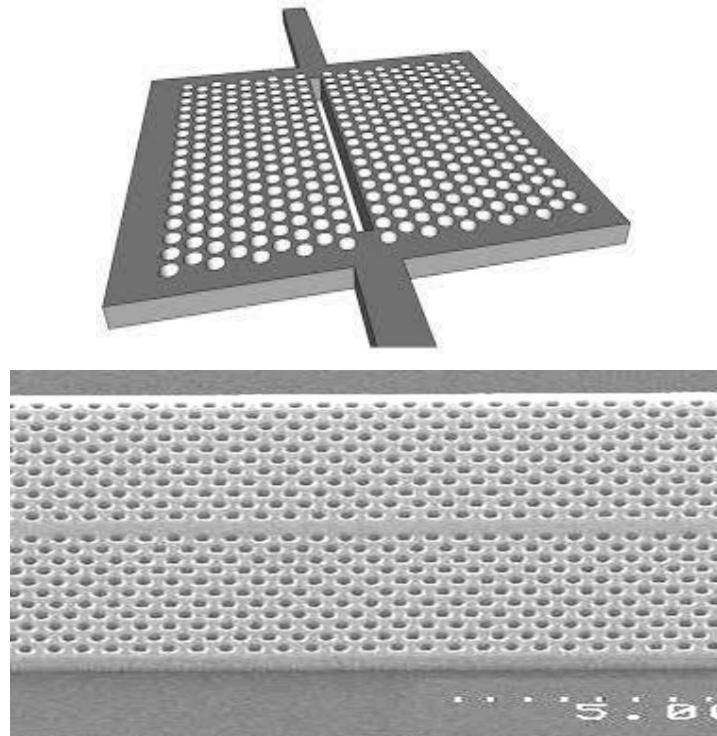


Figure 1.18 : Exemple de défaut lacunaire (a) ; défauts de substitutions (b) et (c).

### I.6.2. Défauts étendus :



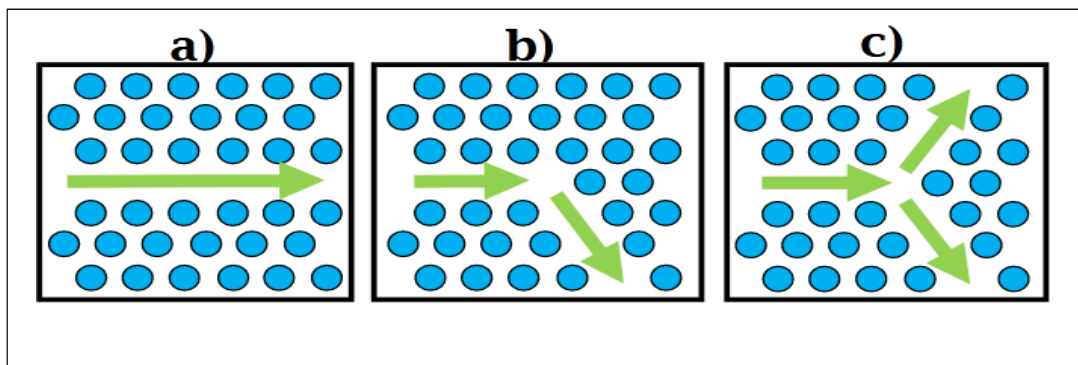


**Figure 1.19** : Exemple de guide W1 à cristal photonique hexagonal de trous d'air sur un substrat de silicium sur isolant [22].

## **I.7. Les applications des cristaux photoniques :**

### **I.7.1. Guides d'onde à cristaux photoniques :**

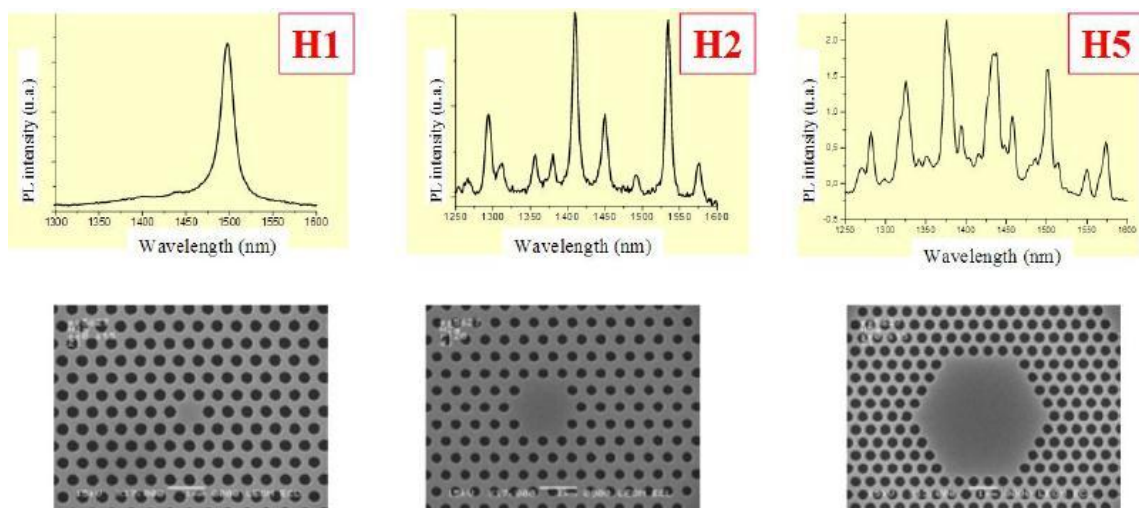
En introduisant un défaut linéaire, c'est-à-dire en supprimant une ou plusieurs rangées de trous dans un cristal photonique, il devient possible de guider la lumière selon une direction spécifique. Si l'énergie du photon se situe dans la bande interdite, celui-ci restera confiné dans le guide. Divers dispositifs peuvent être conçus à partir de ces défauts linéaires (voir figure I.20). La transmission dans ces structures peut être optimisée en ajustant la taille ou la forme des trous au niveau des courbes ou des jonctions, afin de minimiser la perte due au couplage entre le mode guidé et les modes rayonnés au niveau des virages [12].



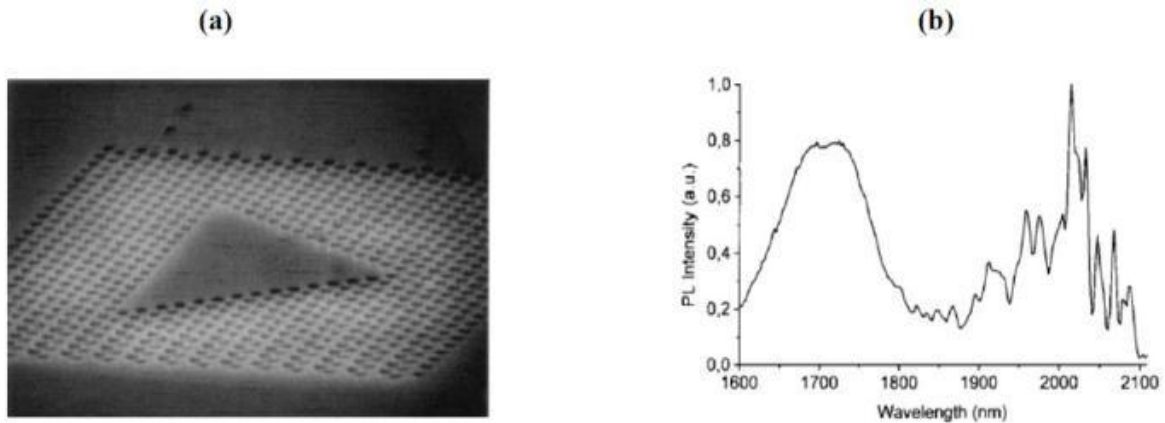
**Figure 1.20** : Différents composants à base de défauts linéaires, a) guide droit, b) virage à 120° et c) jonction Y.

En 1996, les premières cavités utilisant des cristaux photoniques bidimensionnels ont été conçues en introduisant une perturbation dans la structure cristalline photonique. Il a été prouvé que ces cavités possèdent un facteur de qualité élevé pour les modes de résonance, grâce à la réflexion exceptionnelle induite par le cristal. Cette caractéristique est particulièrement marquante dans les cavités de grande taille pouvant supporter plusieurs modes. Les performances sont encore plus impressionnantes pour les cavités suspendues en membrane, isolées dans l'air, et de dimensions très réduites, comme le montrent les figures I.21 et I.22. Dans ces cas, une cavité triangulaire et une cavité hexagonale sont intégrées dans un cristal photonique à structure triangulaire [12].

**Cavités :**



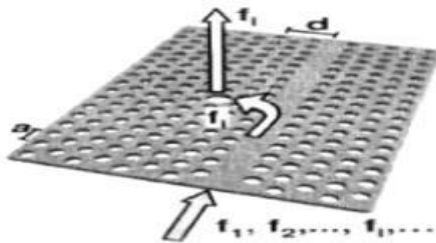
**Figure 1.21** : Signatures spectrales de cavités hexagonales obtenues par photoluminescence [23].



**Figure 1.22 :** (a) Exemple de cavité triangulaire dans un cristal photonique triangulaire avec un paramètre de maille 600nm (b) Spectre de photoluminescence d'une cavité triangulaire dans un cristal photonique triangulaire de trous d'air (Paramètre de maille  $a = 600\text{nm}$ , rayon  $r = 200\text{nm}$ ) plongé dans une matrice diélectrique ( $\epsilon=8.12$ ) [24].

### I.7.2. Filtres et multiplexeurs :

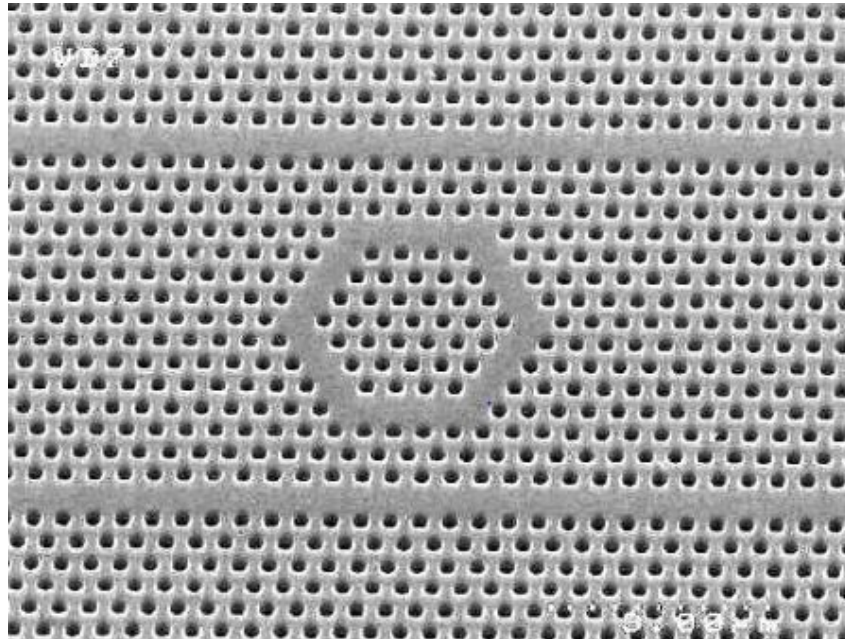
Les cristaux photoniques pourraient être utilisés pour effectuer une fonction d'optique intégrée cruciale : le multiplexage en longueur d'onde (WDM, Wavelength Division Multiplexing). L'objectif consiste à intégrer ou à extraire des longueurs d'onde spécifiques dans un flux de données. On peut concevoir ce dispositif en utilisant l'efficacité d'une cavité résonante associée à des guides d'ondes (voir figure I.23) [25].



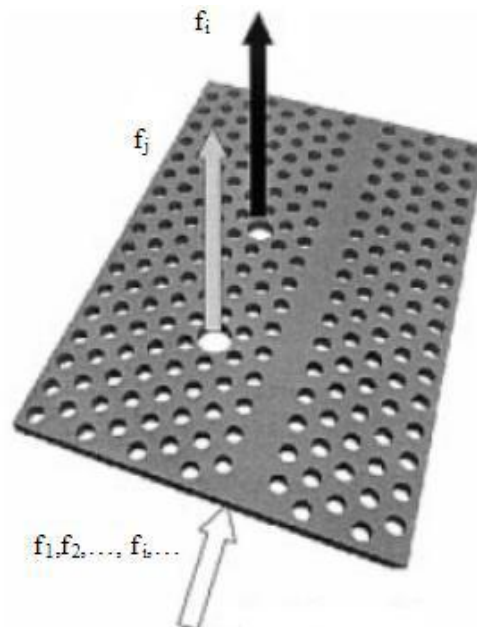
**Figure 1.23:** Schéma de principe d'un dispositif de multiplexage (Insertion ou extraction d'une certaine longueur d'onde).

Il est également possible de réaliser cette fonction dans le plan en utilisant deux guides, comme le montre la Figure I.24. Dans cette situation, il est possible que les longueurs d'onde qui

résonnent dans l'anneau central se rapprochent d'un guide à l'autre. Cependant, le processus de couplage est extrêmement complexe et repose sur la symétrie et la dégradation des modes résonnants. En outre, il est essentiel de contrôler étroitement la taille du défaut (de la cavité résonnante) pour choisir les longueurs d'onde souhaitées [26].



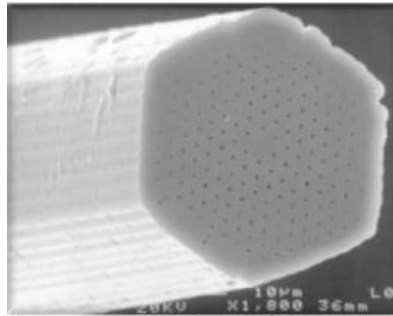
**Figure 1.24 :** Exemple de filtre Add-Drop réalisé sur un substrat SOI. Les longueurs d'onde résonnantes de l'anneau peuvent éventuellement se coupler d'un guide à l'autre.



**Figure 1.25 :** Un principe parmi d'autres de filtre add-drop utilisant les CPs.

### I.7.3. Fibres optiques :

Les fibres optiques à cristaux photoniques ont été introduites en 1996 [27]. Elles ne se composent plus d'un cœur et d'une gaine, ni d'une structure à gradient d'indice, mais d'un cristal photonique avec un défaut qui permet de diriger la propagation lumineuse (voir figure I.30).

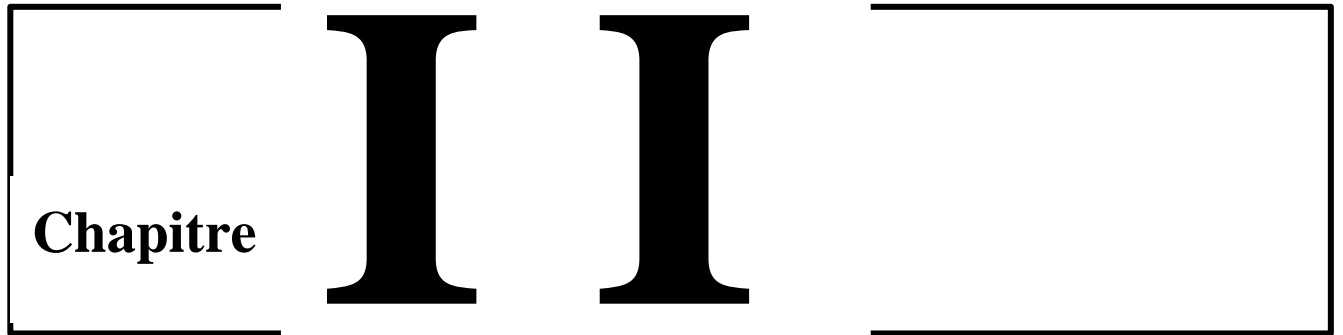


**Figure 1.26:** Image par microscopie électronique d'un prototype de fibre optique conçu sur la base d'un cristal photonique [27].

Les fibres photoniques à cristaux possèdent une conception totalement différente. Elles sont aussi souvent appelées « fibres à trous » ou « fibres microstructurées ». La principale différence réside dans leur fabrication. En empilant soigneusement des tubes de silice, on crée une "préforme" avec la structure désirée : on peut insérer des tubes pleins, creux, ou en omettre certains selon le motif final voulu. Cet assemblage se fait à une échelle macroscopique, avec des tubes d'environ un millimètre de diamètre, facilement manipulables à la main. Ensuite, la préforme est chauffée à une température élevée (environ 1800°C) pour ramollir les tubes de silice, puis étirée afin d'obtenir une version miniaturisée de la structure initiale. Cette technique permet ainsi de produire une grande variété de fibres aux motifs personnalisés [28].

### I.8. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté de façon générale les notions fondamentales relatives aux cristaux photoniques, des matériaux dont l'indice diélectrique varie périodiquement à l'échelle des longueurs d'onde, dans une ou plusieurs directions spatiales. Cette périodicité conduit à la formation de bandes de fréquences interdites à la propagation de la lumière, appelées bandes interdites. Nous avons également étudié en détail les différentes catégories de cristaux photoniques ainsi que leurs propriétés optiques spécifiques. Le chapitre suivant sera consacré aux filtres à cristaux photoniques, où nous mettrons en lumière leurs caractéristiques tout en explorant certains dispositifs exploitant ces cristaux comme éléments essentiels de filtrage.



# Les filtres à cristaux photoniques

## **II.1 Introduction :**

Dans les systèmes photoniques contemporains, le contrôle précis du spectre lumineux est indispensable, notamment dans les domaines des télécommunications, de la détection optique et du traitement de l'information. Les filtres optiques permettent de moduler la lumière selon des critères spécifiques en filtrant certaines longueurs d'onde, ce qui améliore la performance et la sélectivité des dispositifs optiques. Toutefois, les filtres optiques traditionnels présentent des limitations telles qu'une faible intégrabilité, une sélectivité limitée et une sensibilité à l'angle d'incidence. Ces contraintes ont conduit à l'émergence de nouveaux paradigmes, parmi lesquels les cristaux photoniques occupent une place prépondérante.

Les cristaux photoniques, par leur structure périodique d'indice de réfraction, introduisent la possibilité de créer des bandes interdites photoniques dans lesquelles la propagation de la lumière est inhibée. En insérant des défauts dans ces structures, on peut concevoir des filtres optiques extrêmement sélectifs et compacts. Ce chapitre est dédié à l'étude approfondie des filtres à cristaux photoniques, englobant leurs principes fondamentaux, types, méthodes de conception, performances et applications actuelles.

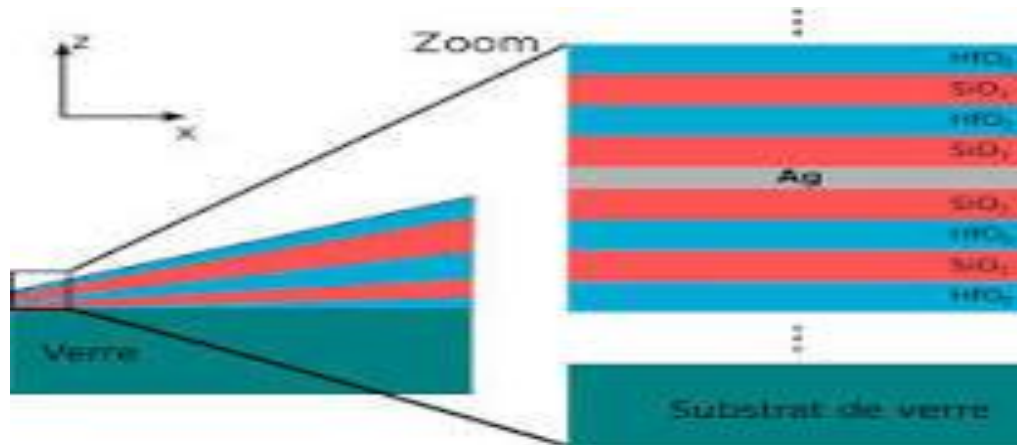
## **II.2 Définition et principe général des filtres optiques :**

Un filtre optique est un composant qui modifie le spectre d'un signal lumineux en sélectionnant ou en bloquant certaines longueurs d'onde. Il fonctionne soit par absorption, réflexion ou interférence, selon le type de filtre utilisé. Trois grandes familles de filtres sont traditionnellement utilisées : les filtres interférentiels, les filtres absorbants et les filtres à réseau.[15]

Les filtres interférentiels utilisent des couches minces pour provoquer des interférences constructives ou destructives, permettant ainsi de sélectionner des longueurs d'onde précises. Les filtres absorbants, quant à eux, reposent sur l'absorption sélective de certaines composantes spectrales par des matériaux spécifiques. Enfin, les filtres à réseau utilisent la diffraction pour séparer les longueurs d'onde.[30]

Cependant, ces technologies conventionnelles souffrent de plusieurs limitations : faible sélectivité spectrale, instabilité face aux variations d'angle ou de température, et difficulté

d'intégration dans des circuits optiques sur puce. C'est ici que les cristaux photoniques se présentent comme une alternative innovante, permettant une meilleure maîtrise de la lumière à l'échelle micrométrique.



**Figure 2. 1.** Filtre interférentielle multicouche

### II.3 Limites des filtres classiques :

Bien que ces filtres soient performants, ils présentent plusieurs limitations qui entravent leur intégration dans les technologies actuelles. D'une part, leur miniaturisation pour une utilisation dans les circuits intégrés reste complexe. D'autre part, leur efficacité est fortement influencée par l'angle d'incidence de la lumière, ce qui peut compromettre leur stabilité en conditions variables. De plus, ils se révèlent sensibles aux variations de température, affectant ainsi leur fiabilité. Ces contraintes ont conduit les chercheurs à explorer des alternatives plus avancées, telles que les filtres à cristaux photoniques, qui offrent des solutions innovantes et mieux adaptées aux exigences de la photonique intégrée.

Un cristal photonique est une structure qui a une répétition régulière (périodique) de matériaux ayant des indices de réfraction différents. Cela signifie que la lumière se propage différemment dans chaque zone du cristal. Cette répétition crée ce qu'on appelle une bande interdite photonique : une plage de longueurs d'onde que la lumière ne peut pas traverser. C'est comme un mur invisible pour certaines couleurs de lumière.[15]

Mais si on modifie légèrement la structure (en créant un défaut), la lumière peut à nouveau passer à travers ce mur, mais seulement pour certaines longueurs d'onde précises. C'est ce principe qui est utilisé pour fabriquer des filtres très sélectifs.

#### **II.4 Apport des cristaux photoniques dans la conception de filtres :**

Les cristaux photoniques sont des matériaux artificiels possédant une périodicité dans leur indice de réfraction, ce qui leur confère la capacité de manipuler la lumière de façon analogue à la manière dont les cristaux atomiques influencent les électrons. Cette périodicité donne naissance à des bandes interdites photoniques, zones du spectre où la propagation de la lumière est interdite.

En introduisant un défaut dans la structure périodique — tel qu'un changement de taille, de position ou d'indice d'un élément — il est possible de créer une cavité résonante ou un canal de propagation qui permet à certaines longueurs d'onde spécifiques de traverser le cristal. Cette capacité à filtrer précisément la lumière selon sa longueur d'onde rend les cristaux photoniques particulièrement adaptés à la conception de filtres optiques à haute performance.[18]

Les principaux avantages de ces filtres incluent leur très faible encombrement, leur haute sélectivité, leur possibilité d'intégration dans des circuits photoniques et leur aptitude à fonctionner à des fréquences très élevées. Ces caractéristiques en font des composants de choix dans les systèmes optiques intégrés.[20]

#### **II.5 Types de filtres à cristaux photoniques :**

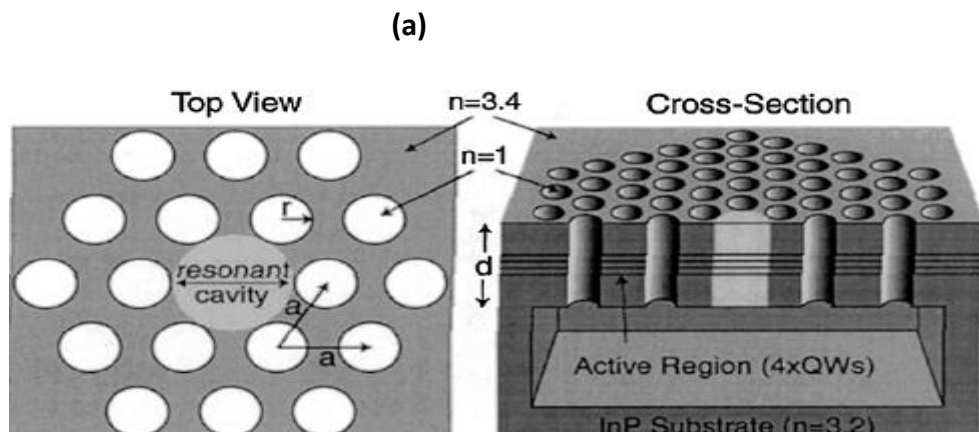
Plusieurs architectures de filtres basées sur les cristaux photoniques ont été développées, chacune exploitant une configuration spécifique de défauts dans la structure périodique. Les plus courantes sont les suivantes :

a) Filtres à résonance (microcavité) Une cavité résonante est créée entre deux régions de cristal photonique. Cette cavité permet la résonance d'une longueur d'onde précise qui est transmise, tandis que les autres sont réfléchies. Ces filtres sont caractérisés par une bande passante étroite et un facteur de qualité élevé.

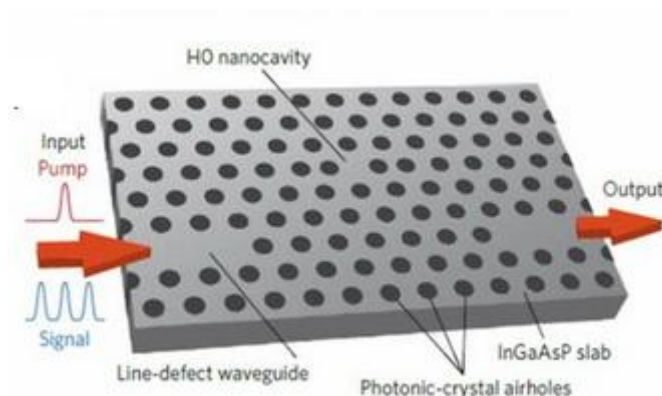
b) Filtres à défauts linéaires (guides d'ondes) Ce type de filtre consiste à supprimer une ligne d'éléments dans le réseau périodique, créant ainsi un canal de propagation guidée. En modifiant la géométrie du guide ou en introduisant des perturbations périodiques, on peut réaliser un filtrage directionnel ou sélectif.

c) Filtres à couplage de guide d'ondes Ils utilisent deux guides d'ondes couplés à travers une cavité ou une région active. Le couplage permet le transfert d'énergie à des longueurs d'onde spécifiques, générant des réponses en passe-bande, passe-bas ou passe-haut selon le design.

d) Filtres à réseau de Bragg En introduisant une modulation périodique de l'indice de réfraction ou de la géométrie dans un guide d'onde, une réflexion constructive se produit pour certaines longueurs d'onde, réalisant un filtre Bragg très efficace.



(b)



**Figure 2.2.** (a) Illustration de la microcavité à cristal photonique, filtre a couplage de guide d'onde

## **II.6 Méthodes d'analyse et de conception :**

La conception d'un filtre à cristal photonique repose sur des méthodes de simulation rigoureuses, car les phénomènes impliqués relèvent de l'électromagnétisme à l'échelle submicronique. Les outils numériques permettant de prédire le comportement spectral d'une structure avant sa fabrication sont :

La méthode des ondes planes pour le calcul des diagrammes de bande et la méthode FDTD, qui est la plus couramment utilisée pour calculer la réponse spectrale d'un dispositif.

### **II.6.1. La méthode des ondes planes :**

La méthode de décomposition en ondes planes PWE (Plane Wave Expansion) est devenue l'un des outils de modélisation les plus utilisés pour les cristaux photoniques [29-30] et est également l'un des premiers formalismes à avoir été utilisés pour mettre en évidence théoriquement l'existence de bandes autorisées photoniques. Il s'agit d'une approche pour résoudre les équations de Maxwell dans le domaine fréquentiel. La décomposition en ondes planes du problème électromagnétique est la base de son fonctionnement. On utilise principalement cette méthode pour étudier les caractéristiques dispersives des matériaux à bandes interdites photoniques et pour évaluer la fréquence, la polarisation, la symétrie et la répartition du champ pour les modes d'une structure photonique [3].

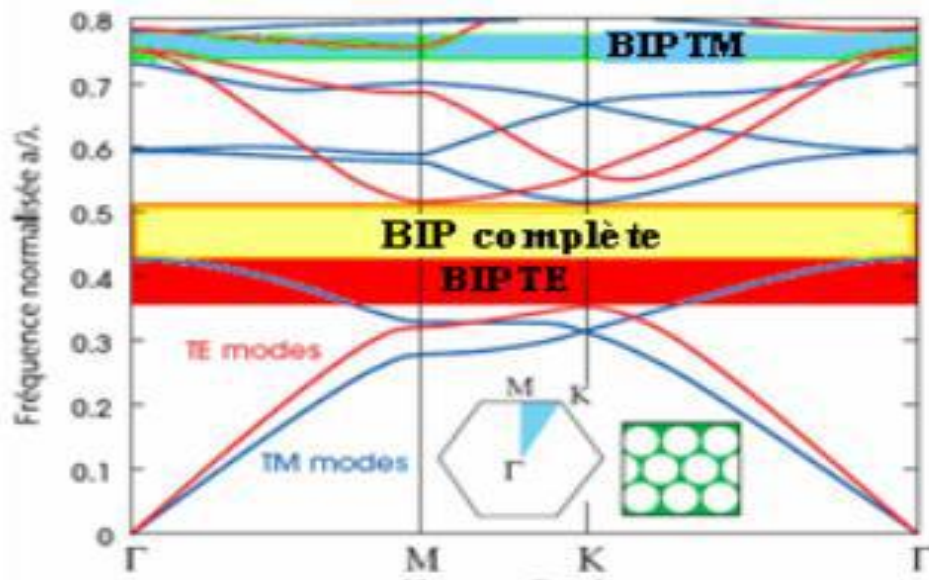
### **II.6.2. La méthode FDTD (Finite Difference Time Domain) :**

En 1966, K. S. Yee a initialement proposé la méthode FDTD (Finite Difference Time Domain) [32]. Il s'agit d'une approche électronique générale qui permet de résoudre les équations de Maxwell sur une structure de profil d'indice donné. La particularité de ce système réside dans sa capacité à résoudre directement le système d'équation dans le domaine temporel plutôt que dans le domaine fréquentiel, ce qui permet de visualiser la propagation d'une onde électromagnétique vers les cristaux photoniques. Cette approche présente un intérêt particulier pour étudier la réponse spectrale d'un système et pour évaluer les distributions de champ dans des structures de dimensions limitées [2].

Le désavantage majeur de la FDTD, qui semble néanmoins diminuer avec l'évolution des capacités informatiques, réside dans sa lenteur et sa nécessité de ressources informatiques considérables car les champs sont calculés à tous les niveaux de la structure et pour tous les cycles de temps. En outre, le calcul peut prendre une durée  $T$  élevée pour des structures résonnantes, et le résultat peut éventuellement varier en fonction de la source et du milieu utilisés.

Paramètres critiques à considérer :

- La constante de réseau ( $a$ ) : distance entre deux éléments périodiques
- Le diamètre des trous ( $r$ ) : influence la largeur de la bande interdite
- Le contraste d'indice ( $\Delta n$ ) : plus il est élevé, plus la bande interdite est marquée
- La géométrie du réseau : carrée, hexagonale ou triangulaire



**Figure 2.3.** Diagramme de dispersion d'un BIP 2D en polarisation TM et TE

## II.7 Caractéristiques de performance des filtres :

Les performances des filtres à cristaux photoniques sont évaluées à partir de plusieurs grandeurs caractéristiques :

- Longueur d'onde centrale ( $\lambda_0$ ) : c'est la longueur d'onde que le filtre laisse passer ou bloque spécifiquement.
- Bande passante ( $\Delta\lambda$ ) : définit la plage spectrale où la transmission est significative.
- Taux de réjection : capacité du filtre à atténuer les longueurs d'onde non désirées, exprimée souvent en décibels (dB).
- Pente de transition : indique la rapidité avec laquelle le filtre passe de la transmission à la réjection.
- Facteur de qualité (Q) : défini comme  $Q = \lambda_0 / \Delta\lambda$ , il évalue la finesse du filtre. Un Q élevé signifie une bonne sélectivité.

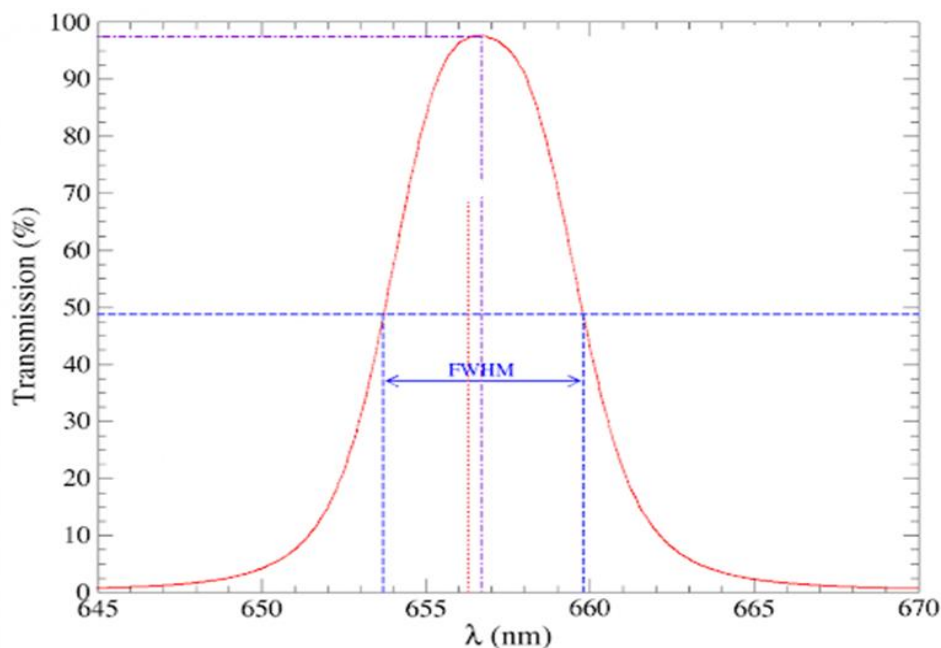


Figure 2.4. Courbe de transmission d'un filtre à cristaux photoniques.

## II.8 Applications des filtres à cristaux photoniques :

Grâce à leur capacité de filtrage précis, de nombreux domaines technologiques bénéficient de l'intégration des filtres à cristaux photoniques :

- Multiplexage en longueur d'onde (WDM) : ces filtres permettent de séparer ou de combiner des canaux optiques selon leur longueur d'onde.
- Capteurs optiques sélectifs : les changements d'indice causés par l'environnement (température, gaz, biomolécules) modifient la réponse du filtre.
- Lasers à cavité intégrée : les microcavités photoniques sont utilisées comme résonateurs pour générer des émissions laser étroites.
- Spectroscopie intégrée : des spectres peuvent être analysés directement sur puce grâce à ces filtres.
- Traitement optique du signal : les filtres permettent de réaliser des opérations de filtrage spectral directement dans le domaine optique.

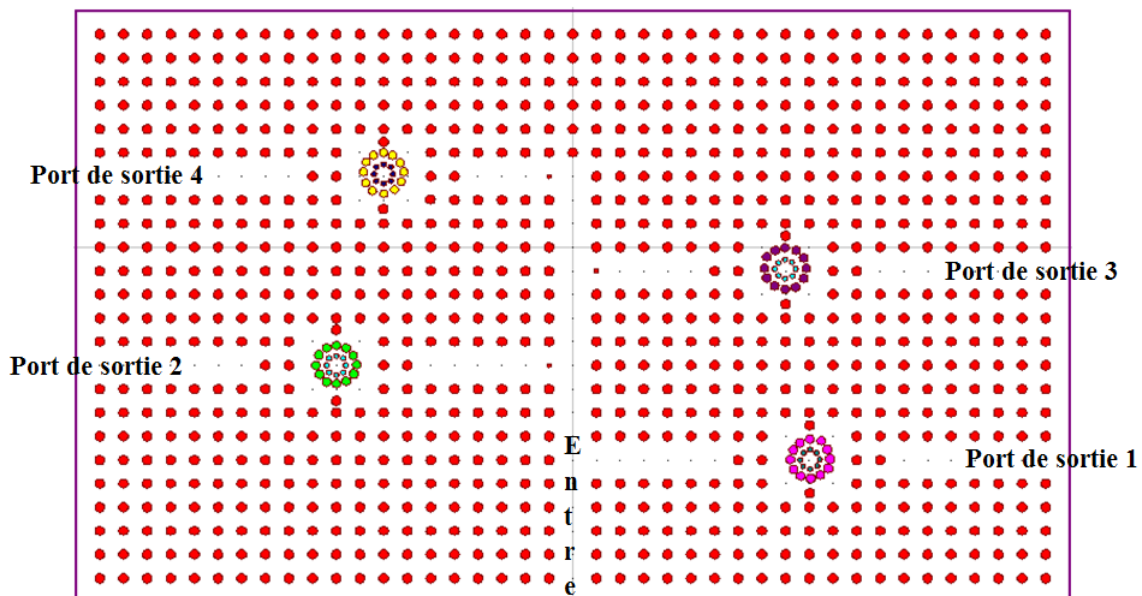


Figure 2.5 : Structure du démultiplexeur à base de résonateurs.

## II.9 Conclusion :

Les filtres à cristaux photoniques représentent une avancée majeure dans le domaine des composants optiques. Grâce à leur bande interdite et leur forte sélectivité spectrale, ils permettent de concevoir des dispositifs compacts, performants et parfaitement intégrables dans des circuits photoniques modernes.

Ce chapitre a permis d'exposer les principes fondamentaux des filtres à cristaux photoniques, leurs différentes architectures, les méthodes de simulation utilisées pour leur conception ainsi que les domaines d'application actuels. Les concepts présentés ici serviront de base solide pour aborder dans le chapitre suivant la simulation numérique détaillée d'un filtre à cristal photonique en utilisant le logiciel RSoft, en mettant en œuvre les approches et méthodes évoquées précédemment.

**Chapitre III**

**RESULTATS DE LA SIMULATION**

### III.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons la démarche adoptée pour concevoir, modéliser et simuler un filtre optique basé sur une structure à cristaux photoniques. Ces structures périodiques offrent des propriétés optiques remarquables, notamment la possibilité de créer des bandes interdites photoniques dans lesquelles la propagation de la lumière est interdite pour certaines longueurs d'onde. En introduisant un défaut localisé dans cette périodicité, il devient possible de guider ou de filtrer sélectivement certaines fréquences lumineuses.

Nous utilisons dans cette étude le logiciel RSoft, reconnu pour sa puissance dans la modélisation des dispositifs photoniques en régime temporel. L'objectif est de concevoir un filtre optique passe-bande performant, basé sur une structure bidimensionnelle en silicium, et d'analyser son comportement à travers une série de simulations numériques.

Avant de présenter les résultats de simulation de notre filtre photonique, nous introduisons dans ce chapitre l'outil de simulation utilisé, ainsi que les principales méthodes numériques sur lesquelles il repose.

### III.2. Présentation de l'outil de simulation :

Dans le cadre de la modélisation de structures photoniques, divers logiciels de simulation sont disponibles. Pour notre étude, nous avons opté pour RSoft CAD, un outil reconnu pour sa puissance et sa polyvalence dans la conception de dispositifs photoniques.

Ce logiciel se compose de plusieurs modules, mais nous avons principalement utilisé deux d'entre eux :

- BandSolve, basé sur la méthode d'expansion en ondes planes (Plane Wave Expansion, PWE),
- FullWAVE, qui repose sur la méthode des différences finies dans le domaine temporel (Finite-Difference Time-Domain, FDTD).

Ces modules ont été employés pour concevoir et analyser des composants photoniques périodiques tels que les guides d'ondes et les cavités.

### **III.2.1. Définition du simulateur RSoft CAD :**

RSoft CAD est le module principal de la suite logicielle RSoft Photonics. Il joue un rôle central dans la conception et la simulation de structures photoniques à l'échelle nanométrique, comme les guides d'ondes et les cavités résonantes. Ce logiciel comprend plusieurs modules spécialisés, parmi lesquels : FullWAVE : pour les simulations basées sur la méthode FDTD, BandSolve : pour l'analyse des bandes photoniques à l'aide de la méthode PWE, GratingMOD, BeamPROP, LaserMOD et DiffractMOD : qui répondent à d'autres besoins spécifiques dans la photonique.

### **III.2.2. Fenêtre principale du simulateur RSoft-CAD :**

L'interface principale du logiciel RSoft-CAD est organisée de manière intuitive. Elle comprend :

1. Une barre de menus située en haut de l'écran, donnant accès aux fonctions de base telles que l'ouverture, l'enregistrement et l'édition des fichiers.
2. Une barre d'outils avec des icônes facilitant les opérations courantes de conception.
3. Une barre d'état positionnée en bas, fournissant des informations utiles en temps réel.
4. Une barre d'outils latérale à gauche, contenant des outils de sélection, de zoom, ainsi que des éléments structurels à insérer dans la conception.

Enfin, des icônes supplémentaires permettent de lancer les simulations et d'accéder à leurs paramètres voir figure 3.1.

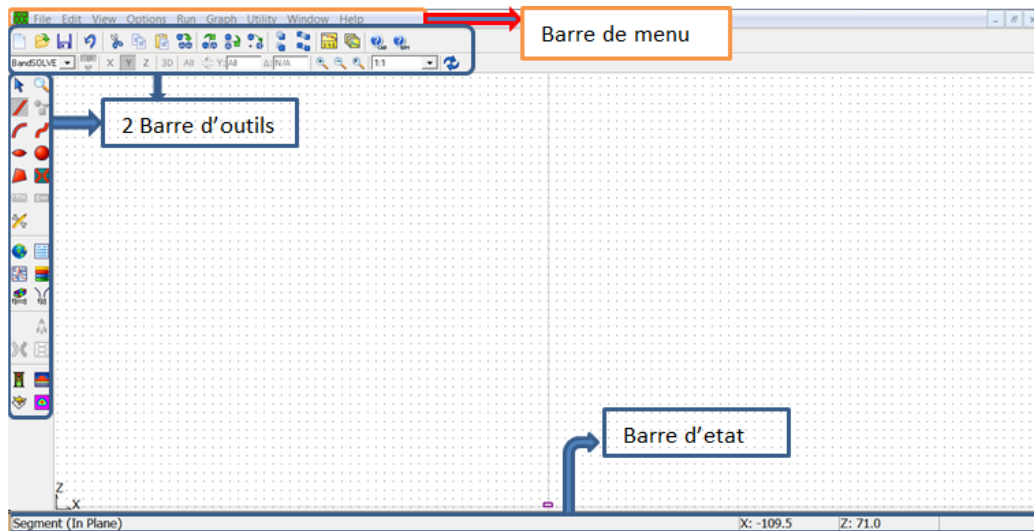


Figure 3.1 : Fenêtre principale du simulateur Rsoft- CAD

### III.2.3. Modules de simulation associés :

Le logiciel RSoft CAD comprend plusieurs modules de simulation, chacun dédié à un type d'analyse particulier. Dans le cadre de notre étude, deux modules ont été utilisés : BandSolve et FullWAVE.

#### III.2.3.1. Le module BandSolve :

Le module BandSolve est destiné à la modélisation des structures périodiques, notamment pour l'analyse des bandes interdites photoniques. Il utilise la méthode des ondes planes (Plane Wave Expansion, PWE).

Cette méthode permet de calculer avec précision les diagrammes de bande de structures photoniques parfaites (avec ou sans défauts), aussi bien en 2D qu'en 3D. Elle donne accès à la visualisation graphique des modes de polarisation TE (transverse électrique) et TM (transverse magnétique), et permet d'analyser en détail le comportement dispersif des structures voir figure 3.2.

La (Figure 3.3) représente un exemple d'un diagramme de bande d'une structure bidimensionnelle pour les deux modes de polarisations : les modes électriques TE en bleu et magnétique TM en rouge.

### a) Les modes de polarisation :

Dans les cristaux photoniques bidimensionnels, les champs électromagnétiques peuvent être analysés selon deux types de polarisation :

TE (Transverse Électrique) : le champ électrique est orienté perpendiculairement au plan d'étude, c'est-à-dire hors de l'écran.

TM (Transverse Magnétique) : le champ électrique est contenu dans le plan de l'écran.

Ces deux types de polarisation influencent différemment la formation des bandes interdites dans la structure.

### b) La méthode des ondes planes (PWE) :

La méthode PWE est une approche fréquentielle pour résoudre les équations de Maxwell. Elle repose sur la décomposition du champ électromagnétique en une somme d'ondes planes. Cette méthode permet de : calculer les fréquences des modes propres, identifier leur polarisation et leur symétrie, analyser la répartition spatiale des champs dans la structure. Elle est particulièrement efficace pour les structures périodiques, car elle offre des résultats très précis concernant les propriétés dispersives. C'est pourquoi elle est souvent utilisée pour étudier les bandes interdites photoniques.

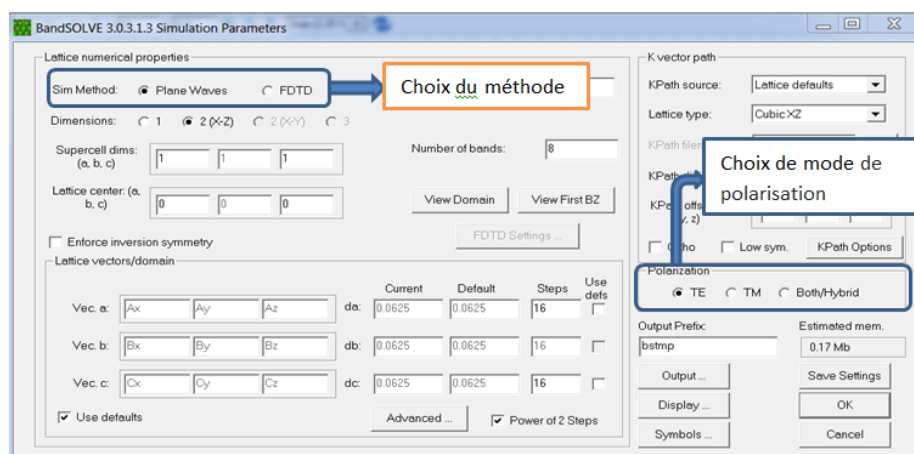


Figure 3.2 : Fenêtre principale de Bandsolve.

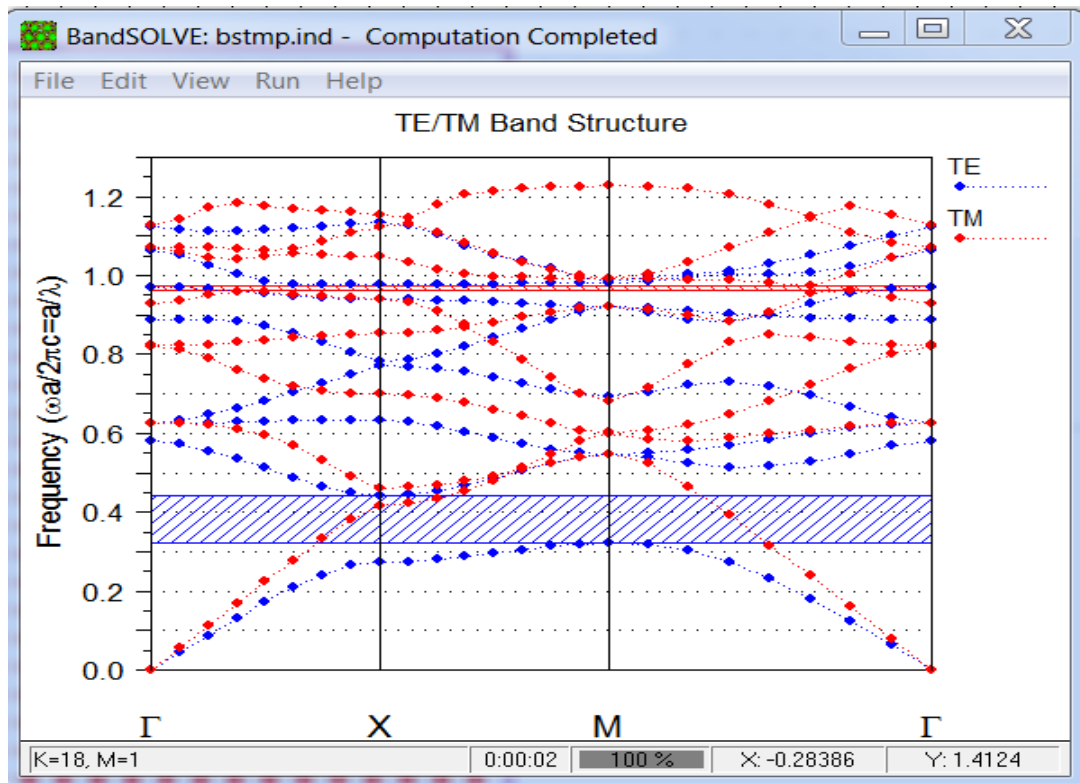


Figure 3.3 : Diagramme de bande d'une structure carrée 2D.

### III.2.3.2. Le module Fullwave :

Le module FullWAVE fait partie de la suite RSoft et repose sur la célèbre méthode FDTD (Finite-Difference Time-Domain), qui permet d'analyser le comportement électromagnétique des structures en fonction du temps et de l'espace. Cette méthode est parfaitement adaptée à l'étude de la propagation de la lumière dans des structures complexes telles que les cristaux photoniques, notamment lorsqu'elles présentent des irrégularités ou des défauts.

La méthode FDTD a été introduite par Kane S. Yee en 1966. Elle consiste à discrétiser à la fois le temps et l'espace pour résoudre numériquement les équations de Maxwell. Cette approche présente plusieurs avantages :

- Elle est capable de simuler des structures avec fort contraste d'indice, comme les cristaux photoniques.

Elle permet d'obtenir une visualisation dynamique des champs électromagnétiques.

Cependant, elle a aussi quelques inconvénients :

1. Elle requiert une grande quantité de mémoire, surtout pour les structures tridimensionnelles.
2. Elle peut être lente à exécuter, ce qui justifie notre choix de travailler principalement avec des structures bidimensionnelles.

Grâce à la méthode FDTD, FullWAVE permet de suivre l'évolution temporelle des champs électromagnétiques dans toute la structure, ce qui en fait un outil précieux pour analyser la réponse d'un dispositif à une excitation donnée.

La (Figure 3.4) représente la fenêtre principale de module Fullwave avec ces différents paramètres de simulation

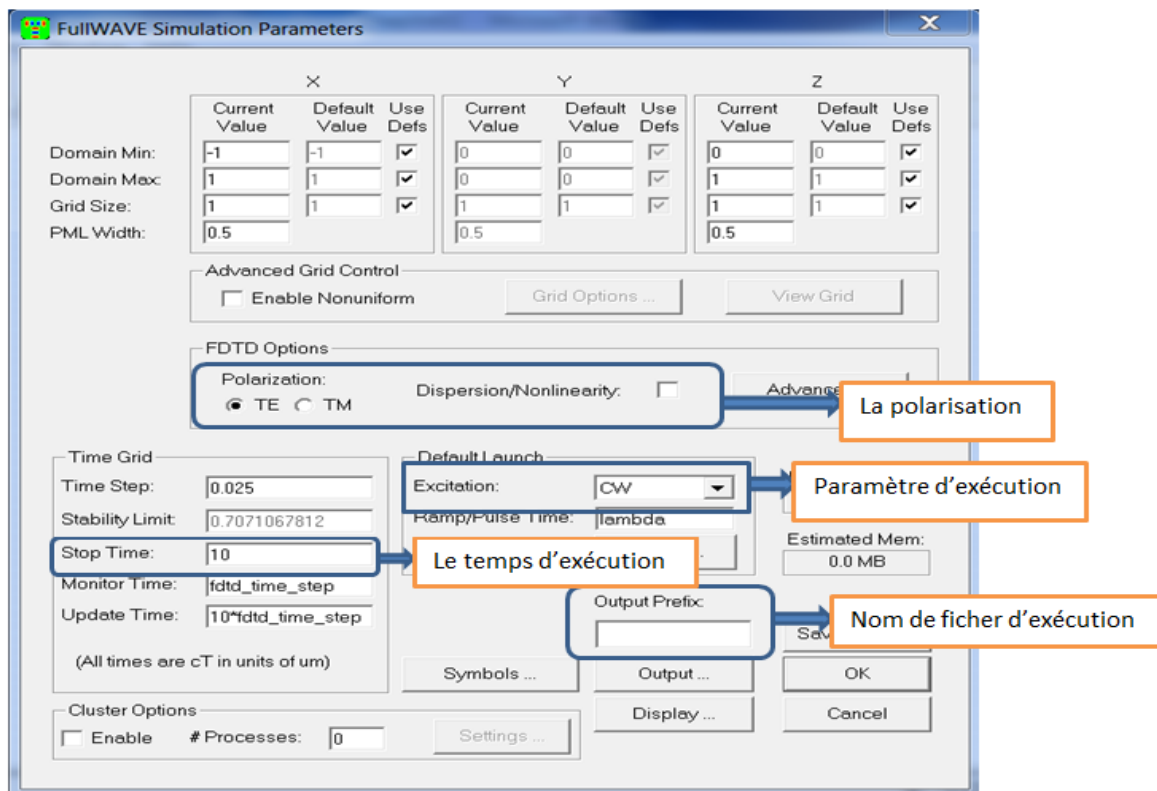


Figure 3.4 : fenêtre principale des paramètres de simulation Fullwave.

### III.2.4. Les étapes de simulation :

La simulation d'une structure dans RSoft CAD se déroule en plusieurs étapes essentielles. Chacune d'elles permet de concevoir, paramétrer et analyser un composant photonique, depuis la création géométrique jusqu'à l'obtention des résultats simulés.

#### III.2.4.1. Création d'une nouvelle structure :

Dès l'ouverture du logiciel RSoft CAD, une fenêtre principale s'affiche. Elle contient les menus nécessaires à la modélisation, notamment une barre d'état, une barre d'outils et des options de configuration, Voir figure 3.5.

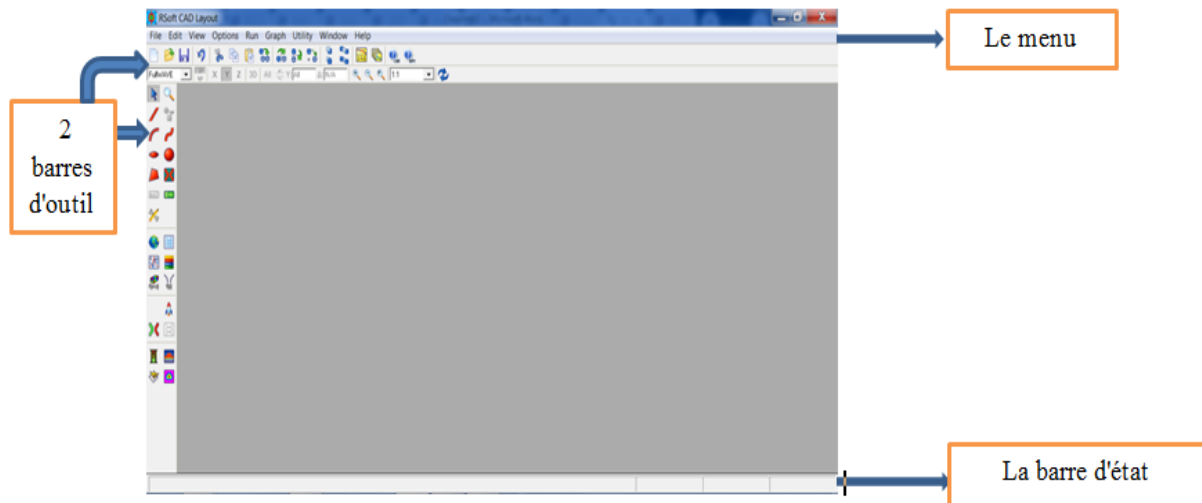


Figure 3.5. Fenêtre du programme de CAD principal.

#### a) Création de la structure :

Pour concevoir une nouvelle structure : Il faut accéder au menu "Utility", puis sélectionner "Array Layout Generator". Ce module permet de définir : le type de réseau (carré, hexagonal, etc.), sa taille, et la dimension (1D, 2D ou 3D) de la structure. Une fois les paramètres choisis, la structure du cristal photonique apparaît dans la fenêtre de travail. C'est la première étape vers la simulation, voir figure 3.6.

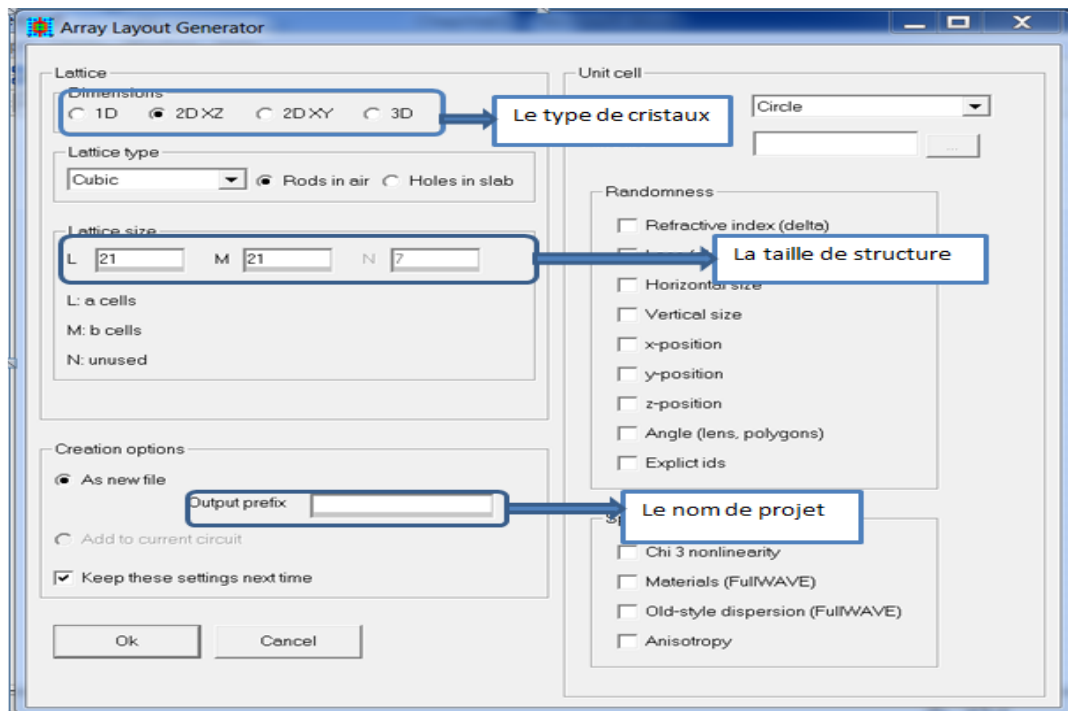


Figure 3.6: Fenêtre Array Layout Generator du logiciel rsoft CAD.

**b) Définition des variables :**

Après avoir généré la structure, on définit les paramètres nécessaires à la simulation : Cela se fait via la fenêtre "Edit Symbols", Où l'on saisit les valeurs des variables physiques comme : l'indice de réfraction, le rayon des tiges, la période du réseau, etc. Ces données sont cruciales pour que la simulation reflète fidèlement le comportement attendu, comme le montre la figure 3.7.

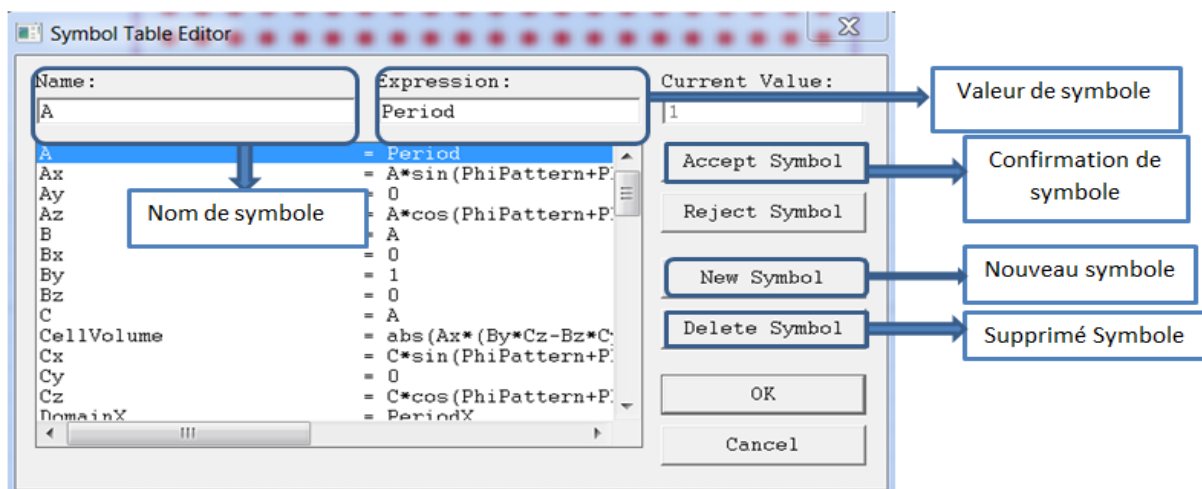
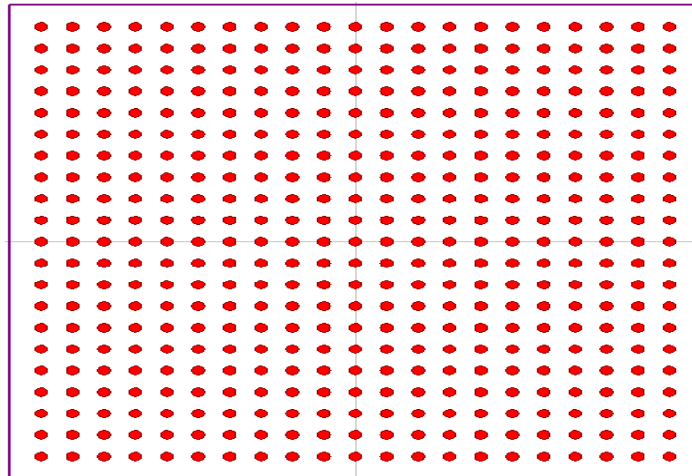


Figure 3.7 : Fenêtre de déclaration des variables.

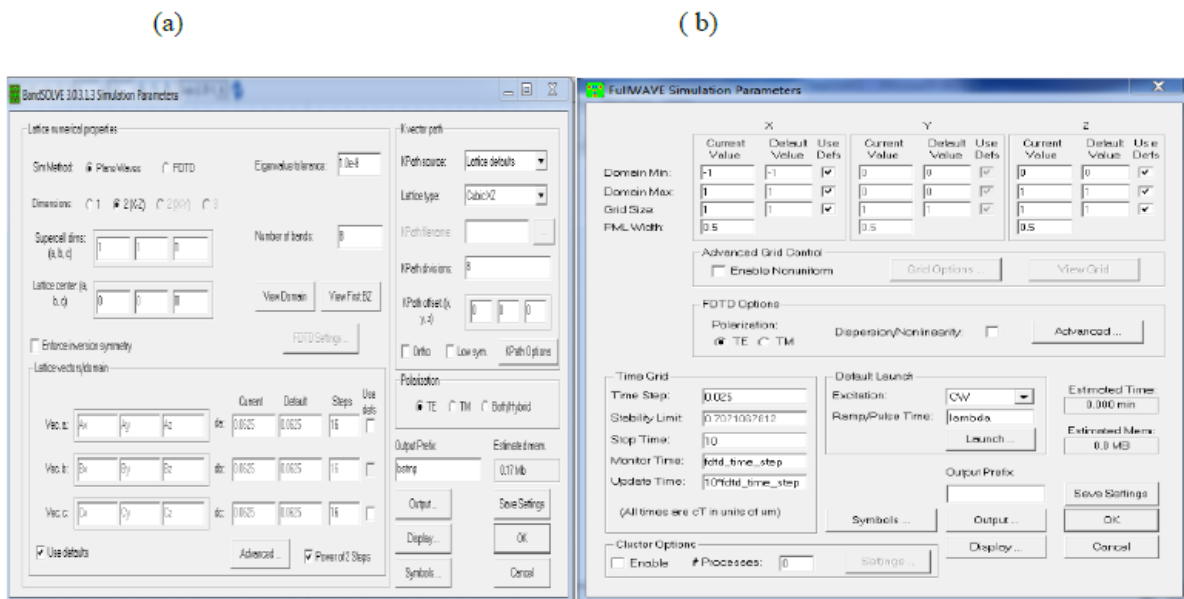
Après la définition des différents paramètres adéquats, nous obtenons la structure du cristal photonique apparaissant dans la Figure 3.8.



**Figure 3.8 :** La structure affichée dans rsoft CAD.

**c) Simulation de la structure :**

Pour lancer la simulation : Il suffit de cliquer sur "Perform Simulation", une icône située à gauche de l'interface. Cette action permet de : choisir le type de polarisation (TE ou TM), définir la source d'excitation, ajuster les dimensions de la cellule élémentaire, et fixer l'épaisseur de la couche PML (Perfectly Matched Layer), utilisée pour absorber les ondes à la frontière de la simulation, comme illustré à la figure 3.9.



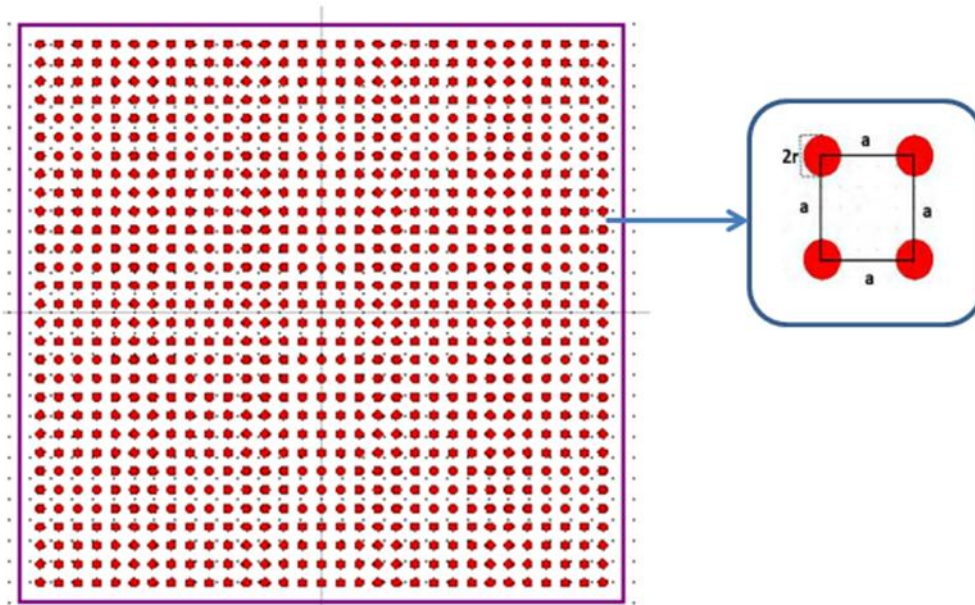
**Figure 3.9 :** a) Fenêtre « simulation paramètres » du module bandsolve b) Fenêtre « simulation paramètres » du module Fullwave.

### III.3 Méthodologie de conception du filtre :

#### III.3.1 Choix des paramètres structurels :

La structure étudiée est un cristal photonique bidimensionnel constitué d'un réseau carré de tiges d'silicium ( l'indice de réfraction  $n = 3.45$ ) immergées dans un l'air présentant un indice de réfraction de  $n = 1$ . La périodicité du réseau, notée  $a$ , est fixée à  $0,45 \mu\text{m}$ , comme le montre la figure 3.10. Le rayon des tiges d'air est de  $0,1 \mu\text{m}$ , soit 22 % de la période, ce qui permet une bande interdite bien définie pour les ondes de polarisation transverse électrique (TE) voir figure 3.11.

La structure étudiée comprend 31 rangées sur 30 colonnes, formant une matrice 2D de 930 tiges au total. Ce choix offre un bon compromis entre la précision de la simulation et le temps de calcul, tout en permettant l'introduction d'un ou plusieurs défauts localisés dans la matrice.



**Figure 3.10.** Représentation schématique de la structure bidimensionnelle à cristaux photoniques proposée

### III.3.2 Étude de l'influence de la périodicité sur les bandes interdites :

Dans le but de concevoir un filtre à cristaux photoniques performant, basé sur une structure à tiges de silicium dans l'air selon un réseau carré de  $31 \times 30$ , nous avons étudié l'effet du paramètre de périodicité  $a$  sur les bandes interdites photoniques, tout en maintenant un rayon de tiges constant  $r=0,1 \mu\text{m}$ . Les résultats de simulation révèlent une évolution significative des bandes interdites selon la valeur de  $a$ .

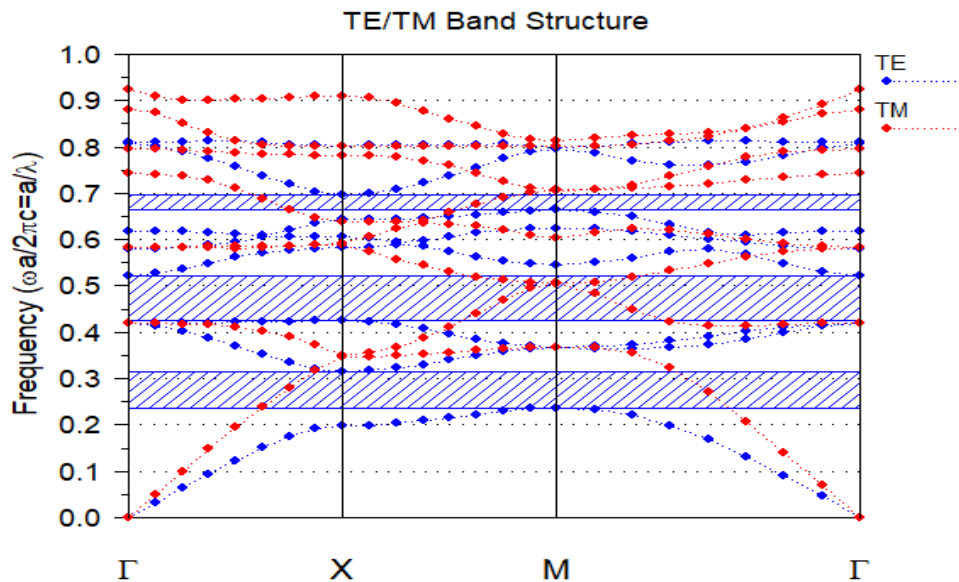
Pour  $a=0,35 \mu\text{m}$ , trois bandes interdites sont observées :  $\text{TE}_1 = [1.7241 - 1.1221] \mu\text{m}$ ,  $\text{TE}_2 = [0.8280 - 0.6707] \mu\text{m}$ , et  $\text{TE}_3 = [0.5265 - 0.5023] \mu\text{m}$ , ce qui indique une structure potentiellement utile pour des applications multibandes.

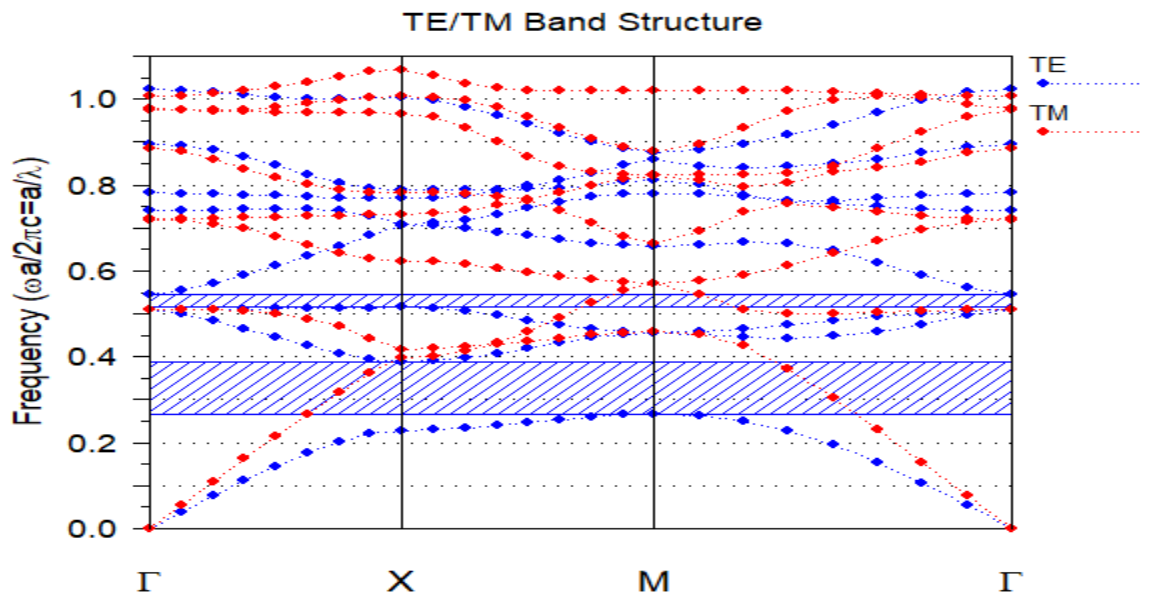
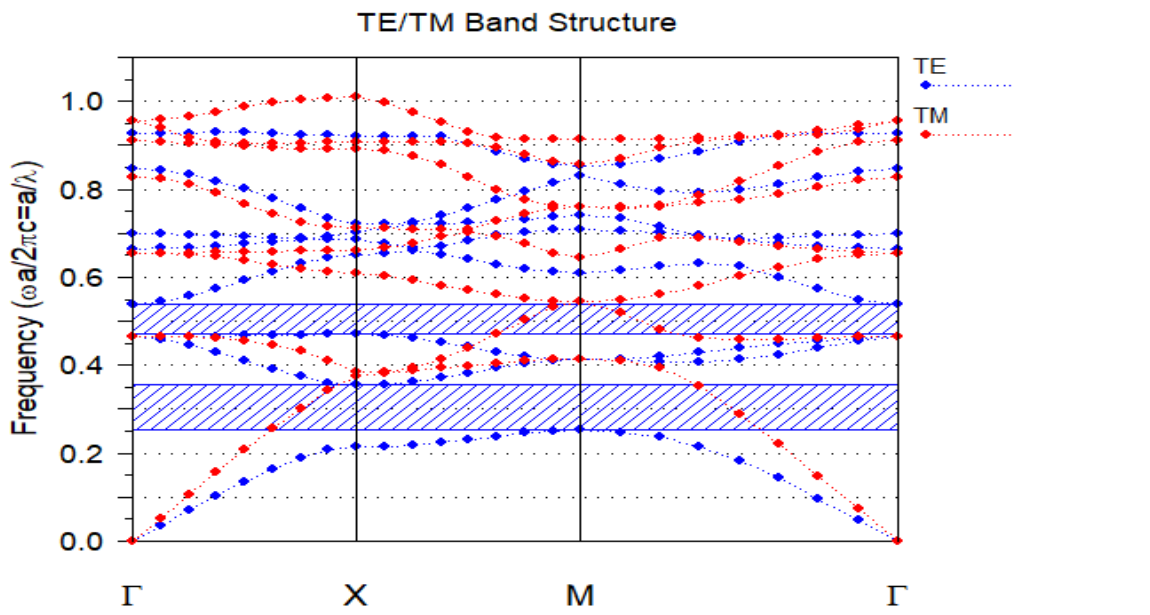
À  $a=0,4 \mu\text{m}$ , deux bandes subsistent :  $\text{TE}_1 = [1.6200 - 1.1444] \mu\text{m}$  et  $\text{TE}_2 = [0.8543 - 0.7425] \mu\text{m}$ .

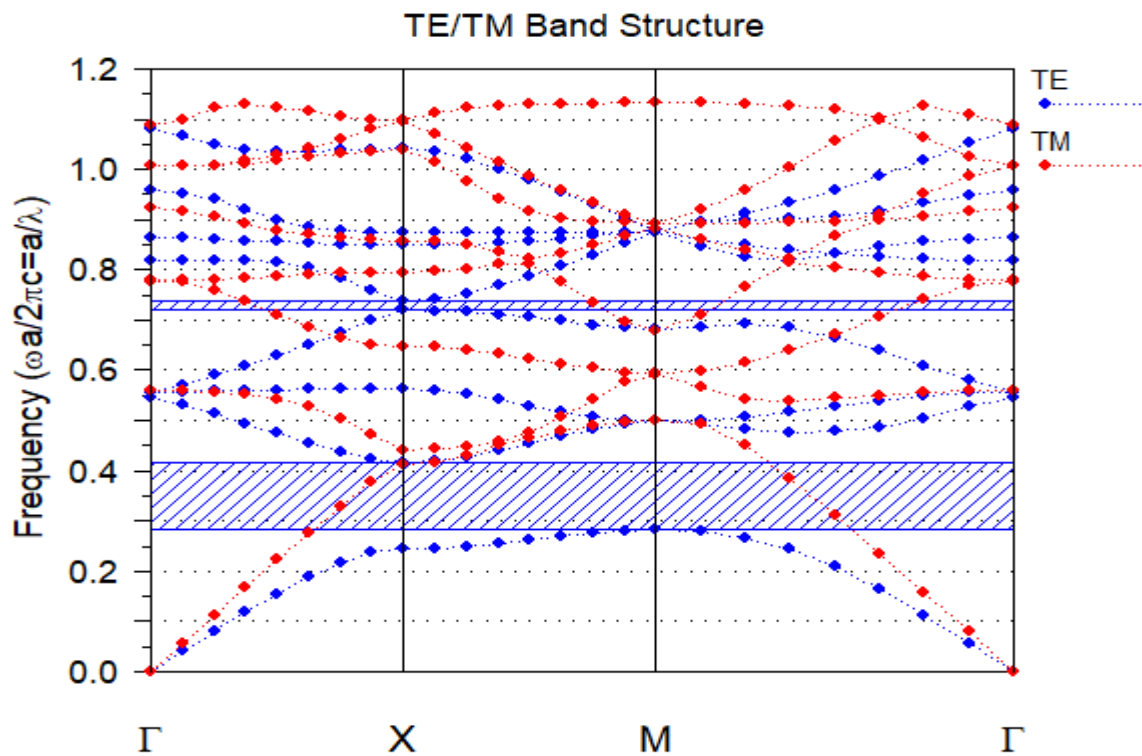
En augmentant à  $a=0,45 \mu\text{m}$ , les bandes se décalent vers des longueurs d'onde plus grandes :  $\text{TE}_1 = [1.7327 - 1.1597] \mu\text{m}$  et  $\text{TE}_2 = [0.8825 - 0.8302] \mu\text{m}$ .

Enfin, pour  $a=0,5 \mu\text{m}$ , la bande  $\text{TE}_1$  continue de s'élargir ( $[1.8518 - 1.2195] \mu\text{m}$ ), tandis que  $\text{TE}_2$  devient étroite ( $[0.7042 - 0.6849] \mu\text{m}$ ), indiquant une perte d'efficacité dans cette bande.

L'analyse met en évidence une tendance claire : l'augmentation de  $a$  induit un décalage spectral (effet de redshift) des bandes interdites, avec un élargissement significatif de TE1. Toutefois, une valeur trop élevée de  $a$  réduit l'intérêt de TE2. Ainsi, la structure avec  $a=0,45 \mu\text{m}$  représente un compromis optimal : elle offre une bande TE1 large, bien positionnée dans l'infrarouge proche, ainsi qu'une bande TE2 exploitable. Ce positionnement spectral est particulièrement favorable pour des applications en télécommunications optiques et en détection biomédicale. Le choix de cette valeur garantit donc un filtrage efficace, une bonne sélectivité spectrale et une structure compacte.







**Figure 3.11.** Schéma du diagramme de bandes de la structure cristalline photonique bidimensionnelle proposée pour  $a=0.35, 0.4, 0.45, 0.5$  respectivement.

### III.4 Conception du filtre résonant à cristaux photoniques :

Le filtre à cristaux photoniques étudié a été modélisé à l'aide du logiciel RSoft, sur la base d'une structure périodique bidimensionnelle composée de tiges en silicium dans l'air, selon un réseau carré de  $31 \times 30$  tiges. Cette structure intègre deux guides d'ondes latérales ainsi qu'une cavité centrale en forme de losange, formant un dispositif de résonance conçu pour le filtrage sélectif de certaines longueurs d'onde, voir figure 3.12.

Les guides optiques d'entrée et de sortie sont réalisés par la suppression de douze tiges consécutives de chaque côté de la structure : 12 tiges à l'entrée (côté gauche), et 12 tiges à la sortie (côté droit). Ces ouvertures forment deux canaux optiques bien alignés, permettant à la lumière de se propager efficacement tout en étant confinée verticalement par les tiges restantes du cristal photonique.

Au centre de la structure, la cavité de résonance est obtenue par la suppression de 18 tiges, créant une forme géométrique losangique parfaitement symétrique. Cette configuration favorise le confinement du champ électromagnétique et génère des modes résonants bien localisés dans cette zone. Autour de la cavité, 14 tiges existantes ont été désignées avec des rayons spécifiques, formant la forme losange visible : 10 tiges noires, de rayon  $r_1$ , réparties symétriquement sur les côtés du losange. Elles jouent un rôle central dans l'ajustement de la résonance et le contrôle du confinement du champ. 4 tiges jaunes, de rayon  $r_2$ , positionnées aux quatre coins du losange. Elles permettent de modifier localement l'indice effectif et d'affiner la sélectivité du filtre.

Cette configuration aboutit à une cavité compacte et bien définie, clairement identifiable par sa forme losange, et efficacement couplée aux deux guides d'ondes grâce à une continuité géométrique et optique optimisée.

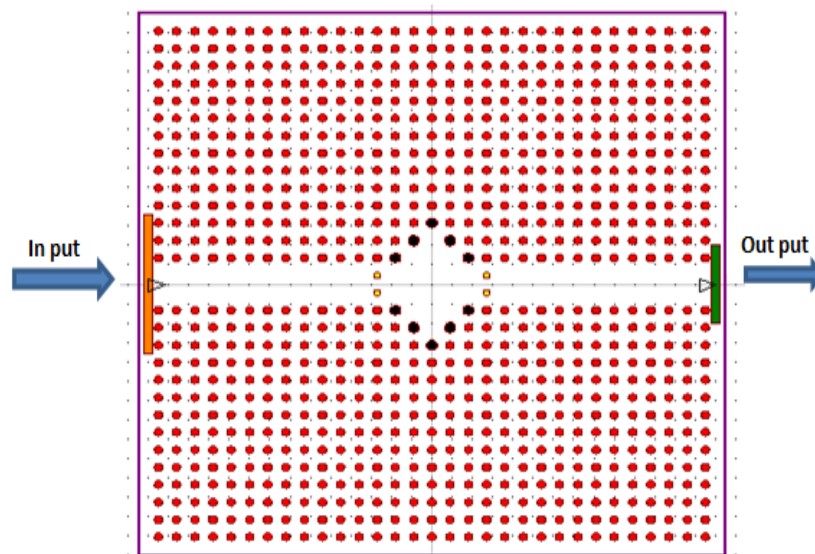


Figure 3.12. Représentation schématique du filtre proposé.

### III. 5. Simulation :

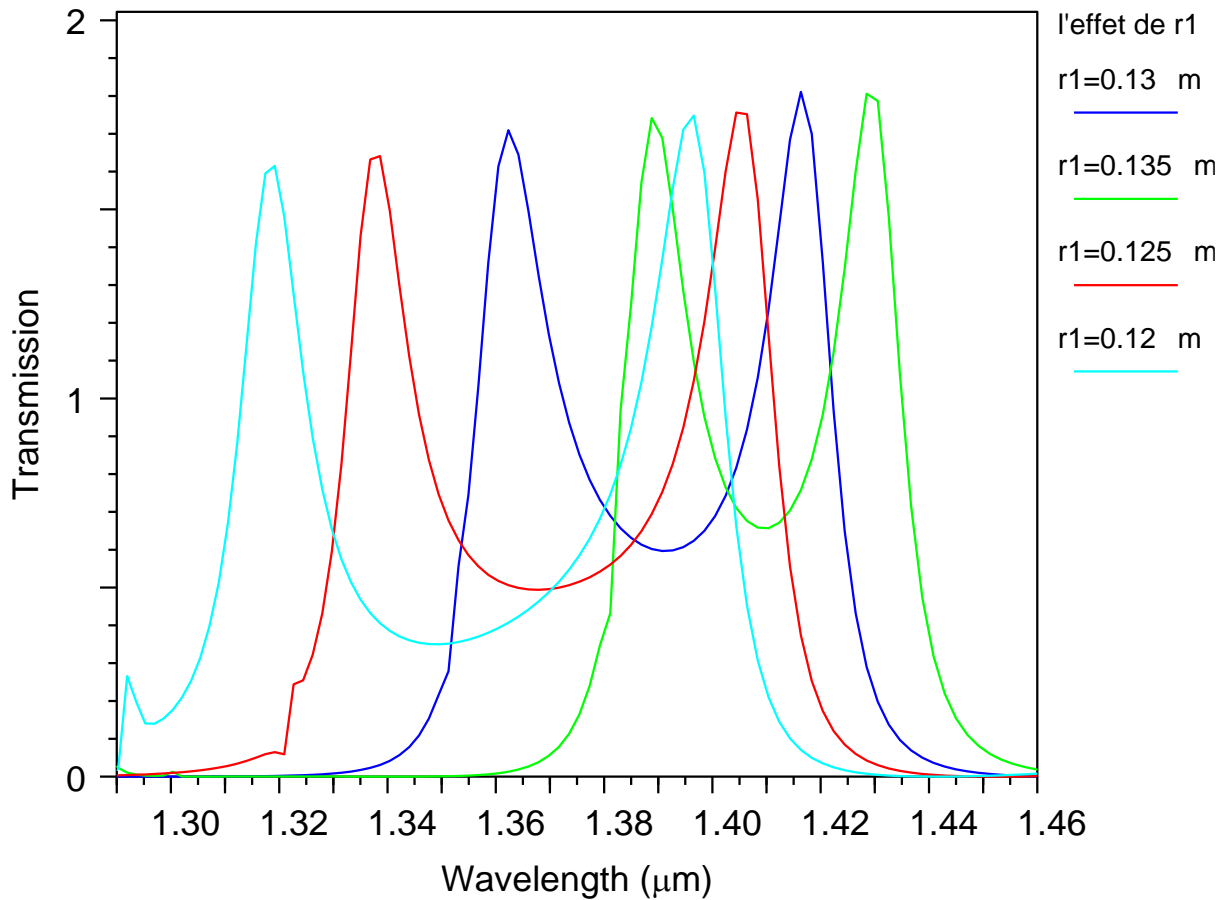
#### III.5.1. Étude de l'effet du rayon $r_1$ sur la réponse spectrale :

Dans un cristal photonique sans défaut, les ondes dont la fréquence est située dans la bande interdite sont totalement réfléchies. En revanche, avec l'introduction d'un défaut,

certaines longueurs d'onde spécifiques sont transmises à travers la structure via des modes guidés.

Le coefficient de transmission dépend fortement : de la longueur du défaut, du profil de l'excitation lumineuse, et du type de terminaison du cristal (conditions aux limites). La simulation de ce comportement dans RSoft permet de visualiser : le champ électromagnétique confiné dans le canal, le spectre de transmission, qui montre un pic dans la bande interdite.

L'analyse des spectres de transmission obtenus par simulation montre la présence de deux pics distincts pour chaque valeur du rayon  $r_1$ , ce qui indique l'existence de deux modes résonants dans la cavité. Cette double résonance est principalement due à la forme losangique de la cavité et à la distribution symétrique des tiges modifiées, qui permettent plusieurs configurations possibles du champ électromagnétique. D'après la figure 3.13, À mesure que le rayon  $r_1$  augmente, les deux pics se déplacent progressivement vers les grandes longueurs d'onde, traduisant un effet de redshift dû à l'augmentation de l'indice effectif local. Ce phénomène permet d'ajuster la position spectrale du filtre en jouant simplement sur la taille des tiges autour de la cavité. L'étude montre que  $r_1$  est un paramètre déterminant dans l'optimisation du filtre, permettant de contrôler à la fois la position, l'espacement et la qualité des pics de résonance.



**Figure 3.13 :** Représentation des spectres de sortie du filtre pour différentes valeurs de rayon de  $r_1$  avec  $r_2=0.08\mu\text{m}$ .

Ce résultat confirme l'efficacité du dispositif pour sélectionner une longueur d'onde spécifique dans la plage de fonctionnement visée.

Afin d'évaluer l'impact du rayon  $r_1$  sur la réponse du filtre à cristaux photoniques, plusieurs simulations ont été réalisées en faisant varier  $r_1$  entre  $0.12\mu\text{m}$  et  $0.135\mu\text{m}$ . Les résultats obtenus montrent que la variation de  $r_1$  influence fortement le facteur de qualité  $Q$ , et donc la sélectivité du filtre. Pour  $r_1=0.12\mu\text{m}$  et  $r_1=0.13\mu\text{m}$ , les valeurs de  $Q$  restent relativement faibles, autour de 3100, ce qui indique une faible performance de confinement. En revanche, pour  $r_1=0.125\mu\text{m}$ , on observe une nette amélioration avec des valeurs de  $Q$  supérieures à 6700 pour les deux pics, traduisant une bonne stabilité et une sélectivité accrue du filtre. Enfin, pour  $r_1=0.135\mu\text{m}$ , la simulation montre un pic de très haute qualité avec  $Q=25543$ , mais également un second pic nettement plus faible

avec  $Q=791.21$ , indiquant une forte asymétrie et une instabilité spectrale. Ainsi, bien que la valeur  $r_1=0.135 \mu\text{m}$  permette d'atteindre un très haut facteur de qualité pour une longueur d'onde précise, la configuration présentant le meilleur compromis entre performance et stabilité reste celle avec  $r_1=0.125 \mu\text{m}$  voir tableaux 3.1.

<b>r1 [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>0.12</b>	<b>0.125</b>	<b>0.13</b>	<b>0.135</b>
<b><math>\lambda</math> [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	1.3188/1.3963	1.338/1.4061	1.3621/1.4165	1.3891/1.4292
<b>Q</b>	3119/3114.3	6749.1/6544.5	3127.5/3127.5	25543/791.21

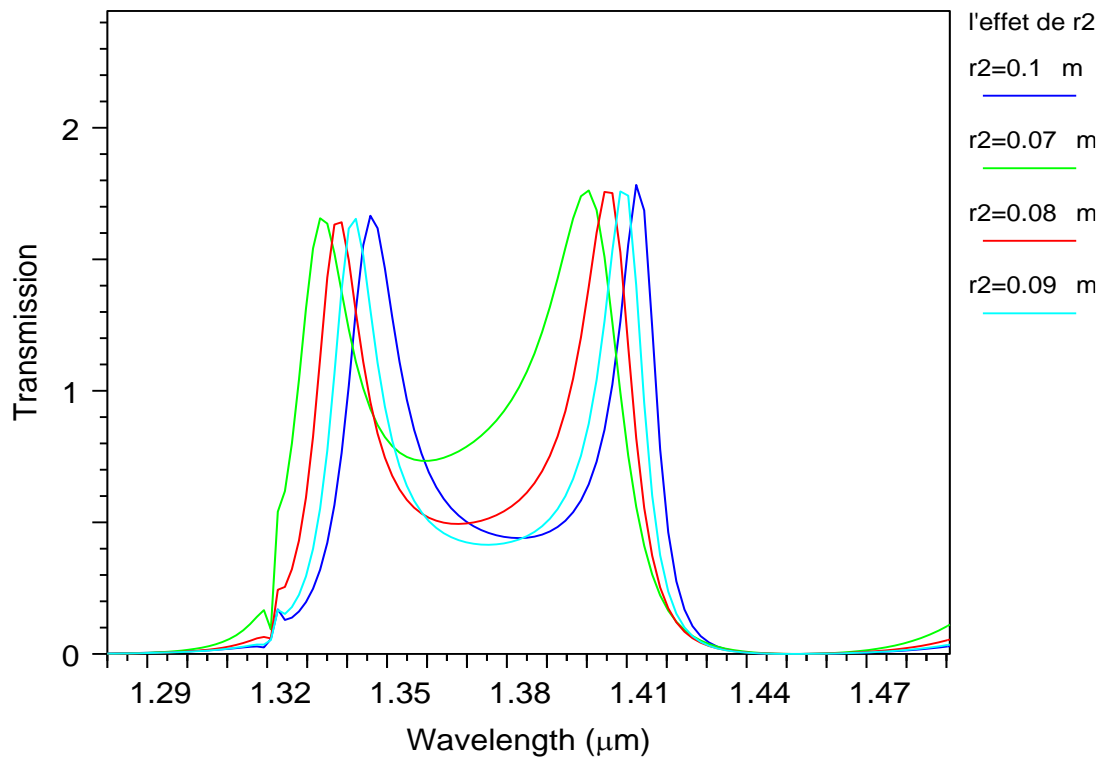
**Tableaux 3.1 :** Variation de la longueur d'onde de résonance et le facteur de qualité en fonction du rayon  $r_1$ ,  $r_2=0.08\mu\text{m}$

### III.5.2. Étude de l'effet du rayon $r_2$ sur la réponse spectrale :

Le tableau 3.2 et la figure 3.14 montrent que l'augmentation du rayon  $r_2$  influence fortement la réponse du filtre. Lorsque  $r_2$  augmente de  $0.07 \mu\text{m}$  à  $0.10 \mu\text{m}$ , les longueurs d'onde de résonance se déplacent progressivement vers des valeurs plus grandes. Cela s'explique par le fait que des rayons plus grands augmentent la quantité de matériau traversé par la lumière, ce qui ralentit sa propagation et modifie les conditions de résonance. En parallèle, le facteur de qualité  $Q$  augmente de manière régulière, ce qui signifie que la résonance devient plus précise et plus efficace. La valeur optimale est atteinte pour  $R_2=0.10 \mu\text{m}$ , où  $Q$  dépasse 128. Cette valeur offre donc les meilleures performances du filtre en termes de stabilité et de sélectivité.

<b>r2 [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>0.07</b>	<b>0.08</b>	<b>0.09</b>	<b>0.1</b>
<b><math>\lambda</math> [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	1.333/1.4	1.338/1.40681	1.342/1.4097	1.3464/1.4132
<b>Q</b>	67.089/67.08	94.972/94.972	116.91/116.92	128.42/128.07

**Tableaux 3.2 :** Variation de la longueur d'onde de résonance et le facteur de qualité en fonction du rayon  $r_2$ , avec  $r_1=0.125\mu\text{m}$



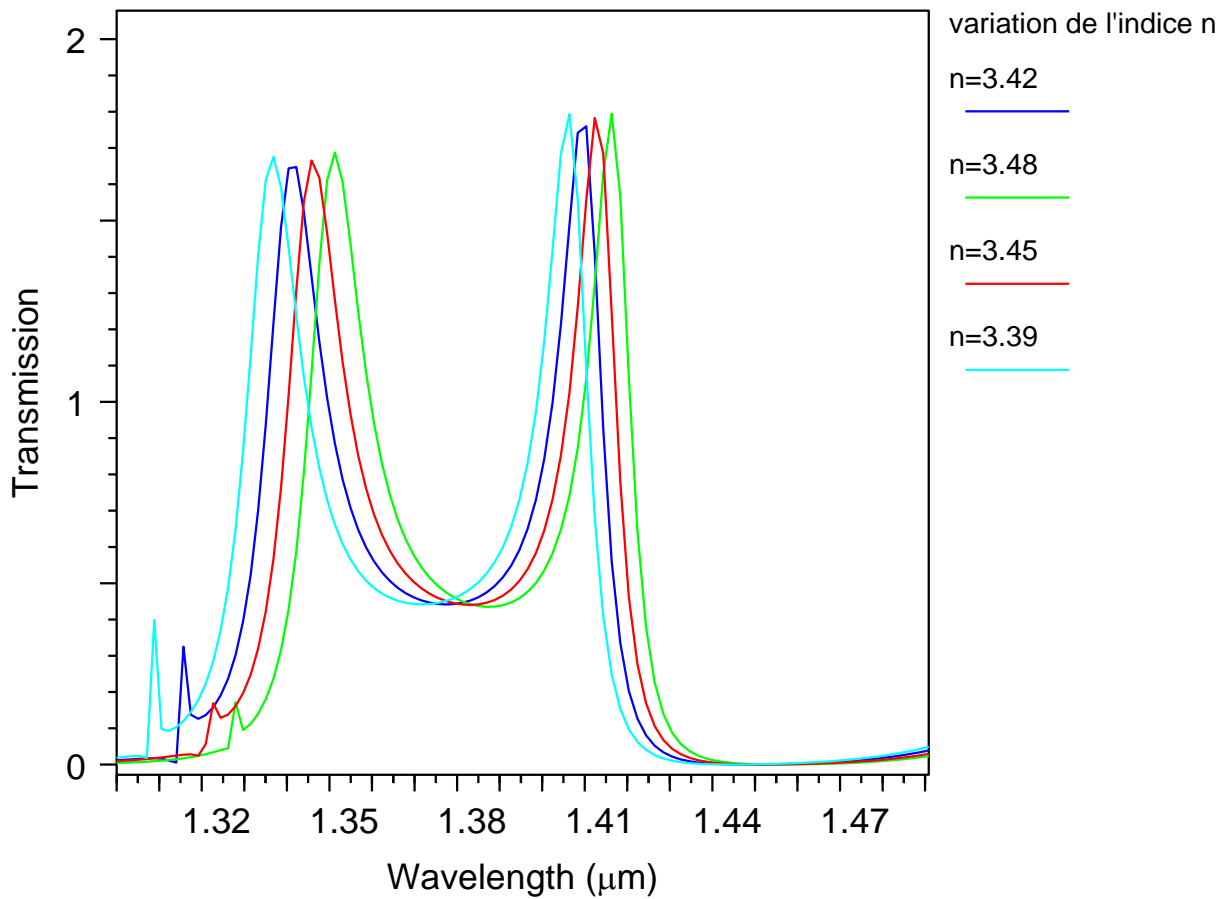
**Figure 3. 14 :** Représentation des spectres de sortie du filtre pour différentes valeurs de rayon de r2 avec  $r_1=0.125\mu\text{m}$ .

### III.5.3. Étude de l'effet de l'indice de réfraction sur la réponse spectrale :

Les résultats obtenus montrent que l'indice de réfraction du matériau joue un rôle important dans le comportement du filtre à cristaux photoniques. Lorsqu'on augmente progressivement cet indice de 3,39 à 3,48, on remarque que les longueurs d'onde de résonance se déplacent vers des valeurs plus grandes, ce qui correspond à un décalage spectral vers le rouge. Cela est dû au fait que la lumière se propage plus lentement dans un matériau à indice élevé, ce qui modifie les conditions de résonance. En parallèle, on observe une diminution du facteur de qualité Q, passant de 4207,9 à 131,26. Cela signifie que la résonance devient moins sélective, avec des pics plus larges et moins marqués. Ces résultats, résumés dans le tableau 3.3 et illustrés par la figure 3.15, sont cohérents avec la théorie, car l'indice de réfraction influence à la fois le confinement de la lumière dans la structure et la précision du filtrage spectral. Ainsi, le choix de l'indice est un paramètre clé pour optimiser les performances du filtre.

N	3.39	3.42	3.45	3.48
$\lambda$ [ $\mu\text{m}$ ]	1.3371/1.4064	1.3413/1.41	1.3464/1.4132	1.3516/1.4169
Q	4207.9/121.882	124.94/1.24.94	128.09/128.09	131.26/131.26

**Tableaux 3.3 :** Variation de la longueur d'onde de résonance et le facteur de qualité en fonction d'indice de réfraction



**Figure 3.15 :** Représentation des spectres de sortie du filtre pour différentes valeurs d'indice de réfraction

### III.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté en détail le processus de conception, de modélisation et de simulation d'un filtre optique à cristaux photoniques bidimensionnels, en utilisant le logiciel RSoft. L'étude a permis d'évaluer les performances d'un filtre résonant basé sur une cavité losangique intégrée dans une matrice périodique de tiges en silicium. Les résultats obtenus confirment l'intérêt de cette configuration pour le filtrage sélectif de longueurs d'onde spécifiques.

Nous avons d'abord exploré les caractéristiques générales du simulateur RSoft et de ses modules BandSolve et FullWAVE, avant de détailler les étapes de la modélisation du cristal photonique, en insistant sur le choix des paramètres géométriques et optiques. Ensuite, une étude approfondie de l'influence de la périodicité du réseau a permis d'identifier une configuration optimale ( $a = 0,45 \mu\text{m}$ ), offrant un bon compromis entre largeur de bande interdite et compacité structurelle.

La simulation du filtre à cavité losangique a montré l'importance des rayons des tiges modifiées ( $r_1$  et  $r_2$ ) dans le contrôle des caractéristiques spectrales. Il a été démontré que la variation de ces paramètres influence de manière significative la position des pics de résonance et le facteur de qualité  $Q$ , indicateur clé de la sélectivité du filtre. La configuration présentant  $r_1 = 0,125 \mu\text{m}$  et  $r_2 = 0,10 \mu\text{m}$  a offert les meilleures performances, avec des pics étroits et bien définis.

Enfin, l'étude de l'indice de réfraction du substrat a mis en évidence son impact direct sur le décalage spectral des longueurs d'onde de résonance, confirmant le rôle essentiel des propriétés optiques du matériau de base.

L'ensemble de ces résultats met en lumière la flexibilité et la précision des structures à cristaux photoniques pour la conception de filtres optiques performants. Le travail réalisé constitue une base solide pour des applications dans les domaines des télécommunications, du traitement optique du signal ou encore de la détection biomédicale.

## Conclusion générale

À travers ce mémoire, nous avons exploré le vaste potentiel des cristaux photoniques dans la conception de dispositifs optiques avancés, en nous concentrant particulièrement sur la réalisation d'un filtre optique bidimensionnel. Ces structures, capables de manipuler la lumière avec une grande précision grâce à leur bande interdite photonique, s'imposent comme des solutions de choix dans les domaines des télécommunications, des capteurs et de la photonique intégrée.

Dans un premier temps, nous avons posé les bases théoriques en présentant les propriétés fondamentales des cristaux photoniques et les méthodes numériques permettant de les modéliser. Ensuite, nous avons approfondi la notion de filtre à cristaux photoniques, en analysant ses différents types, ses principes de fonctionnement et les critères qui influencent sa performance, tels que la sélectivité, la bande passante et la longueur d'onde centrale.

La dernière partie de ce travail a été consacrée à la conception et à la simulation numérique d'un filtre à l'aide du logiciel RSoft, qui offre un environnement puissant pour l'analyse de structures photoniques. Nous avons d'abord étudié l'effet de la périodicité sur la formation des bandes interdites. Cette étude a mis en évidence que l'augmentation du pas de réseau  $a$  provoque un décalage spectral des bandes interdites vers des longueurs d'onde plus grandes (effet de redshift). La valeur  $a=0,45 \mu\text{m}$  s'est révélée être un compromis optimal, offrant une large bande TE1 dans l'infrarouge proche, bien adaptée aux applications en télécommunications optiques.

Ensuite, nous avons évalué l'influence de plusieurs paramètres géométriques et optiques sur les performances du filtre. L'étude du rayon des tiges autour de la cavité a montré que la valeur  $r_1=0,125 \mu\text{m}$  permettait d'obtenir un excellent compromis entre stabilité et performance, avec un facteur de qualité  $Q$  dépassant 6700. Par ailleurs, la variation du rayon  $r_2$  a confirmé son rôle dans l'ajustement fin de la résonance, la meilleure sélectivité étant atteinte pour  $r_2=0,10 \mu\text{m}$ . Enfin, l'analyse de l'effet de l'indice de réfraction a révélé un décalage progressif des longueurs d'onde de résonance vers le rouge, accompagné d'une baisse du facteur de qualité avec l'augmentation de l'indice, comme l'ont montré les résultats résumés dans le tableau 3.3 et illustrés par la figure 3.15. Ces résultats confirment que le choix judicieux des paramètres physiques permet d'optimiser efficacement la réponse spectrale du filtre.

En somme, ce mémoire a permis de mettre en évidence l'efficacité des cristaux photoniques dans le développement de filtres compacts et performants, tout en illustrant la puissance des outils de simulation numérique comme RSoft dans le processus de conception.

Cependant, ce travail ouvre également la voie à plusieurs perspectives. Il serait pertinent, dans le futur, d'explorer des structures tridimensionnelles ou quasi-périodiques, d'étudier l'impact des défauts introduits intentionnellement, ou encore d'envisager l'intégration de ces filtres dans des circuits photoniques complets. L'étude de matériaux actifs ou non linéaires pourrait également enrichir les performances des filtres et étendre leur domaine d'application.

Ce mémoire n'est qu'une première étape dans la maîtrise et la valorisation des cristaux photoniques, mais il reflète l'intérêt croissant porté à cette technologie au cœur de la révolution photonique moderne.

## Résumé

Ce mémoire traite la conception d'un filtre optique basé sur les cristaux photoniques bidimensionnels. Après une brève introduction aux cristaux photoniques et aux principes de fonctionnement des filtres qui leur sont associés (chapitres I et II), le cœur de l'étude est consacré à la modélisation et à la simulation du filtre à l'aide du logiciel RSoft.

La structure proposée est composée de tiges de silicium formant un réseau périodique avec une cavité centrale losangique. Des simulations numériques ont été menées pour évaluer l'influence de différents paramètres (rayons des tiges, périodicité, indice de réfraction) sur la réponse spectrale du filtre. Les résultats ont mis en évidence une configuration optimale offrant une bonne sélectivité et un facteur de qualité élevé. Ces performances confirment l'intérêt de cette approche pour des applications optiques avancées.

**Mots clés :** filtre, BIP, cristaux photonique, périodicité

## Abstract :

This thesis deals with the design of an optical filter based on two-dimensional photonic crystals. After a brief introduction to photonic crystals and their associated filter operating principles (Chapters I and II), the core of the study is devoted to modeling and simulating the filter using RSoft software.

The proposed structure is composed of silicon rods forming a periodic array with a central rhombic cavity. Numerical simulations were carried out to assess the influence of various parameters (rod radii, periodicity, refractive index) on the filter's spectral response. The results revealed an optimum configuration offering good selectivity and a high quality factor. This performance confirms the interest of this approach for advanced optical applications.

**Key words:** filter, BIP, photonic crystals, periodicity

## ملخص

تتناول هذه الأطروحة تصميم مرشح بصري يعتمد على بلورات ضوئية ثنائية الأبعاد. بعد مقدمة موجزة عن البلورات الضوئية ومبادئ تشغيل المرشحات المرتبطة بها (الفصلان الأول والثاني)، خُصص جوهر الدراسة لنمذجة ومحاكاة المرشح باستخدام برنامج RSoft.

يتألف الهيكل المقترح من قضبان السيليكون التي تشكل مصفوفة دورية مع تجويف معيني مركزي. أُجريت عمليات محاكاة عديدة لتقييم تأثير المعلمات المختلفة (أنصاف أقطار القضبان، والدورية، ومعامل الانكسار) على الاستجابة الطيفية للمرشح. كشفت النتائج عن تكوين مثالي يوفر انتقائية جيدة وعامل جودة عالٍ. يؤكد هذا الأداء أهمية هذا النهج للتطبيقات البصرية المتقدمة..

**كلمات مفتاحية :** مرشح، BIP، بلورات فوتونية، دورية

# Bibliographie

- [1]. F. Kiheli, K. Djebrit, « Conception des diviseurs de puissance optique  $1 \times 2$ ,  $1 \times 3$  et  $1 \times 4$  à base des cristaux photoniques », Mémoire Pour l'obtention du Diplôme de Master Académique, Université, Kasdi Merbah OUARGLA, (2020).
- [2]. Farida Kebaili, Ahlam Harhouz, and Abdesselam Hocini, « Modeling and Simulation of Photonic Crystal Sensor for Drinking Water Quality Monitoring », Progress In Electromagnetics Research C, Vol.140, 85-91,( 2024).
- [3]. Oualida El Mansouri, Amel Labbani, « Analysis of a Modified Y-Branch CWDM Demultiplexer Based on Photonic Crystal Structure », Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications, Vol. 23, No. 1, e2024280819, (2024).
- [4]. Farida Kebaili, Abdesselam Hocini and Ahlam Harhouz, « High-sensitivity photonic crystal sensor for early detection of atherosclerosis », (2025).
- [5]. A. Ouaret, Y. Taklit, M. Bendjelloul, « Etude et conception d'un demultiplexeur à base de cavités à cristaux photoniques », Mémoire Pour l'obtention du Diplôme de Master Académique, Université Abderrahmane Mira-Béjaia, (2020).
- [6]. S. Chalabi, « Amélioration de la sensibilité d'un capteur à base d'un cristal Photonique », Université de Mohamed EL-Bachir EL-Ibrahimi - Bordj BouArreridj (2021).
- [7]. Barbara WILD « Etude expérimentale des propriétés optiques des cristaux Photoniques Bidimensionnels et de leur accordabilité », Thèse de doctorat n° 3573, Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne, (2006).
- [8]. F. Kiheli, K. Djebrit, « Conception des diviseurs de puissance optique  $1 \times 2$ ,  $1 \times 3$  et  $1 \times 4$  à base des cristaux photoniques », Mémoire Pour l'obtention du Diplôme De Master Académique, Université Kasdi Merbah OUARGLA, (2020).
- [9]. Hervé Rigneault, Jean-Michel Lourtioz, Claude Delalande, *La nanophotonique*, Éditions Belin, Paris, 2005.
- [10]. R. Moukhtari, « Contribution à l'étude et la Conception Des Cavités à Cristaux Magneto Photoniques », Mémoire Pour l'obtention du Diplôme de Master Académique, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, (2018).

- [11]. M. Filali, «Etude et Conception d'un démultiplexeur 8 canaux à cristaux photoniques bidimensionnels», Mémoire Pour l'obtention du Diplôme de Master Académique, université Mohamed Boudiaf - m'sila, (2018).
- [12]. **K. Boudiaf, SAFER Hadjer**, *Étude et conception des capteurs à cristaux photoniques pour des applications biomédicales*, Université des Frères Mentouri Constantine 1, Constantine, Algérie, 2018.
- [13].Y. MERLE, « Etude de la dispersion électronique dans les matériaux périodiques diélectriques bidimensionnels », Thèse de doctorat n° 47-2, Université de Limoges, (2003).
- [14]. **Hadjira Tayoub, Ahlam Harhouz, Abdesselam Hocini**, *2D photonic crystal biosensing platform based on coupled defective ring-shaped microcavity-two waveguides for diabetes detection using human tears*, *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, Elsevier, Allemagne, 2023.
- [15]. **A. Benmerkhi**, *Influence des paramètres géométriques sur la cavité des cristaux photoniques bidimensionnels*, Université des Sciences et de la Technologie Houari-Boumediène (USTHB), Alger, 2018.
- [16]. A. Belhassos, S. Metref, « Etude et simulation des cristaux photoniques », Mémoire Pour l'obtention du Diplôme de Master Académique Université Kasdi Merbah OUARGLA, (2017).
- [17]. **BOUGRIOU Fiada**, *Étude théorique des matériaux à bandes interdites photoniques bidimensionnels : applications dans le domaine du guidage optique et la détection*, Université des Frères Mentouri Constantine 1, Constantine, Algérie, 2013.
- [18]. **Imperial College London – Photonics Group**, *Photonics*, Londres, Royaume-Uni, [en ligne] : <http://www.sst.ph.ic.ac.uk/photonics>, consulté le 14 juin 2025..
- [19]. Yannick MERLE, « Etude de la dispersion électronique dans les matériaux Périodiques diélectriques bidimensionnels », Thèse de doctorat n° 47-2003, Université de Limoges, Novembre (2003)
- [20]. Ahlam Harhouz & Abdesselam Hocini, «Design of high-sensitive biosensor based on cavity-waveguides coupling in 2D photonic crystal», *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, (2015).

- [21]. Barbara WILD « Etude expérimentale des propriétés optiques des cristaux photoniques Bidimensionnels et de leur accordabilité », Thèse de doctorat n° 3573, Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne, (2006).
- [22]. D. GERARD, « Etude en champ proche et en champ lointain de composants périodiquement nano structurés : cristaux photoniques et tamis à photons », Thèse de doctorat, Université de Bourgogne, (2004).
- [23]. O. Levy, B.Z. Steinberg, A. Boag, S. Krylov, I. Goldfarb, « Mechanical tuning of two-dimensional photonic crystal cavity by micro Electro mechanical flexures », *Sens. and Act. A.*, Vol 139, N° 1-2, pp 47–52, (2007).
- [24]. Muhammad S., Chen D., Xian C., Zhou J., Lei Z., Kuang P., Li Z., Wen G., Huang Y., «Design and Fabrication of High-Quality Two-Dimensional Silicon-Based Photonic Crystal Optical Cavity with Integrated Waveguides», *Photonics* 11, 2024, pp. 753, DOI: <https://doi.org/10.3390/photonics11080753>.
- [25]. Diksha Chauhan , Zen Sbeah , Vishal Sorathiya , Rammani Adhikari and Ram Prakash Dwivedi, «Simulation study of a highly sensitive I-shaped Plasmonic nanosensor for sensing of biomolecules », (2024).
- [26]. Fallahi V., Kordrostami Z., Hosseini M., « Cancer detection by photonic crystal optical biosensors: Effect of hexagonal micro ring resonator design », *Materials Science in Semiconductor Processing* 174, 2024, pp. 108188, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2024.108188>
- [27]. S. Robinson et R. Nakkeeran, « Two dimensional Photonic Crystal Ring Resonator based Add Drop Filter for CWDM systems », *Opt. - Int. J. Light Electron Opt.*, vol. 124, no 18, p. 3430-3435, (2013), doi: 10.1016/j.ijleo.2012.10.038.
- [28]. **K. Venkatachalam, S. Robinson, S. Umamaheswari**, *Two dimensional photonic crystal based four channel demultiplexer for ITU. TG 694.2 CWDM systems*, *International Journal of Photonics and Optical Technology*, Vol. 2, No. 3, pp. 37–41, 2016.
- [29]. **Mohammad Reza Rakhshani, M. A. Mahdi Bahadori**, *Design and simulation of wavelength demultiplexer based on heterostructure photonic crystals ring resonators*, *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, Vol. 50, pp. 97–101, Elsevier, Pays-Bas, 2013.
- [30]. **Farhad Mehdizadeh, M. S. H. Al-Badawi**, *An optical demultiplexer based on photonic crystal ring*, *Optik – International Journal for Light and Electron Optics*, Vol. 127, pp. 8706–8709, Elsevier, Allemagne, 2016.