

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE
ET POPULAIRE**

**Ministère de l'enseignement supérieur et de la
recherche scientifique.
Université Abderrahmane Mira –Bejaia.**



**جامعة بجاية
Tasdawit n'Bgayet
Université de Béjaïa**

Faculté de Technologie.

Département de génie électrique.

**Mémoire pour l'obtention de diplôme de master en
télécommunications.**

Option : Système de télécommunications

Thème :

**Etude et caractérisation d'un filtre à extraction à base
de cristaux photoniques**

Elaboré par :

- **ZOUAOUI LYNDA**
- **YOUSFI SABRINA**

Encadré par :

Mme. Bendjelloul Rahima

Examiné par :

Ms. Berrah Smail

Mme. Hamzaoui Dahbia

Année universitaire : 2019 – 2020

Résumé

Les cristaux photoniques (CPs) ont été définis comme des structures artificielles qui présentent une modulation périodique de leurs indices de réfraction dans une ou plusieurs directions de l'espace. Selon le nombre de directions, ces structures sont désignées par l'appellation de cristaux photoniques à une, deux ou trois dimensions. Ces derniers présentent une propriété optique unique qui est la bande interdite photonique (BIP) dans laquelle aucun mode électromagnétique ne peut se propager. Cette BIP est intéressante pour plusieurs applications dans le domaine de la télécommunication optique tel que le filtrage et le démultiplexage.

Dans ce travail, nous avons étudié les filtres à extraction (Channel drop filters, CDFs) basés sur le couplage latéral entre des guides d'ondes et des résonateurs en anneaux à cristaux photoniques (PCRRs). Les propriétés de ces structures photoniques seront numériquement évaluées en effectuant des simulations à base de la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD). L'amélioration du fonctionnement de ces composants repose sur l'ajustement des paramètres géométriques de la structure ainsi que sa modification par l'introduction de miroirs réfléchissants. Les résultats obtenus indiquent que cette structure peut être un candidat potentiel pour la conception d'un démultiplexeur en longueur d'onde.

Mots clés : Cristaux photoniques, bande interdite photonique, filtre channel drop, résonateur en anneau, efficacité d'extraction, facteur de qualité, démultiplexeur.

Abstract

Photonic crystals (CPs) have been defined as man-made structures that exhibit periodic modulation of their refractive indices in one or more directions in space. Depending on the number of directions, these structures are referred to as one, two or three dimensional photonic crystals. The latter have a unique optical property which is the photonic band gap (BIP) in which no electromagnetic mode can propagate. This BIP is of interest for several applications in the field of optical telecommunications such as filtering and demultiplexing.

In this work, we studied Channel drop filters (CDFs) based on the lateral coupling between waveguides and photonic crystal ring resonators (PCRRs). The properties of these photonic structures will be numerically evaluated by performing simulations based on the method of finite difference in the time domain (FDTD). The improvement of the functioning of these components is based on the adjustment of the geometric parameters of the structure as well as its modification by the introduction of reflective mirrors. The results obtained indicate that this structure may be a potential candidate for the design of a wavelength demultiplexer.

Keywords:

Photonic crystals, Photonic band gap, Channel drop filter, Ring resonator, Extraction efficiency, Quality factor, Demultiplexer

Dédicace

Je viens de remercier mon Dieu le tout Puissant de m'avoir donné la force et le courage pour terminer mes études.

Je tiens à remercier ma famille, et tout particulièrement ceux qui me sont très chers : mes parents qui sont toujours sacrifiés pour me voir réussir, que dieu leur procure bonne santé et longue vie ;

Aux personnes dont j'ai bien aimé la présence dans ce jour ; mes proches de mes frères et ma chère sœur « kenza » et mon grand père, ma copine Dihia et bien sur ma binôme « sabrina ». Merci du fond du cœur pour votre confiance, votre soutien, votre amour, et surtout votre patience.

Enfin, j'exprime ma dernière pensée a mon fiancé « sofiane » qui m'a soutenue et qui m'a encouragé dans ma carrière universitaire.

*Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce
Projet soit possible, je vous dis merci*

Dédicace

Je viens de remercier mon Dieu le tout Puissant de m'avoir donné la force et le courage pour terminer mes études.

Je tiens à remercier ma famille, et tout particulièrement ceux qui me sont très chers : mes parents et mon grand père qui sont toujours sacrifiés pour me voir réussir, que dieu leur procure bonne santé et longue vie ;

Aux personnes dont j'ai bien aimé la présence dans ce jour ; mes proches de mes sœurs de mes nièces et neveu, mon cher frère « abd nour » mes copains/es « Thiziri, Fares, Youva, Dihia, équipe G206 et bien sur ma binôme Lydia ». Merci du fond du cœur pour votre confiance, votre soutien, votre amour, et surtout votre patience.

*Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce
Projet soit possible, je vous dis merci.*

REMERCIEMENTS

*Nous tenons tout d'abord à remercier **Dieu** le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail durant ces longues années d'étude.*

*Au nom de la science et de la technologie, au nom de la vertu du travail et de l'esprit d'élévation de la connaissance, nous tenons à exprimer tous nos respects à notre encadreur **Mme. Bendjelloul Rahima**, pour l'orientation, la confiance, la patience qui ont constitué un mémoire considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être mené au bon port. Qu'il trouve dans ce travail un hommage vivant à sa haute personnalité.*

*Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury **Mr. Berrah** et **Mme. Hamzaoui** pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.*

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Sabrina Lynda



Table de matières

Liste des abréviations	i
Listes des figures	ii
Liste des tableaux	iv
Introduction Générale	1
I. Généralités sur les cristaux photoniques	
I.1. Introduction	4
I.2. Définition	5
I.3. Cristaux photoniques naturels	5
I.3.1. Les Papillons	5
I.3.2. Les Opales	6
I.3.3. Les oiseaux	6
I.4. Analogie entre l'électron et le photon	7
I.5. Les différents types de cristaux photoniques	10
I.5.1. Les cristaux photoniques unidimensionnels CPs-1D : Miroirs de Bragg	10
I.5.2. Les cristaux photoniques bidimensionnels (CPs -2D)	10
I.5.2.1. Différentes familles de cristaux photoniques bidimensionnels	11
I.5.2.2. Diagrammes de bandes	12
I.5.2.3. Carte des bandes interdites	14
I.5.3. Les cristaux photoniques tridimensionnels (CPs-3D)	14
I.6. Le cristal avec défaut	16
I.6.1. Les défauts ponctuels	16
I.6.2. Les défauts étendus	17
I.7. Dispositifs à base de cristaux photoniques	18

I.8. Matériaux	18
I.9. Techniques de modélisation	19
I.9.1. La méthode des ondes planes (PWE)	19
I.9.2. La méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD)	19
I.10. Conclusion	20
Référence du chapitre I	21
II. Filtrage dans les cristaux photoniques	
II.1. Introduction	23
II.2. Filtrage dans les cristaux photoniques	24
II.2.1. Filtres Add-Drop	24
II.2.2. Filtres Fabry-Perot	25
II.3. Filtre channel drop à base de résonateur en anneau à cristal photonique	26
II.3.1. Résonateurs en anneaux à cristaux photoniques	26
II.3.2. Caractéristiques des résonateurs en anneaux	27
II.3.2.1. Facteur de qualité	27
II.3.2.2. Finesse	28
II.3.3. Couplage des résonateurs avec les guides d'onde	29
II.4. Classification des filtres à extraction	30
II.4.1. Systèmes à quatre ports	31
II.4.2. Système à trois ports : filtre channel drop en forme de T à base de PCRR	33
II.5. Filtres accordables	35
II.6. Démultiplexeur à cristaux photoniques	37
II.7. Conclusion	41
Références du chapitre II	42
III. Résultats et interprétations	
III.1. Introduction	47
III.2. Présentation du simulateur	48

III.2.1. Modules de simulation associé	49
III.2.1.1. BandSOLVE	49
III.2.1.2. FullWAVE	49
III.3. Description de la structure étudiée	50
III.3.1. Étude de filtre Channel-drop à base d'un résonateur en anneau à cristaux photoniques	52
III.3.1.1. Structure de base	52
III.3.1.2. Structure modifiée	54
III.3.1.2.1. Introduction des tiges de dispersion	54
III.3.1.2.2. Modification des rayons des tiges de dispersion	56
III.3.1.2.3. Modification de la distance de couplage	58
III.3.1.3. La structure finale	60
III.4. Paramètres affectant les caractéristiques du filtre	62
III.5. Démultiplexeur à base de PCRRs	64
III.6 Conclusion	68
Références du chapitre III	69
Conclusion générale	70

Liste des abréviations

1D : Unidimensionnel.

2D : Bidimensionnel.

3D : Tridimensionnels

CPs : Cristaux photoniques

BIP : Bande Interdite Photonique

TE : Transverse Electrique, polarisation TE

TM : Transverse Magnétique, polarisation TM

λ : Longueur d'onde

f : Facteur de remplissage.

ϵ : Permittivité diélectrique.

Q : Facteur de qualité

$\Delta\nu$: La largeur spectrale de la résonance

a : Période du cristal photonique.

r : Rayon du cristal photonique.

FDTD : Finite-Difference Time-Domain method, méthode de calcul des différences finies dans le domaine temporel

PWE : Méthode des ondes planes

CDF : Channel Drop Filter, filtre à extraction

ADF : Add-Drop filter, filtre à insertion /extraction

PCRR : Photonic Crystal Ring Resonator, résonateur en anneau à cristal photonique

PICs : photonic integrated circuits, des circuits photoniques intégrés

WDM : Wavelength Division Multiplexing, systèmes à multiplexage en longueur d'onde

ISL: Interval spectral libre

FSR: Free Spectral Range

PML: Perfectly Matched Layer

FWHM: Full Width at Half Maximum, largeur à mi-hauteur du pic

Listes des figures

Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques

Figure I.1 : Schéma de cristaux photoniques unidimensionnels (1D), Bidimensionnels (2D) et Tridimensionnels (3D).....	05
Figure I.2 : Illustration d'écailles de Morpho au microscope électronique et Coupe transversale d'une écaille de Morpho au microscope électronique.....	06
Figure I.3 : Collier d'opale naturelle quasi-périodique de bile de silice et SEM image d'opale artificielle.....	06
Figure I.4 : (a) Plume de paon, (b) et (c) image prise au microscope électronique à balayage (MEB) de la coupe d'une barbule verte. La structure de cristal photonique 2D est composée de piliers de mélanine liés par de la kératine ainsi que de trous d'air.....	07
Figure I.5 : Cristaux photonique à une dimension.....	10
Figure I.6 : Structures bidimensionnelles : (a) connectée, (b) déconnectée.....	11
Figure I.7 : Structure 2D : (a) Structure carrée, (b) triangulaire.....	12
Figure I.8 : Diagramme de bande d'un cristal photonique bidimensionnel triangulaire....	13
Figure I.9 : Cartes des bandes interdites d'un réseau de trous d'air dans une matrice diélectrique ($\epsilon = 11.4$): (a) un réseau carré ; (b) un réseau triangulaire.....	14
Figure I.10 : Structure « La Ya-blonovite».....	15
Figure I.11 : Exemples des structures artificiels 3D : Structure cubique(1), tas de bois(2), structure spirale (3), diamant (4).....	15
Figure I.12 : Défauts ponctuels : a) Modification de la permittivité d'une tige b) Absence de la tige centrale.....	16
Figure I.13 : Diagramme de dispersion d'une structure 2D avec défaut.....	17
Figure I.14 : Exemple de guide W1 à cristal photonique hexagonal de trous d'air sur un substrat de silicium sur isolant.....	17
Figure I.15 : Quelques exemples de dispositifs à base de cristaux photoniques.....	18

Chapitre II : Filtrage dans les cristaux photoniques

Figure II.1 : Filtre Add-Drop : le signal d'entrée, en bas et à droite, est composé d'un grand nombre de signaux à des longueurs d'onde différentes λ_i . Le filtre, réalisé dans un cristal bidimensionnel de symétrie hexagonale, permet d'extraire l'un des signaux (ici, celui à la longueur d'onde λ_1) en l'aiguillant dans une autre direction	25
Figure II.2 : Image en microscopie électronique d'une fonction Fabry-Perot intégrée à un guide	26
Figure II.3 : Résonateurs en anneaux à cristaux photoniques : (a) un anneau quasi-carré dans un réseau carré, (b) un anneau hexagonal dans un réseau triangulaire, et (c) un anneau circulaire dans un quasi-cristal photonique	27
Figure II.4 : Mode résonant de largeur spectrale $\Delta\nu$, Centré autour de la fréquence ν	28
Figure II.5 : Représentation schématique d'un filtre channel drop	29
Figure II.6 : (a) Structure schématique et (b) spectres de transmission normalisée du CDF à base de PCRR quasi-carré	31
Figure II.7 : (a) Structure schématique et (b) spectres de transmission normalisée du CDF à base de PCRR en forme de X	31
Figure II.8 : (a) Structure schématique et (b) spectres de transmission normalisée du CDF à base de PCRR en forme de plus	32
Figure II.9. (a) Structure schématique et (b) spectres de transmission normalisée du CDF en forme de T proposé par	33
Figure II.10: (a) Structure schématique et (b) spectres de transmission normalisée du CDF en forme de T proposé par.....	34
Figure II.11: (a) Structure schématique et (b) spectres de transmission normalisée du CDF en forme de T proposé par	35
Figure II.12: Les spectres de transmission du filtre proposé dans la référence pour différentes valeurs de : (a) l'indice de réfraction de toute la structure, (b) le rayon des tiges de toute la structure, (c) le rayon des tiges internes, (d) le pas du réseau	36
Figure II.13 : Schéma du principe de fonctionnement d'un démultiplexeur	37

Figure II.14 : (a) Structure schématique et (b) spectres de transmission normalisée du démultiplexeur proposé par	38
Figure II.15 : (a) Structure schématique et (b) spectres de transmission normalisée du démultiplexeur proposé par	40
Chapitre III : Résultats et interprétations	
Figure III.1 : La fenêtre de programme de RSoft CAD	48
Figure III.2 : La fenêtre principale de BandSolve	49
Figure III.3 : La fenêtre principale de FullWAVE	50
Figure III.4 : Structure schématique d'un CP-2D formé par un réseau carré de pas $a = 0.6703\mu\text{m}$ de tiges cylindriques d'indice de réfraction $n = 3.48$ entourées par l'air	51
Figure III.5 : Diagramme de bandes d'un CP-2D constitué par un réseau carré	52
Figure III.6 : Structure schématique du CDF en forme de T proposé	53
Figure III.7 : La réponse spectrale du filtre CDF en forme de T	53
Figure III.8 : Structure du CDF avec l'insertion des tiges de dispersion	55
Figure III.9 : (a) Transmission et (b) Facteur de qualité du CDF en fonction des positions des tiges de dispersion	56
Figure III.10 : (a) transmission et (b) Facteur de qualité du CDF en fonction de la variation des rayons des tiges de dispersion	58
Figure III.11 : (a) Schématique du CDF a une distance de couple d'une seule rangé (b) son spectre de transmission	59
Figure III.12 : (a) Schématique du CDF a une distance de couplage de deux rangées (b) son spectre de transmission	59
Figure III.13 : (a) Schématique du CDF a une distance de couple de trois rangées (b) son spectre de transmission	60
Figure III.14 : (a) Schéma final du CDF proposé et (b) sa réponse spectrale.....	61
Figure III.15 : Répartition du champ dans le CDF en polarisation TM aux longueurs d'onde : (a) $1.55014\mu\text{m}$ (à la résonance) et (b) $1.53\mu\text{m}$ (hors résonance)	62
Figure III.16 : Structure schématique du démultiplexeur proposé	64

Figure III.17 : Diagramme de bandes d'un CP-2D constitué par un réseau carré de piliers d'indice de réfraction (a) $n = 3.58$, (b) $n = 3.48$, et (c) $n = 3.38$ 65

Figure III.18 : Spectre de transmission du démultiplexeur 66

Figure III.19 : Répartition du champ dans le démultiplexeur aux longueurs d'onde : (a) $\lambda = 1.55932 \mu m$, (b) $\lambda = 1.5504 \mu m$, (c) $\lambda = 1.553988 \mu m$ et (d) $\lambda = 1.565 \mu m$ 67

Listes des tableaux

Chapitre III : Résultats et interprétations

Tableaux III.1 : Caractéristiques du CDF proposé pour différentes positions des tiges de dispersion	55
Tableaux 2 : Spécifications du CDF proposé pour différentes valeurs des rayons des tiges de dispersion	57
Tableaux 3 : Spécifications du CDF proposé pour différentes valeurs de n	63
Tableaux 4 : Spécifications du CDF proposé pour différentes valeurs de (r)	63
Tableaux 5 : Spécifications du CDF proposé pour différentes valeurs de a	63

Introduction générale

Depuis quelques années, les recherches se sont orientées vers le comportement des photons au lieu des électrons dans le but de contrôler la propagation de la lumière et donc d'offrir la possibilité d'empêcher ou de permettre, dans certaines plages de fréquences et dans une ou plusieurs directions. La recherche des scientifiques comme, Yablonovitch et John (1987) a abouti à la réalisation et caractérisation d'une nouvelle génération de matériaux : les cristaux photoniques.

Les cristaux photoniques (CPs) sont des matériaux artificiels ou naturels dont l'indice de réfraction varie périodiquement dans les différentes directions de l'espace, et constituent à l'heure actuelle une nouvelle classe de matériaux, les CPs peuvent être divisés en trois grandes catégories, à savoir les structures unidimensionnelles (1D), bidimensionnelles (2D) et tridimensionnelles (3D). Cependant, Les chercheurs ont porté leur attention principale sur les CPs-2D, du fait de leur fabrication la plus facile et leur coût moindre par rapport aux structures 3D.

La caractéristique la plus intéressante de tels matériaux est la présence de bande interdite photonique(BIP)dans laquelle aucun mode électromagnétique ne peut se propager.Cependant, en introduisant des défauts lacunaires(punctuelsoulinéaires) au sein de ces matériaux, la périodicité sera donc brisée et par conséquent la lumière pourra se propager dans les régions des défauts sans aucun obstacle.Donc la propriété de présence de la BIP dans les CPs, permet de réaliser une variété de dispositifs ou composantsà l'échelle nanométrique servant pour la Communication optique tels que: Les guides d'ondes optiques, les photo-détecteurs, les filtres sélectifs, les démultiplexeurs, les modulateurs.....etc.

Le but de ce travail est l'étude et la caractérisation de dispositifs à base de cristaux photoniques bidimensionnels, et en particulier l'étude des filtres à extraction à base de résonateurs en anneaux.

Notre mémoire s'articule autour de trois chapitres :

Le premier chapitre est une introduction générale à l'étude des propriétés des cristaux photoniques. Nous verrons qu'une grande partie de leurs propriétés peut être acquise de l'analogie qui existe entre les cristaux photoniques et les cristaux solides. Nous énumérons les différentes classes de ces cristaux, nous porterons une attention particulière à décrire les cristaux photoniques bidimensionnels. Nous présenterons quelques exemples d'applications utilisant ces structures. Nous parlerons enfin des matériaux qui sont actuellement utilisés pour la fabrication des cristaux photoniques.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons les bases théoriques nécessaires à la compréhension du filtre channel drop (CDFs) à base de résonateurs en anneaux à cristaux photoniques (PCRRs). Pour cela, nous allons décrire dans un premier temps les PCRRs et présenter leurs propriétés générales. Par la suite, nous détaillerons quelques configurations des CDFs à base de différents résonateurs et dévoilerons les paramètres affectant leurs caractéristiques. Nous terminerons ce chapitre par la présentation succincte de l'application du démultiplexage.

Le chapitre trois quant à lui est consacré à l'étude numérique des filtres à extraction en utilisant la méthode des différences finies dans le domaine temporel à deux dimensions (FDTD-2D). Dans la première partie, nous allons considérer un filtre en forme de T qui contient trois ports, un port d'entrée et deux ports de sortie, et est constitué d'un seul PCRR situé entre deux guides d'ondes perpendiculaires. Dans la deuxième partie, nous allons étudier un démultiplexeur à cristal photonique en utilisant un filtre channel drop à base de PCRR comme élément fondamental pour sa conception. La structure finale de ce dernier est constituée de trois CDFs avec des indices de réfraction différents.

Enfin, nous achèverons ce document par une conclusion générale.

Chapitre I

Généralité sur les cristaux
photoniques

Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques

I.1. Introduction

La notion de "cristaux photoniques" a été proposée pour la première fois en 1987 grâce aux travaux d'E. Yablonovitch et S. John afin d'inhiber l'émission spontanée de la lumière. Le premier cristal photonique a été réalisé en 1991[1]. Les cristaux photoniques sont des structures dont l'indice de réfraction varie périodiquement dans une, deux ou trois dimensions. Ce milieu périodique produit sur la lumière qui se propage dans le cristal photonique un effet analogue à celui du potentiel périodique sur les électrons dans un cristal. De même qu'il existe pour des électrons des bandes d'énergie permises et des bandes interdites, il existe des bandes photoniques d'états permises et des bandes photoniques interdites. Une bande photonique correspond à un mode qui se propage dans le cristal photonique. Une bande interdite photonique correspond à un intervalle d'énergie où la propagation de la lumière est interdite dans certaines directions du cristal photonique. Les cristaux photoniques offrent la possibilité de contrôler la propagation de la lumière et ceci, sur la dimension de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde dans le matériau. C'est notamment cette propriété qui les rend intéressants pour de nombreuses applications[2].

L'objectif de ce premier chapitre est de présenter quelques bases théoriques des cristaux photoniques, en rappelant de manière succincte l'analogie électrons-photons. D'abord, nous présenterons brièvement les différents types de cristaux photoniques ainsi que leurs propriétés géométriques et physiques. Ensuite, nous allons décrire la notion de bande photonique. Enfin nous présenterons les principes des défauts et les dispositifs qui existent à base de cristaux photoniques. Nous terminerons ce chapitre avec un aperçu rapide sur les différents matériaux utilisés.

I.2. Définition

Les cristaux photoniques sont des structures artificielles qui présentent une modulation périodique de la constante diélectrique dans une ou plusieurs directions. Selon le nombre de directions, ces structures sont désignées par l'appellation de cristaux photoniques unidimensionnels (1D), bidimensionnels (2D) et tridimensionnels (3D) (Figure I.1) [3]. Les cristaux photoniques ouvrent la voie à la réalisation de nombreuses fonctions optiques grâce aux possibilités de confinement de la lumière qui pourraient révolutionner la fabrication des circuits intégrés optoélectroniques. La majorité des applications des cristaux photoniques reposent sur leur bande interdite photonique. Il est nécessaire d'introduire des défauts dans la structure périodique afin de disposer d'une fréquence permise dans la bande interdite [4].

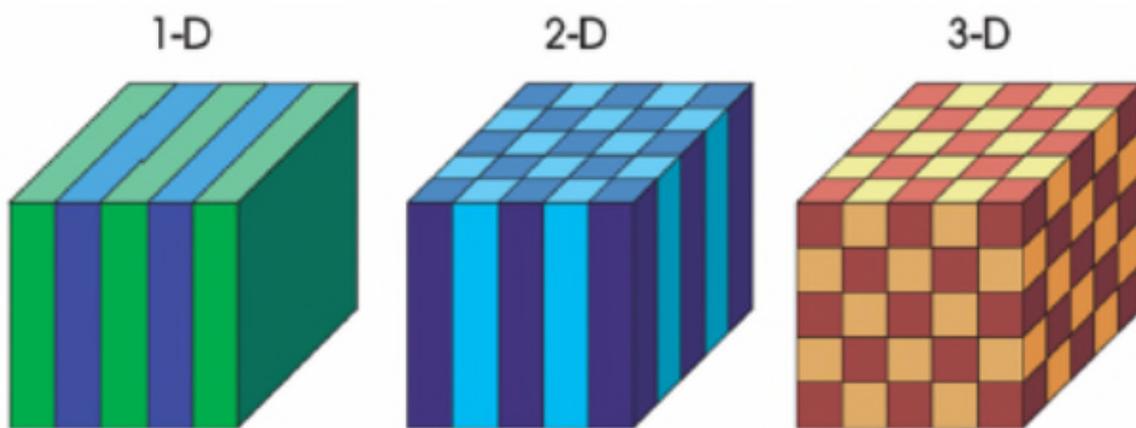


Figure I.1: Schémade cristaux photoniques unidimensionnels (1D), bidimensionnels (2D) et tridimensionnels (3D) [5].

I.3. Cristaux Photoniques naturels

Ce sont des structures périodiques qu'on peut les rencontrer dans la nature sous forme minérale ou biologique comme les opales, les papillons, les oiseaux, etc... Leurs propriétés optiques sont dues à une variation périodique de leur indice de réfraction [6].

I.3.1. Les papillons

La coloration structurelle la plus connue et la plus étudiée chez les insectes est celle des papillons. Ils sont en fait très largement tributaires de la lumière et équipés d'un arsenal impressionnant pour gérer cette interaction avec les ondes électromagnétiques. La structure

Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques

des ailes de papillons du genre Morpho est organisée à l'échelle nanométrique pour former un cristal photonique, dans lequel la lumière bleu ne peut pas pénétrer. Elle est donc réfléchie, ce qui donne sa couleur caractéristique à l'aile (Figure I. 2) [6].

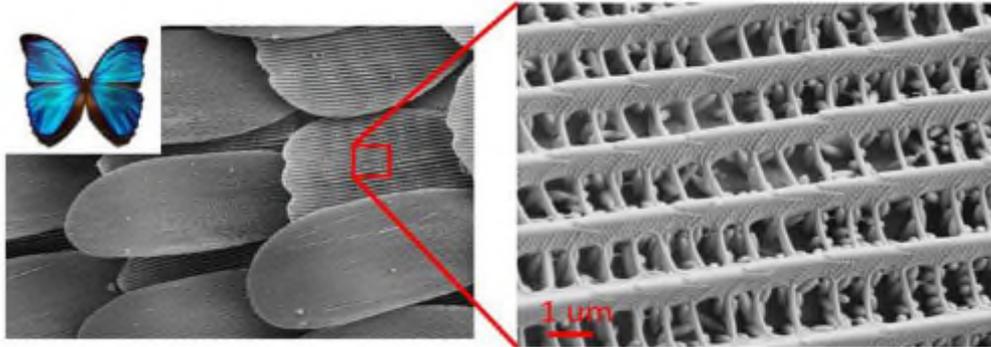


Figure I.2: Illustration d'écaïlles de Morpho au microscope électronique et Coupe transversale d'une écaïlle de Morpho au microscope électronique [6].

I.3.2. Les opales

L'opale est une roche constituée de micro-billes de silice réparties selon un arrangement plus ou moins régulier. De fait, c'est un cristal photonique naturel. Cet arrangement périodique des billes de silice est responsable des couleurs chatoyantes des opales naturelles, dans la mesure où le caractère périodique de la structure conduit à des effets de diffraction gouvernés par la loi de Bragg (Figure I. 3) [6].

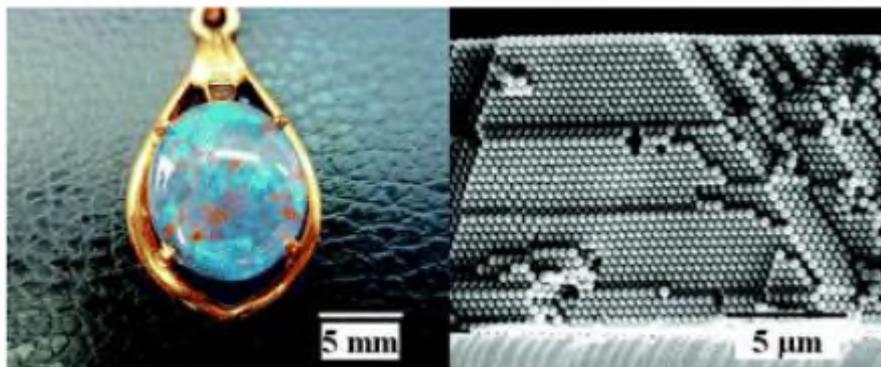


Figure I.3: Collier d'opale naturelle quasi-périodique de bille de silice et SEM image d'opale artificielle [6].

I.3.3. Les oiseaux

Les oiseaux ont toujours fasciné les humains par leurs couleurs. Les couleurs vives que l'on voit sont dues à la couleur structurelle, c'est à dire qu'à leur surface se trouve des

Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques

structures physiques microscopiques qui perturbent la façon dont la lumière se réfléchit sans l'absorber. Les couleurs bleu, vert, jaune et marron des plumes de paons proviennent de la diffraction par des cristaux photoniques 2D à nombre et longueur de maille variables (Figure I. 4) [6].

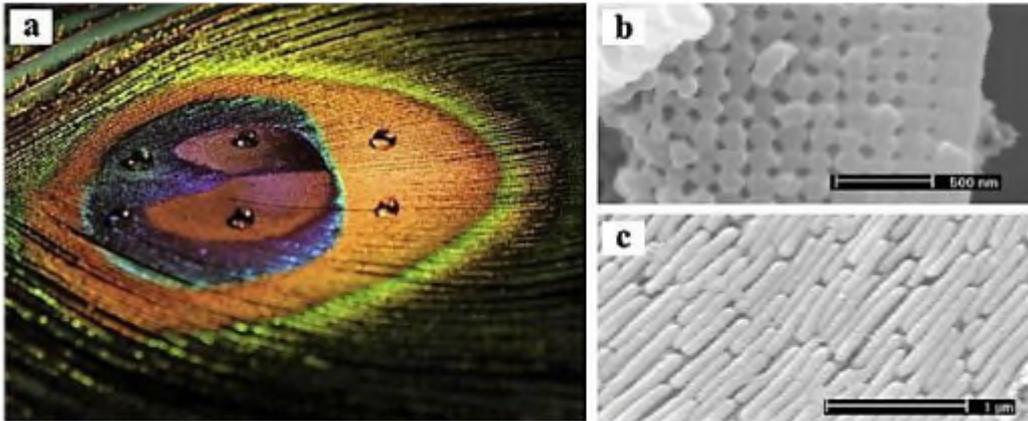


Figure I. 4: (a) Plume de paon, (b) et (c) image prise au microscope électronique à balayage (MEB) de la coupe d'une barbule verte. La structure de cristal photonique 2D est composée de piliers de mélanine liés par de la kératine ainsi que de trous d'air [6].

I.4. Analogie entre l'électron et le photon

Un cristal photonique est un matériau dont la constante diélectrique varie périodiquement dans une ou plusieurs directions de l'espace. En effet, si la période de modulation de la constante diélectrique est de l'ordre de la longueur d'onde de la lumière utilisée, cette modulation conduit à l'apparition d'intervalles d'énergie ayant une densité de modes électromagnétiques nulle, c'est-à-dire qu'aucune radiation lumineuse quelque soit sa polarisation et sa direction de propagation, ne peut s'y propager.

Les équations gouvernant la propagation de la lumière dans un cristal photonique sont les équations de Maxwell. Si nous considérons un matériau non magnétique ($\mu_r=1$), sans charges ($\rho =0$) ni courants, et de constante diélectrique réelle $\epsilon(r)$ (le matériau est non absorbant), les quatre équations de Maxwell s'écrivent [7] :

Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques

$$\nabla \cdot (\varepsilon(r)E(r,t)) = 0 \dots\dots\dots (I.1)$$

$$\nabla \cdot H(r,t) = 0 \dots\dots\dots (I.2)$$

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

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

Où E et H désignent respectivement les champs électrique et magnétique, ε et la permittivité relative appelée aussi la constante diélectrique, ε_0 et μ_0 représentent la permittivité diélectrique et la perméabilité magnétique du vide, r et t représentent les dépendances spatiales et temporelles.

On applique $(\frac{\partial}{\partial t})$ à I.3, on obtient :

$$\nabla \times \left(\frac{\partial E(r,t)}{\partial t} \right) = -\mu_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} H(r,t) \dots\dots\dots (I.5)$$

De I.4 on a:

$$\frac{\partial E(r,t)}{\partial t} = \frac{\nabla \times H(r,t)}{\varepsilon_0 \varepsilon(r)} \dots\dots\dots (I.6)$$

En remplaçant la valeur de $\frac{\partial E(r,t)}{\partial t}$ dans (I.5) :

$$\nabla \times \left(\frac{\nabla \times H(r,t)}{\varepsilon(r)} \right) = -\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 H(r,t)}{\partial t^2} \dots\dots\dots (I.7)$$

Où $c = (\varepsilon_0 \mu_0)^{-\frac{1}{2}}$ est la vitesse de la lumière dans le vide :

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\varepsilon(r)} \nabla \times H(r,t) \right) = -\frac{\partial^2}{c^2 \partial t^2} H(r,t) \dots\dots\dots (I.8)$$

Si l'on cherche des solutions à cette équation sous la forme d'ondes harmoniques, $H(r,t) = H(r)e^{-i\omega t}$ on peut écrire l'équation suivante :

Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\varepsilon(r)} \nabla \times H(r) \right) = \frac{\omega^2}{c^2} H(r) \dots\dots\dots (I.9)$$

$$\nabla \times (\nabla \times H(r)) = (\omega^2/c^2) \varepsilon(r) H(r) \dots\dots\dots (I.10)$$

On sait que

$$\nabla \times (\nabla \times H(r)) = \nabla \cdot (\nabla \cdot H(r)) - \Delta H(r)$$

$$\nabla \cdot H(r) = 0 \Rightarrow \nabla \cdot (\nabla \cdot H(r)) = 0$$

On a aussi :

$$\Delta H(r) = \nabla^2 H(r)$$

On aura donc :

$$\nabla^2 H(r) = (-\omega^2/c^2) \varepsilon(r) H(r) \dots\dots\dots (I.11)$$

C'est l'équation de propagation d'une onde électromagnétique dans un milieu de constante diélectrique $\varepsilon(r)$.

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}}$$

ω : Pulsation.

L'équation de Schrödinger en régime stationnaire pour la fonction d'onde Ψ d'un électron dans un potentiel V s'écrit sous la forme suivante :

$$\nabla^2 \Psi(r) = -\frac{2m}{\hbar^2} (E - V) \Psi(r) \dots\dots\dots (I.12)$$

Où :

E est l'énergie de l'électron, m sa masse.

\hbar est la constante de Planck réduite.

L'équation (I.9) est l'analogue formel de l'équation de Schrödinger (I.12) décrivent le mouvement des électrons dans le potentiel périodique d'un cristal, $H(r)$ étant l'analogue électromagnétique de la fonction d'onde électronique, $\Psi(r)$ et $\varepsilon(r)$ étant l'analogue du potentiel atomique $V(r)$ [7]. Ainsi, de la même manière que la périodicité du potentiel cristallin d'un semi-conducteur entraîne l'apparition de bandes interdites en énergie pour les électrons, la périodicité de la constante diélectrique d'un cristal photonique est à l'origine de

Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques

domaines de fréquences pour lesquels le cristal ne supporte pas de mode électromagnétique, autrement dit, pour lesquels la lumière ne peut se propager dans la structure.

I.5. Les différents types de cristaux photoniques

I.5.1. Les cristaux photoniques unidimensionnels CPs-1D : Miroirs de Bragg

La disposition périodique unidimensionnelle (CP-1D) est la première structure de cristal photonique ayant été initiée. Elle représente le type le plus simple des matériaux à bande interdite photonique étudiés et à élaborer. Comme son nom l'indique, elle incarne un milieu dont le couple d'indice diélectrique est périodique suivant une seule dimension (Figure I.9). Ces cristaux photoniques unidimensionnels sont plus communément appelés Miroir de Bragg [8].

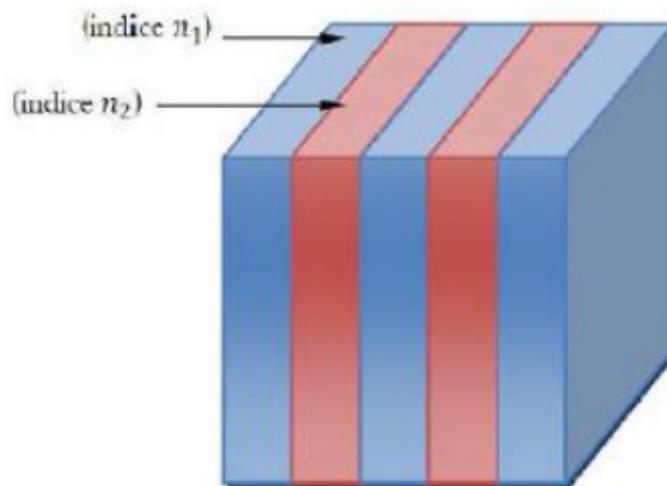


Figure I.5: Cristaux photonique à une dimension [8].

Un cristal photonique unidimensionnel (CP-1D) est caractérisé par les différents matériaux qui le composent, le système selon lequel ces matériaux sont organisés et les volumes relatifs qu'ils occupent dans la cellule élémentaire du cristal [8].

I.5.2. Les cristaux photoniques bidimensionnels (CPs -2D)

Un cristal photonique bidimensionnel est une structure qui présente une modulation périodique de la permittivité diélectrique suivant deux directions de l'espace, et homogène dans la troisième. Les propriétés optiques des structures bidimensionnelles sont fortement dépendantes de la polarisation de l'onde électromagnétique. Il existe plusieurs façons de réaliser ces structures bidimensionnelles. Par exemple, on peut placer des tiges diélectriques

Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques

dans l'air structure déconnectée ou encore dans un autre diélectrique structure connectée (Figure I.10). Afin d'ouvrir des bandes interdites larges, il faut un contraste d'indice (différence entre les indices du milieu et des tiges) suffisamment grand. Les réponses optiques de ces structures dépendent de la polarisation de l'onde électromagnétique qui peut être soit de type TE (Transverse Electrique) ou bien TM (Transverse Magnétique). En polarisation TE, le champ électrique (E) est orienté dans le plan de périodicité et le champ magnétique (H) n'a qu'une composante normale au plan. Selon que l'on considère la polarisation TE ou TM, les bandes énergétiques permises ou interdites seront différentes. Il existe donc une bande interdite TE et une bande interdite TM. Lorsque les bandes interdites photoniques pour les polarisations TE et TM se recouvrent, on parle alors de bande interdite complète. [8].

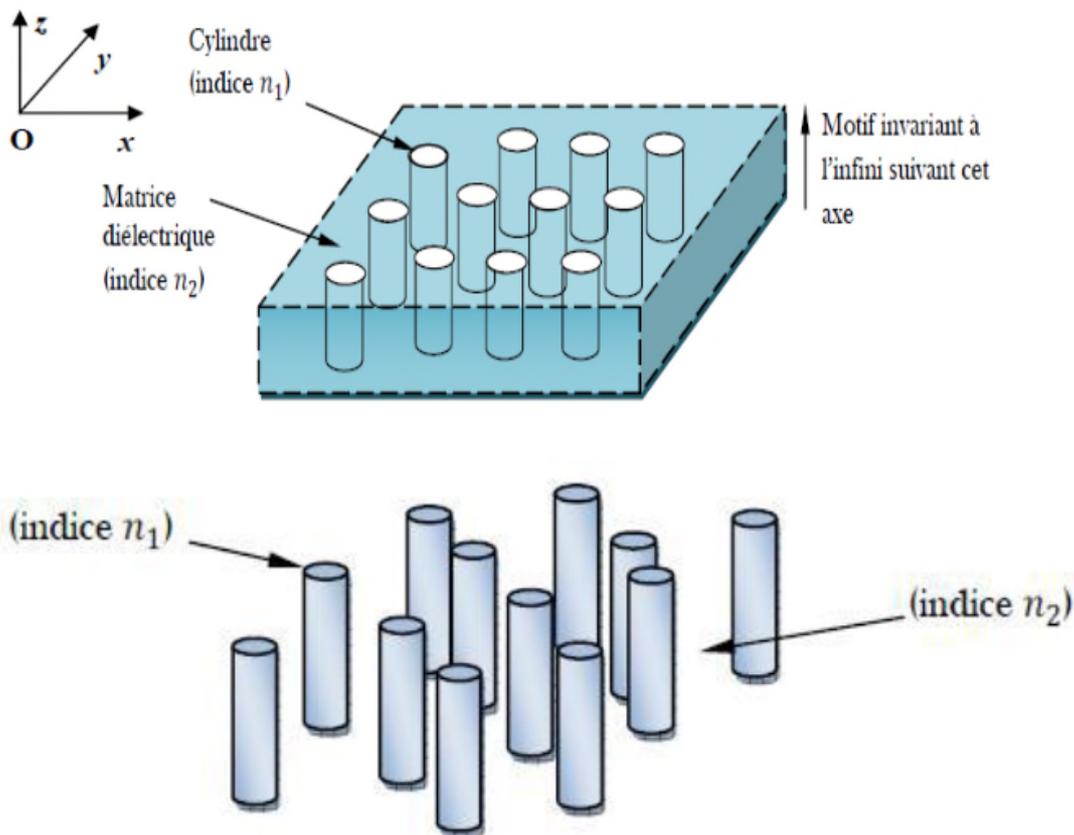


Figure I.6 : Structures bidimensionnelles : (a) connectée, (b) déconnectée [8].

I.5.2.1. Différentes familles de cristaux photoniques bidimensionnels

On distingue deux principales familles de matériaux à BIP bidimensionnelle selon la forme du réseau périodique à deux dimensions:

- **Le réseau carré :** La maille primitive est un carré de côté « a » (Figure I.11.a)

Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques

• **Le réseau triangulaire:** La maille primitive est un triangle équilatéral de côté « a » (Figure I.11.b) [4].

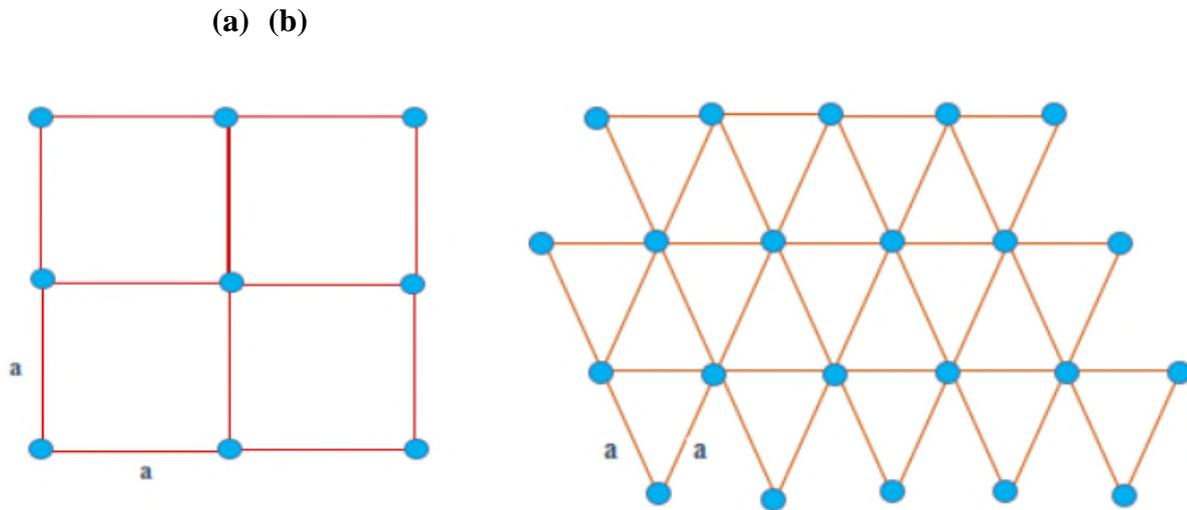


Figure I.7: Structure 2D : (a) Structure carrée, (b) triangulaire [4].

I.5.2.2. Diagrammes de bandes

Un cristal photonique est caractérisé par son diagramme de bandes. La figure I.12 montre les diagrammes de bandes d'un cristal photonique gravé dans une hétéro structure sur substrat GaAs ($\epsilon_{\text{substrat}} = 11.4$, $\epsilon_{\text{air}} = 1$ respectivement en polarisation TE et TM). Ces diagrammes ont été calculés par la méthode de décomposition en ondes planes. Le facteur de remplissage f désigne le rapport entre l'aire occupée par le motif et celle de la maille élémentaire du réseau, $f = 0.30$ et le réseau du cristal photonique est triangulaire. Une bande interdite est observée pour la polarisation TE entre $u = a/\lambda = 0.21-0.27$ (figure I.12(a)). Par contre, pour la polarisation TM, aucune bande interdite ne s'ouvre (figure I.12(b)). En effet, l'ouverture de bandes interdites photoniques (TE) est plus favorisée si des zones de fort indice de réfraction sont connectées. Dans le cas contraire, si les zones de faibles indices de réfraction sont connectées (par exemple, des piliers diélectriques dans l'air), c'est l'ouverture d'une bande interdite en polarisation TM qui est favorisée [8].

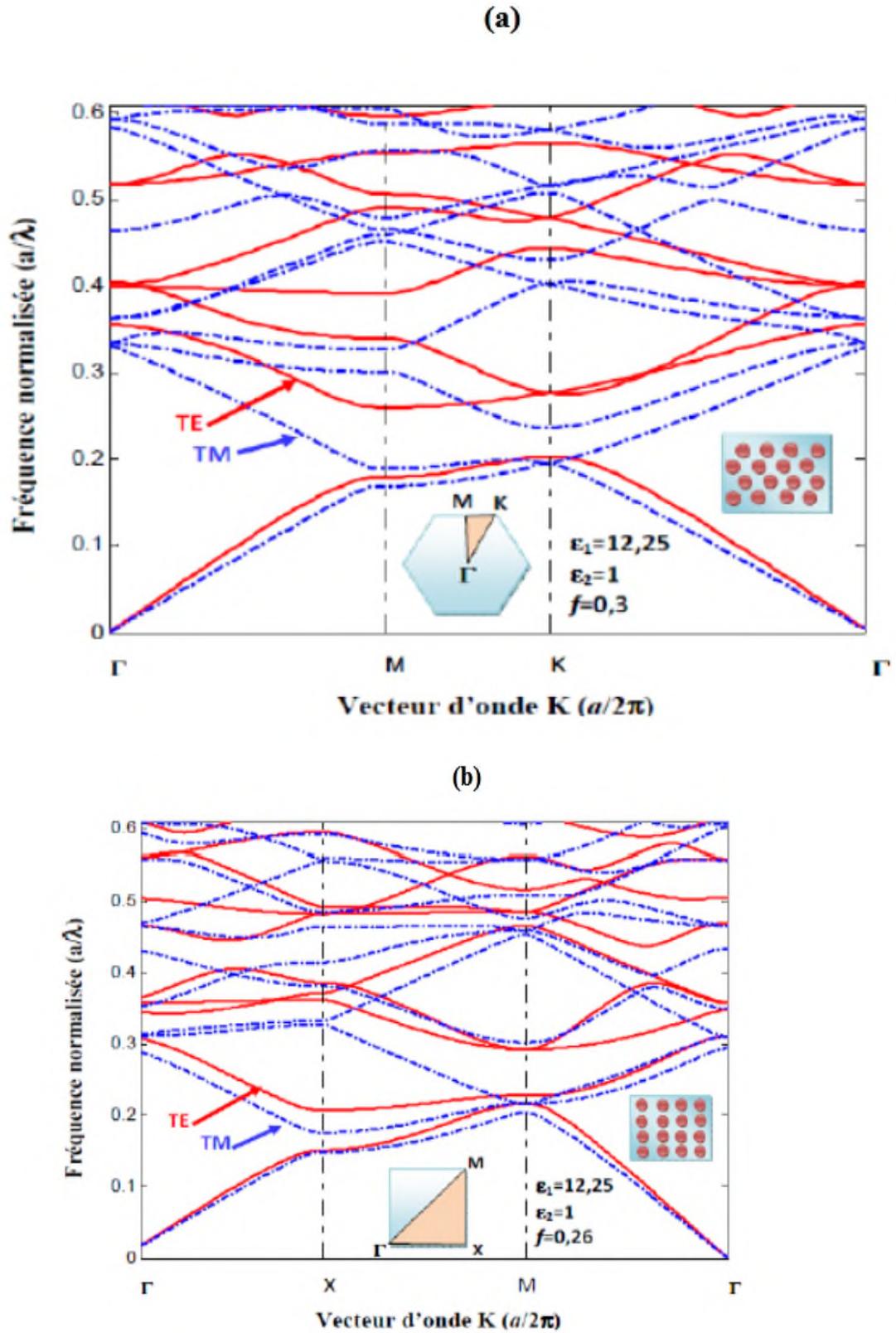


Figure I.8: Diagramme de bande d'un cristal photonique bidimensionnel triangulaire [8].

I.5.2.3. Carte des bandes interdites

Une carte des bandes interdites montre la position de la bande interdite en fonction du facteur de remplissage "f" (Figure I.14). Pour le réseau carré, les bandes interdites en polarisation TE et TM s'ouvrent respectivement pour $f = 35\%$ et $f = 50\%$. Pour le réseau triangulaire, elles s'ouvrent respectivement pour $f = 11\%$ et $f = 63\%$. La région de bande interdite complète correspond à l'intersection des bandes interdites TE et TM et se situe dans la fenêtre d'énergie $\omega = 0.37-0.56$. Le réseau triangulaire est généralement préféré au réseau carré: les bandes interdites TE sont plus larges et s'ouvrent pour des facteurs de remplissage plus faibles [8].

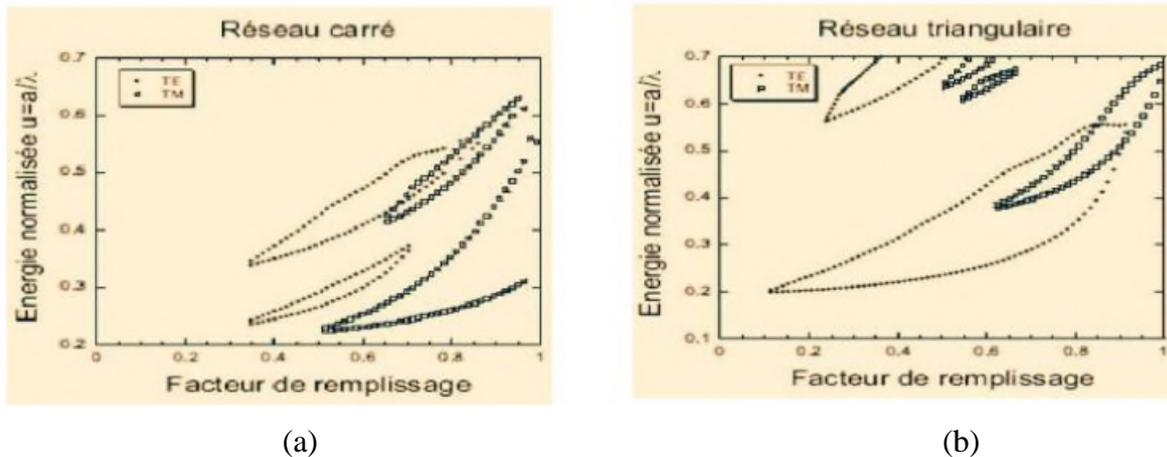


Figure I.9: Cartes des bandes interdites d'un réseau de trous d'air dans une matrice diélectrique ($\epsilon = 11.4$): (a) un réseau carré ; (b) un réseau triangulaire [8].

I.5.3. Les cristaux photoniques tridimensionnels (CPs-3D)

Les cristaux photoniques tridimensionnels (CPs-3D) suscitent encore beaucoup d'intérêts. Ce sont des structures tridimensionnelles périodiques suivant les trois directions de l'espace. Il existe un grand nombre de structures possibles. Le premier cristal photonique tridimensionnel a été fabriqué par S. Y. Lin et al. Il était formé de sphères de silicium arrangées selon une structure diamant. En 1993, E. Yablonovitch fabriquait un cristal photonique 3D en perçant chaque trou dans un bloc de plexiglas selon trois angles azimutaux séparés de 120° (Figure I.15). Ce cristal photonique s'appelle d'après son inventeur "la Yablonovite", avec ce cristal photonique, le concept de la bande interdite photonique a été démontré expérimentalement pour la première fois. De nombreuses méthodes de fabrication des cristaux photoniques tridimensionnels ont été proposées (Figure I.16) [8].

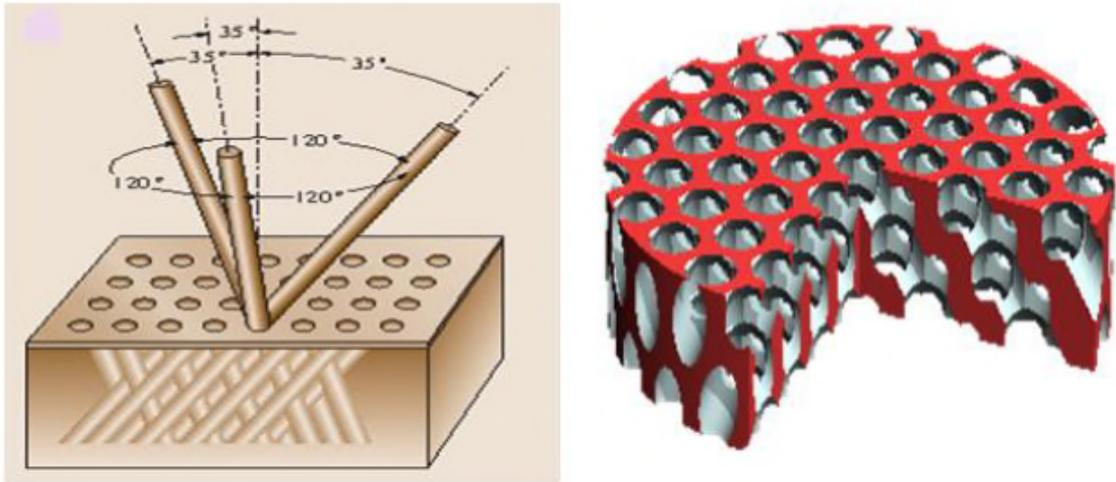


Figure I.10:Structure « La Yablonovite» [5].

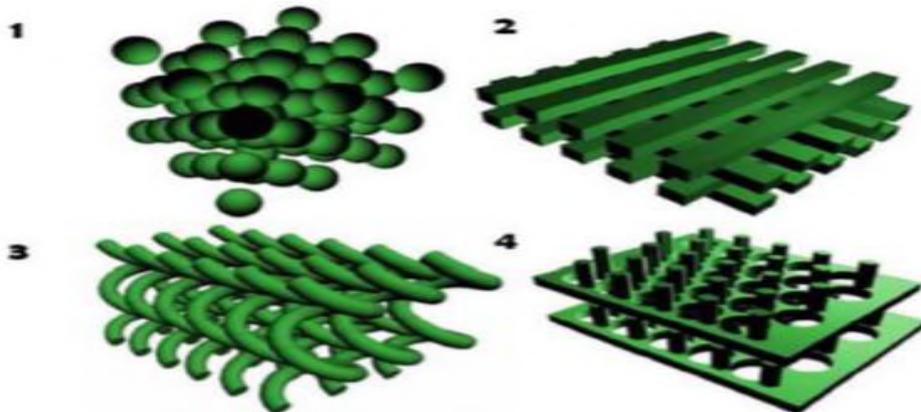


Figure I.11: Exemples des structures artificielles 3D : Structure cubique(1), tas de bois(2), structure spirale(3), diamant(4) [8].

Les matériaux à Bande Interdite Photonique unidimensionnelle (BIP 1D) ou encore réseau de Bragg, ne contrôlent les radiations lumineuses que dans une certaine ouverture angulaire autour de la normale. Pour permettre le contrôle de la propagation des ondes électromagnétiques avec des angles d'incidences variables, on utilise des matériaux à BIP 2D

Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques

(Figure I.13), voire à BIP 3D. Notre choix s'oriente vers des matériaux à BIP bidimensionnelles qui ne sont pas aussi performants que leurs analogues tridimensionnels [1].

I.6. Le cristal avec défaut

La majorité des applications des cristaux photoniques est basée sur l'existence de la bande interdite photonique, comme pour les semi-conducteurs, l'existence d'un défaut dans la périodicité du cristal va entraîner l'apparition de niveaux permis appelés modes de défauts. On a deux types de défauts : les défauts ponctuels (cavités) et les défauts linéaires (guide d'ondes). Il reste néanmoins possible de jouer sur plusieurs paramètres pour obtenir une grande variété de défauts (variation de la taille des trous et de leurs formes par exemple) [8].

I.6.1. Les défauts ponctuels

Les défauts ponctuels sont créés en modifiant les caractéristiques d'une cellule du réseau. Pour les cristaux photoniques composés de cylindres diélectriques, la constante diélectrique d'un cylindre peut être changée. Le cylindre peut être enlevé, ce qui crée une lacune dans le cristal. Cela correspond à une micro-cavité à l'intérieur du cristal photonique. Pour les cristaux photoniques constitués de trous dans un matériau diélectrique, ces trous peuvent être modifiés géométriquement [10].

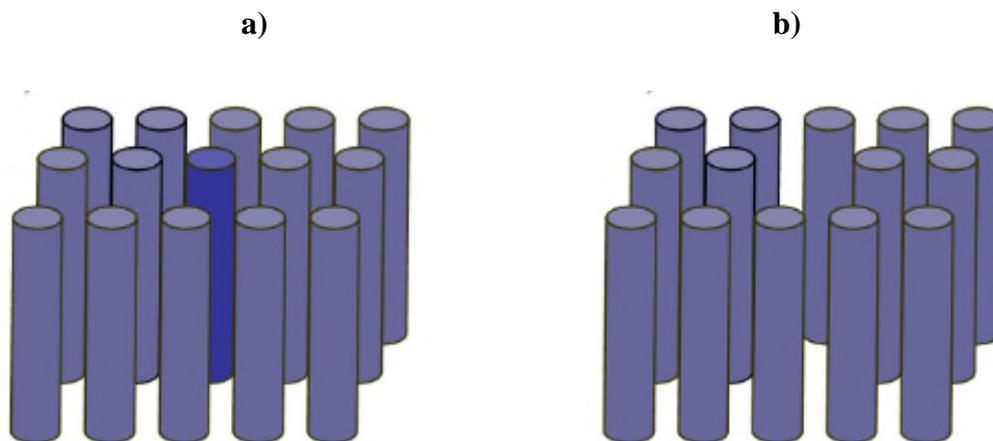


Figure I.12: Défauts ponctuels : a) Modification de la permittivité d'une tige (il vaut mieux faire la tige centrale en rouge) b) Absence de la tige centrale [10].

Les modes électromagnétiques introduits par le défaut sont appelés modes de défaut. C'est un mode dont la fréquence peut se situer dans la bande interdite et qui est localisé autour du site du défaut. Les caractéristiques de ces défauts ont été étudiées par plusieurs équipes. La transmission de ces structures a été étudiée par Joannopoulos et al. Qui ont montré

Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques

théoriquement que les propriétés des modes de défauts peuvent être contrôlées en modifiant la taille et le type de défauts [10].

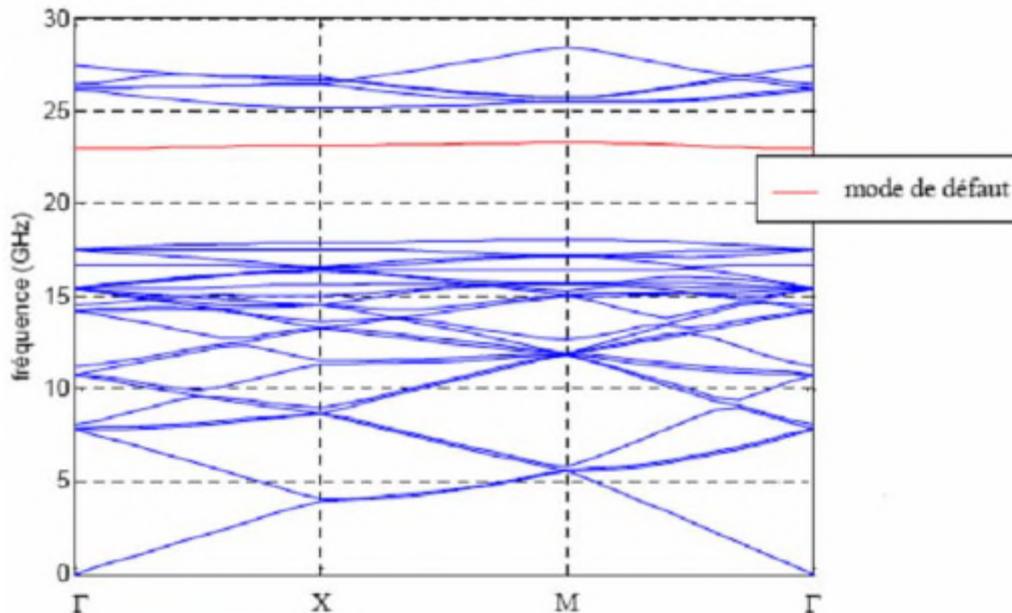


Figure I.13: Diagramme de dispersion d'une structure 2D avec défaut [10].

I.6.2. Les défauts étendus

Il existe trois types de défauts étendus, défauts 1D, 2D ou 3D. Parmi ces défauts, les défauts 1D (W1) (Figure I.19) sont appelés aussi défauts linéiques et peuvent servir de guides d'ondes. Ils sont certainement ceux qui ont suscité le plus grand nombre d'études car ils ont vocation à être utilisés comme guides de lumière au sein d'un cristal donné [8].

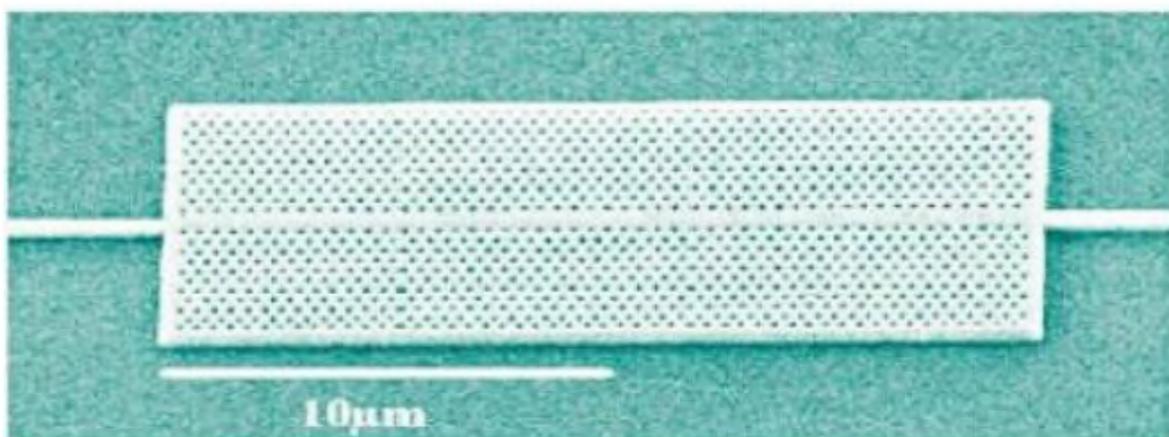


Figure I.14: Exemple de guide W1 à cristal photonique hexagonal de trous d'air sur un substrat de silicium sur isolant [8].

Chapitre II

Filtrage dans les cristaux photoniques

Chapitre II : Filtrage dans les cristaux photoniques

II.1. Introduction

Les systèmes de télécommunications optiques à très hauts débits de demain réclament une miniaturisation des composants qui devront traiter une plus grande quantité d'informations et sous des débits de transfert plus élevés. La conception de solutions performantes et compactes pour le guidage, le filtrage, le multiplexage et l'émission de la lumière semble devoir passer par le recours aux structures périodiques artificielles, que l'on appelle cristaux photoniques.

Le filtre optique à extraction (channel drop filter : CDF) est l'un des composants les plus importants et les plus essentiels des circuits photoniques intégrés (photonic integrated circuits:PICs) et des systèmes de télécommunications optiques à multiplexage en longueur d'onde (Wavelength Division Multiplexing : WDM). Ce dispositif permet d'extraire une longueur d'onde bien précise d'un canal particulier, dans un flux de données, sans affecter les autres canaux.

Dans ce chapitre, les filtres basés sur les cristaux photoniques bidimensionnels sont décrits. Les notions de résonateurs en anneau à cristaux photoniques et de facteur de qualité sont également définies. Nous décrivons ensuite les différents types de filtres ainsi que l'influence des différents paramètres affectant les caractéristiques des dispositifs décrits. Enfin la dernière partie de ce chapitre est consacrée à la présentation des démultiplexeurs à base de cristaux photoniques.

Chapitre II : Filtrage dans les cristaux photoniques

II.2. Filtrage dans les cristaux photoniques

Les télécommunications et les systèmes optiques actuels sont basés sur le codage de l'information sur différents canaux, ou longueurs d'onde. Dans ces systèmes, il est nécessaire d'une part de coder le signal sur différents canaux proches les uns des autres pour que l'ensemble de l'information se propage à la même vitesse et d'autre part de séparer en bout de ligne l'information codée dans chaque canal. On parle de multiplexage/démultiplexage en longueurs d'onde et ces fonctions sont réalisées par des filtres sélectifs.

Un filtre est un dispositif dont l'objectif est de sélectionner une ou plusieurs bandes de fréquences parmi le spectre électromagnétique et d'en éliminer d'autre [1]. Dans le cas des filtres à base de cristaux photoniques, la conception est basée sur le couplage entre des défauts linéaires (guides d'onde) et des défauts ponctuels (cavités) [2]. On trouve dans la littérature deux classes de filtres sélectifs à cristaux photoniques : les filtres Add/Drop dans lesquels la cavité est couplée de manière évanescente au guide d'onde porteur du signal [3, 4, 5, 6] et les filtres de type Fabry Péroต์ dans lesquels la cavité est insérée directement dans le guide [7,8]. Dans l'ensemble de ces travaux, l'objectif est de réaliser des filtres avec une bonne sélectivité et possédant un minimum de pertes.

II.2. 1. Filtres Add-Drop

Dans le cas de la figure II.1, le filtre représenté est conçu à partir d'un cristal photonique 2D de symétrie hexagonale où l'on a introduit deux guides d'ondes couplés entre eux par une cavité centrale, également de forme hexagonale. L'un des guides d'onde (celui du bas) sert à propager un ensemble de signaux à des longueurs d'ondes différentes λ_i , parmi lesquels se trouve le signal à la longueur d'onde λ_1 que l'on veut sélectionner. La cavité centrale est choisie de façon à présenter une résonance à cette longueur d'onde, le cercle représenté sur la figure indiquant la localisation du champ électromagnétique associé au mode résonnant. Si les guides sont parfaitement couplés à la cavité, le faisceau optique à la longueur d'onde λ_1 pourra ainsi passer intégralement d'un guide à l'autre. On aura donc réalisé la fonction de soustraction. On peut, à l'opposé, réaliser la fonction d'addition en injectant un signal de longueur d'onde λ_1 par l'entrée gauche du guide supérieur.

Diverses versions du filtre Add-Drop à base de cristal photonique ont déjà été réalisées (voir, par exemple [4]). Cependant, la sélectivité est exigée pour prélever un canal de longueur d'onde parmi d'autres. Une telle sélectivité requiert des facteurs de qualité de l'ordre de 10 000 pour la cavité servant au couplage (Figure II.1) ainsi qu'un excellent

Chapitre II : Filtrage dans les cristaux photoniques

couplage entre les guides et la cavité. Les meilleurs facteurs de qualité obtenus se situent autour de 3000 pour les cavités les plus petites avec un seul trou manquant dans un cristal 2D [9]. Cette valeur croît à plus de 40 000 pour trois ou quatre trous manquants.

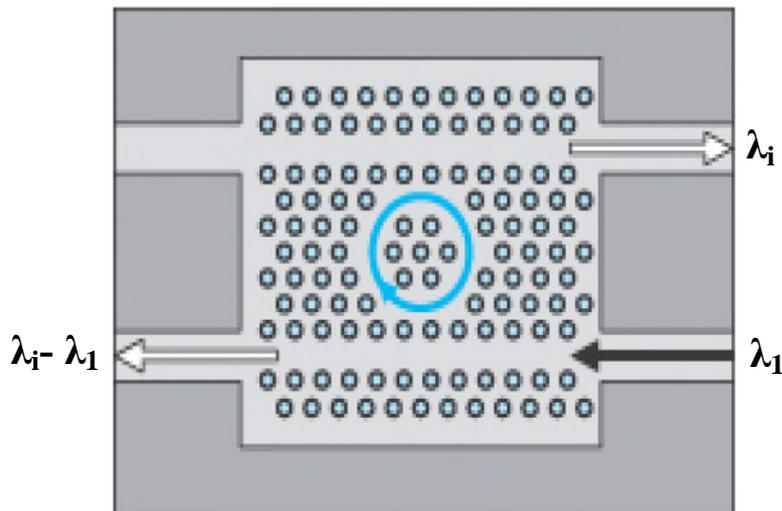


Figure II.1 : Filtre Add-Drop : le signal d'entrée, en bas et à droite, est composé d'un grand nombre de signaux à des longueurs d'onde différentes λ_i . Le filtre, réalisé dans un cristal bidimensionnel de symétrie hexagonale, permet d'extraire l'un des signaux (ici, celui à la longueur d'onde λ_1) en l'aiguillant dans une autre direction [4].

II.2.2. Filtres Fabry-Perot

Une fonction de filtre Fabry-Perot a été intégrée à un guide d'onde en insérant des motifs dans le guide. La plupart des longueurs d'ondes guidées seront réfléchies à l'extrémité du guide, sauf quelques-unes, qui seront couplées à la cavité. Cette approche permet plutôt de réaliser des dispositifs de type Fabry-Perot (si un second guide est placé face à la cavité).

Une cavité mono défaut a été dans un premier temps utilisée et a permis d'obtenir une transmission résonnante. Les expériences de transmission ont pu être réalisées par C. Grillet [10] pour des dispositifs similaires de la figure II.1. Pour ce filtre, un taux de transmission de l'ordre de 5% est trouvé expérimentalement avec un facteur de qualité de 287. Ce taux de transmission est évidemment faible et provient des pertes des miroirs de la cavité et du couplage seulement partiel au mode de la cavité résonnante. Une manière naturelle d'obtenir un bon couplage entre le mode de cavité et le mode guidé est d'utiliser une géométrie de cavité proche de celle du guide, comme par exemple une portion de guide fermé. Ce type de

Chapitre II : Filtrage dans les cristaux photoniques

cavité linéaire est donc très bien adapté à un couplage avec des guides de largeurs similaires [11].

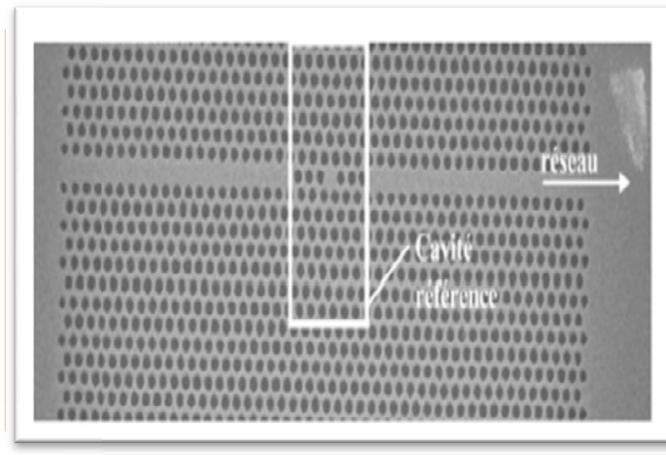


Figure II.2 : Image en microscopie électronique d'une fonction Fabry-Perot intégrée à un guide [10].

II.3. Filtre channel drop à base de résonateur en anneau à cristal photonique

Parmi les différentes configurations des filtres décrites dans le paragraphe précédent, nous ne présentons dans ce travail que des filtres à extraction (Channel Drop Filter, CDF) à base de résonateur en anneau à cristaux photoniques (Photonic Crystal Ring Resonator, PCRR).

II.3.1. Résonateurs en anneaux à cristaux photoniques

Les résonateurs en anneau représentent un autre groupe de résonateurs à cristaux photoniques. Ils sont obtenus par la suppression de quelques motifs du cristal photonique suivant une forme annulaire [12]. La figure II.3 montre quelques exemples de PCRR: un anneau quasi-carré dans un réseau carré, un anneau hexagonal dans un réseau triangulaire, et un anneau circulaire dans un quasi-cristal photonique.

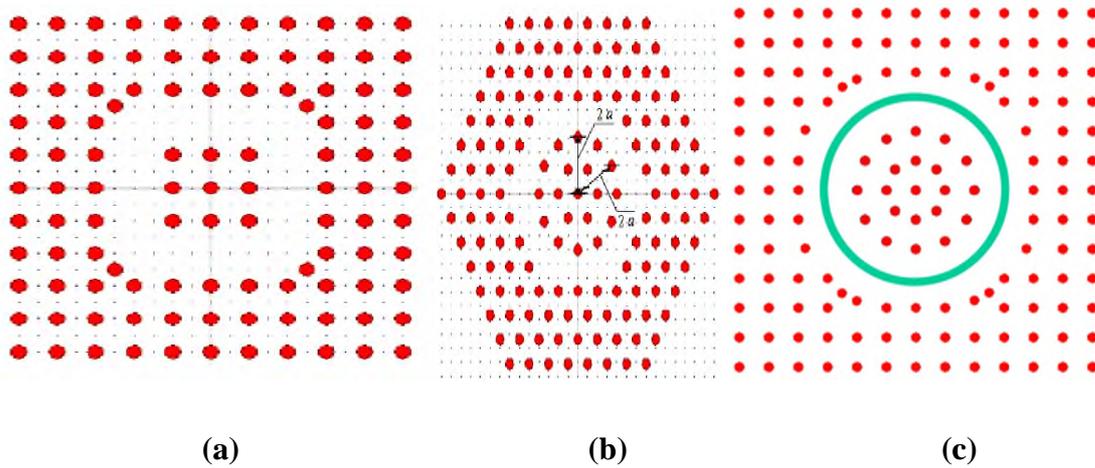


Figure II.3 : Résonateurs en anneaux à cristaux photoniques : (a) un anneau quasi-carré dans un réseau carré, (b) un anneau hexagonal dans un réseau triangulaire, et (c) un anneau circulaire dans un quasi-cristal photonique [13].

Contrairement aux résonateurs en anneaux conventionnels, à l'intérieur desquels la lumière est confinée par réflexion totale interne, les résonateurs en anneau à cristaux photoniques offrent une sélectivité spectrale élevée et peuvent répondre aux exigences micrométriques actuelles, puisque le confinement de la lumière est assuré par bande interdite photonique.

Jusqu'à présent, diverses applications à base de PCRRs, telles que des diviseurs de puissance [14], des capteurs [15], et des démultiplexeurs [16] ont été rapportées.

II.3.2. Caractéristiques des résonateurs en anneaux

Le comportement général d'un capteur est caractérisé par l'évaluation de ces performances via certains paramètres. Parmi ces derniers les plus utilisés sont les suivants :

II.3.2.1. Facteur de qualité

La durée de vie τ des photons à l'intérieur du résonateur est très élevée. Cette durée de vie est liée à la notion de facteur de qualité Q de la cavité par la relation $Q = \omega\tau$, avec ω la pulsation du champ considéré.

Une interprétation énergétique de Q est également possible : il s'agit du rapport entre l'énergie moyenne E dans le mode résonant et de l'énergie ΔE dissipée dans ce même mode sur une période d'oscillation à 2π près [17] :

$$Q = 2\pi \frac{E}{\Delta E} \dots\dots\dots (II.1)$$

Chapitre II : Filtrage dans les cristaux photoniques

Il peut être également écrit comme suit en termes de Q :

$$Q = \frac{\nu}{\Delta\nu} \dots\dots\dots (II.2)$$

Avec $\Delta\nu$ la largeur spectrale de la résonance (figure II.4)

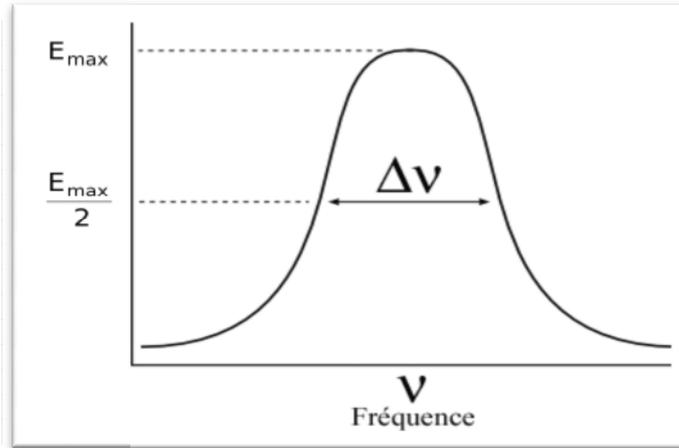


Figure II.4: Mode résonant de largeur spectrale $\Delta\nu$, Centré autour de la fréquence ν [18].

Le facteur de qualité est d’une importance particulière dans de nombreuses applications des résonateurs en anneaux. Par exemple, pour le filtrage, plus Q est élevé, plus le filtre est sélectif. Pour la bio-détection, un facteur de qualité élevé signifie une meilleure limite de détection (sensibilité).

II.3.2.2. Finesse

La finesse d’un résonateur optique se définit dans l’espace des fréquences comme le rapport entre l’intervalle spectral libre, ISL (l’écart entre deux longueurs d’ondes résonantes consécutives ou Free Spectral Range, FSR) et la largeur à mi-hauteur d’une résonance, $\Delta\omega$ [6], Elle est entièrement déterminée par les pertes du résonateur et est indépendante de la longueur du résonateur [18].

$$F = \frac{ISL}{\Delta\omega} = \frac{ISL * Q}{\omega} \dots\dots\dots (II.3)$$

Les résonateurs en anneau à cristaux photoniques à mode de galerie sont des composants d’une très grande finesse (de l’ordre de 10^6 pour des facteurs de qualité de l’ordre de 10^9) ce qui fait d’eux des bons candidats pour des applications telles que la spectroscopie, la détection et le filtrage[19].

Chapitre II : Filtrage dans les cristaux photoniques

II.3.3. Couplage des résonateurs avec les guides d'onde

L'une des problématiques les plus importantes est celle de coupler les résonateurs avec des guides d'onde. En effet, le guide d'onde est l'élément fondamental permettant l'entrée et la sortie du signal pour le résonateur, il est donc indispensable pour ce composant. Lorsque la lumière avec une longueur d'onde appropriée est injectée à l'entrée d'un guide d'onde (bus), couplé latéralement à un ou plusieurs PCRRs, elle sera transmise au résonateur par couplage évanescent. Grâce aux multiples rotations effectuées et aux phénomènes d'interférences constructives, l'intensité s'accroît pour des longueurs d'onde spécifiques et la résonance se produit. A la résonance, une intensité très élevée existe ainsi dans l'anneau. Ces intensités sont évanescentes et décroissent exponentiellement hors de l'anneau. Comme seules quelques longueurs d'onde résonnent à l'intérieur de l'anneau, la structure fonctionne en quelque sorte comme un filtre à extraction [20].

Le filtre channel drop à base de résonateur en anneau à cristal photonique joue un rôle clé dans les circuits photoniques intégrés. Il a suscité l'intérêt des chercheurs en raison de la demande significative pour sélectionner un canal requis à partir des systèmes WDM.

Le schéma de principe d'un filtre à extraction est représenté sur la figure II.5. C'est un système à quatre ports, un port d'entrée et trois ports de sortie, où deux guides d'ondes, le bus (guide d'entrée) et le drop (guide de sortie), sont couplés par l'intermédiaire d'un résonateur optique. Ce dispositif élémentaire de la technologie WDM permet le transfert sélectif et directif de la lumière entre deux guides d'ondes via une zone de couplage. Autrement dit, lorsque des signaux WDM (c'est-à-dire des signaux multifréquences) se présentent à l'entrée du premier guide d'onde (bus), une seule fréquence sera sélectionnée et transférée ensuite dans le second guide d'onde (drop) [21].

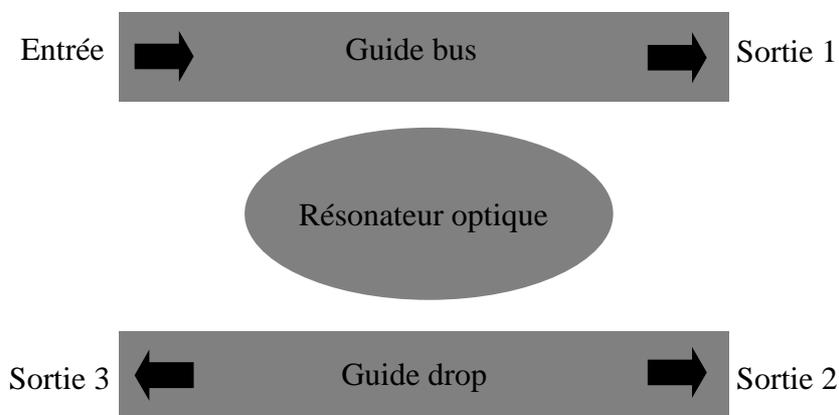


Figure II.5 : Représentation schématique d'un filtre channel drop.

Chapitre II : Filtrage dans les cristaux photoniques

II.4. Classification des filtres à extraction

Il n'existe pas de classification officielle des filtres channel drop. Ils sont généralement désignés, selon le nombre de leurs ports, par systèmes à quatre ports et systèmes à trois ports. Le principe de fonctionnement de ces filtres est le même, il consiste en général à extraire une longueur d'onde spécifique d'un train d'ondes circulant dans un guide d'onde, et à la transférer vers un autre guide via un résonateur en anneau à cristal photonique.

Dans cette partie, nous présentons quelques configurations des filtres à extraction à base de résonateurs en anneaux à cristaux photoniques, proposées et conçues par plusieurs groupes de recherche dans le but d'améliorer leurs caractéristiques de transmission.

II.4.1. Systèmes à quatre ports

Ce type de filtre est composé d'un résonateur en anneau placé entre deux guides d'onde parallèle. Idéalement, un filtre à extraction doit être hautement sélective et possède une efficacité d'extraction maximale. Une conception appropriée pour le filtrage est une tâche essentielle qui doit être manipulée avec soin afin d'obtenir les propriétés de filtrage requises. Basées sur les résonateurs en anneau à cristaux photoniques (PCRRs), différentes conceptions et configurations sont ainsi constamment développées et optimisées pour améliorer davantage les performances des filtres.

Des exemples de tels systèmes comprennent les travaux de Qiang et al.[22], qui ont présenté une étude théorique d'un filtre à insertion /extraction (Add-Drop filter, ADF) à base d'un résonateur en anneau à cristal photonique en forme de carré. Ce filtre se compose de deux guides d'ondes dans la direction horizontale et d'un PCRR carré placé entre eux. Le dispositif proposé présente une faible efficacité d'extraction avec une basse sélectivité spectrale (faible facteur de qualité). La même équipe a pu améliorer cette efficacité d'extraction à plus de 98%, en introduisant des tiges supplémentaires (appelées tiges de dispersion) à l'intérieur du résonateur en anneau (figure II.6). Le facteur de qualité Q de ce filtre est seulement de 160. Ce dernier peut être optimisé en augmentant la distance de couplage entre le PCRR et les guides d'ondes. En se basant sur ces critères, diverses conceptions ont été proposées et optimisées pour améliorer encore les propriétés de filtrage.

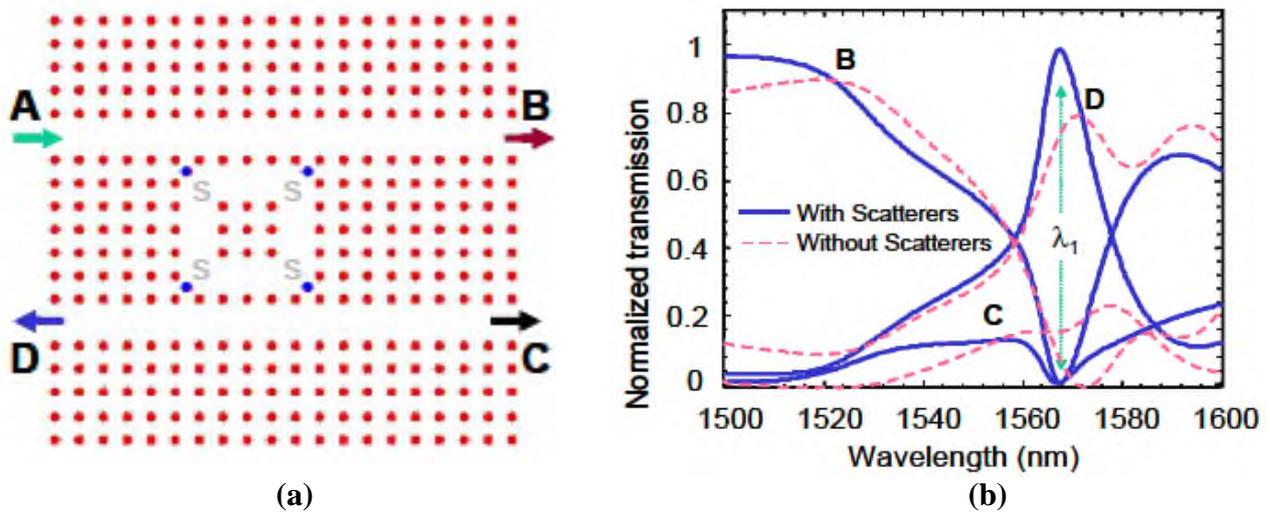


Figure II.6 :(a) Structure schématique et (b) spectres de transmission normalisée du CDF à base de PCRR quasi-carré [22].

En 2012, Mahmoud et al [23] ont proposé un nouveau CDF, dans lequel le PCRR est en forme de X. Dans une telle configuration, une efficacité d'extraction de près de 100 % avec un acceptable facteur de qualité Q a été noté. Un an plus tard, le même groupe[24] a montré que les performances du filtre à base du résonateur en forme de X peuvent encore être optimisées en ajoutant des tiges plus grandes que ceux du réseau à l'intérieur du résonateur comme le montre la figure II.7. En insérant ces tiges, le confinement du champ est augmenté, et la sélectivité est nettement améliorée. Dans ce cas, ils ont relevé un très bon facteur de qualité ($Q = 1000$) avec une efficacité d'extraction maximale ($T = 100\%$).

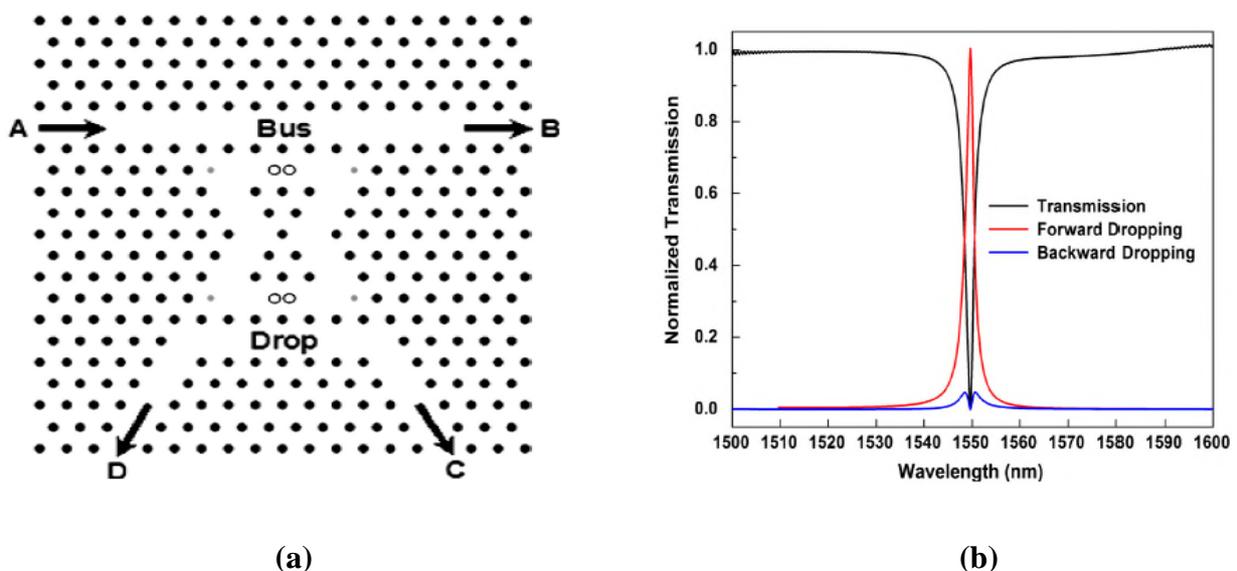


Figure II.7 :(a) Structure schématique et (b) spectres de transmission normalisée du CDF à base de PCRR en forme de X [24].

Chapitre II : Filtrage dans les cristaux photoniques

Un autre paramètre important qui doit être pris en compte pour améliorer davantage les performances du filtre à quatre ports est le rayon de tiges localisées entre le PCRR et les deux guides d'onde. L'équipe de recherche, Bendjelloul et al.[25]a étudié l'effet de la modification de la taille des tiges situées dans les coins internes et externes d'un résonateur en anneau en forme de plus (figure II.8), et elle a démontré que les performances du CDF dépendent fortement de la taille de ces tiges. Dans un premier temps, l'efficacité d'extraction et le facteur de qualité Q du dispositif ont été évalués en modifiant les rayons des quatre tiges situées aux quatre coins externes du PCRR. Ensuite, les performances du filtre ont pu être améliorées en augmentant les rayons des quatre tiges situées aux quatre coins internes du PCRR. Leurs résultats montrent qu'il est possible d'extraire presque 100 % du signal du guide d'onde bus et de le transférer vers le guide d'onde drop via le résonateur. Ils ont noté également une amélioration dans la valeur du facteur de qualité, elle est de 1011, alors que sa valeur calculée pour la structure non optimisée était seulement de 569.42.

Cette liste n'est bien évidemment pas exhaustive et de nombreuses autres techniques ont été développées pour améliorer les caractéristiques d'extraction de ce type de filtre [26, 27,28].

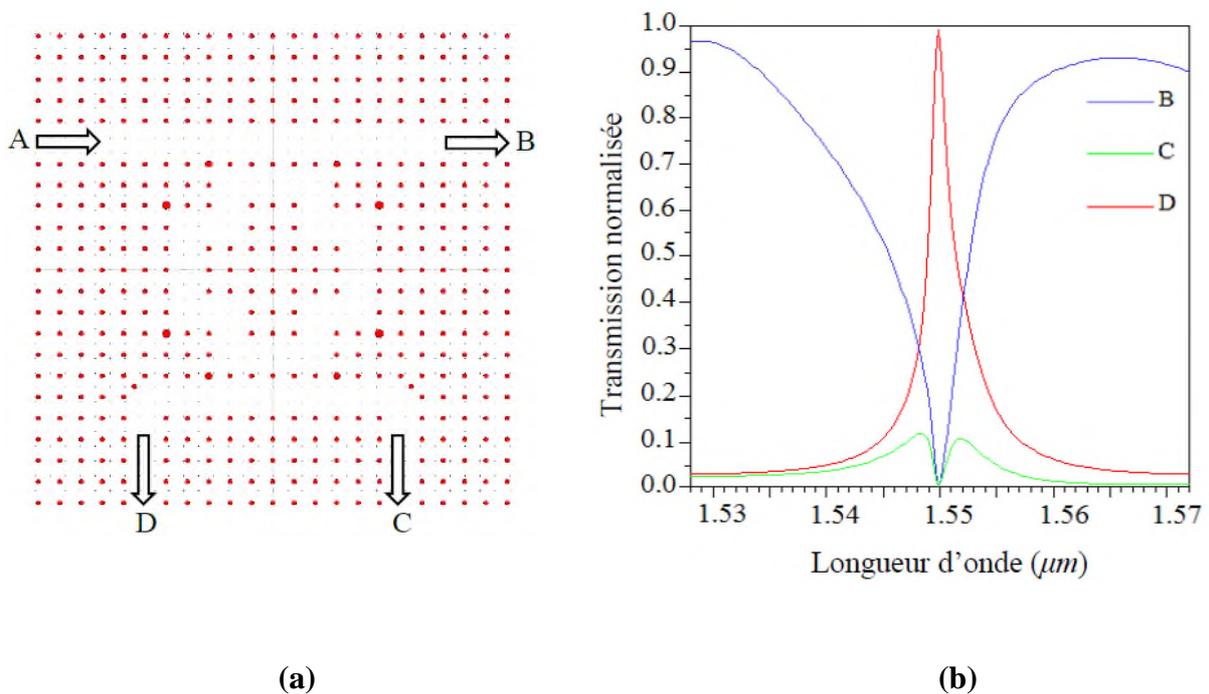


Figure II.8 :(a) Structure schématique et (b) spectres de transmission normalisée du CDF à base de PCRR en forme de plus [24].

II.4.2. Système à trois ports : filtre channel drop en forme de T à base de PCRR

Contrairement aux différents filtres cités plus haut, ce type de filtre contient trois ports, un port d'entrée et deux ports de sortie. Ce dispositif peut être réalisé en utilisant la sélectivité d'un résonateur en anneau couplée par recouvrement des ondes évanescentes à des guides d'onde, un horizontal appelé guide bus et l'autre vertical connu sous le nom de guide drop (guide d'extraction).

En plaçant un guide d'onde à côté d'un résonateur en anneau, l'énergie électromagnétique se propageant dans le guide d'onde sera piégée dans le résonateur en raison du couplage à la fréquence de résonance. Autrement dit, lors de la résonance, le résonateur en anneau extrait la lumière du guide horizontal et la transfère au guide vertical. Dans le cas ordinaire, lorsque l'anneau ne résonne pas, toute la puissance reste dans le guide bus et passe par le port de sortie. Le but est d'extraire une longueur d'onde bien précise dans un flux de données [20].

Une première proposition théorique de ce type de filtre a été donnée par Djavaid et al. En2008 [29]. Ils ont utilisé un résonateur en anneau en forme de carrée dans un cristal photonique bidimensionnel (figure II.9). Ils ont optimisé la réponse de leur CDF en introduisant des tiges de dispersion dans les quatre coins du résonateur. Ces tiges ont les mêmes caractéristiques que celles du reste de la structure photonique. L'introduction de ces tiges améliore de manière significative les caractéristiques de ce filtre, en augmentant l'efficacité d'extraction à plus de 95%.

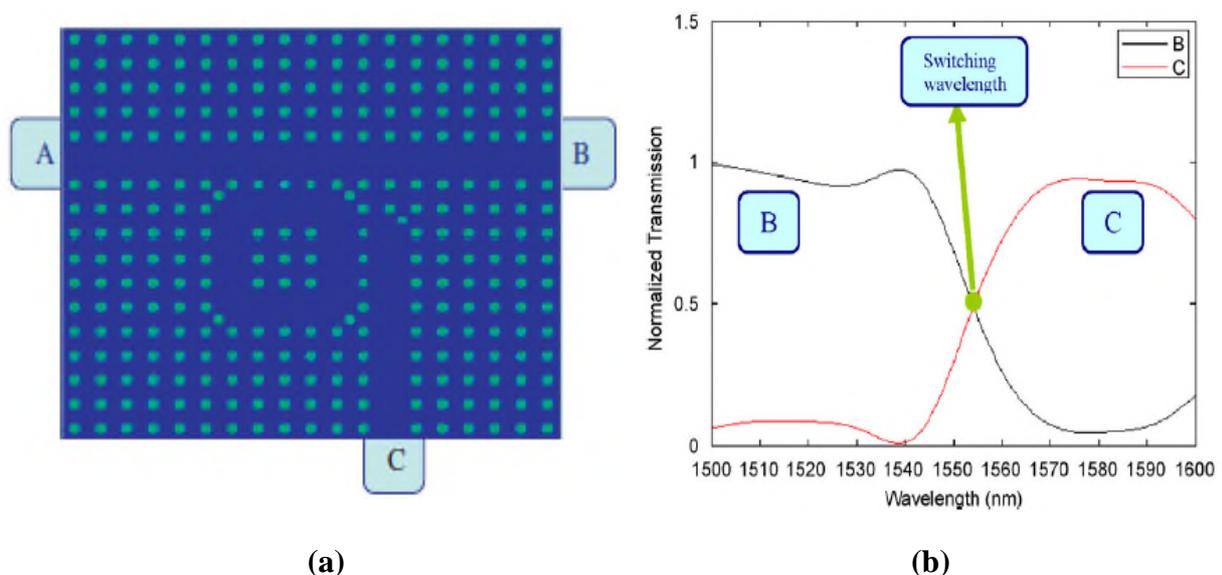


Figure II.9:(a) Structure schématique et (b) spectres de transmission normalisée du CDF en forme de T proposé par [29].

Chapitre II : Filtrage dans les cristaux photoniques

Depuis, plusieurs travaux ont montré la possibilité de concevoir un filtre channel drop en forme de T à base de PCRR. Par exemple, une conception de Ali pour-Banaei et al.[30], dont le schéma est reporté sur la figure II.10, permet à la résonance, le transfert de plus de 90 % du signal optique du guide d'entrée (guide bus) au guide de sortie (guide drop), via un résonateur de forme carré, dont lequel les tiges internes du résonateur sont remplacées par une structure quasi-cristalline. Le facteur de qualité mesuré du mode résonnant est dans ce cas de 387.

Plus récemment, Divya et al. [31] ont développé une nouvelle technique d'optimisation afin d'améliorer les performances du CDF déjà proposé par Djavid et al. Il s'agit de remplacer les quatre tiges de dispersion de forme circulaire, introduites à l'intérieur du résonateur, par des tiges de forme elliptiques (voir figure II.11). En utilisant la nouvelle approche, Les auteurs ont démontré une efficacité d'extraction de 94 % avec un facteur de qualité Q de 391,5.

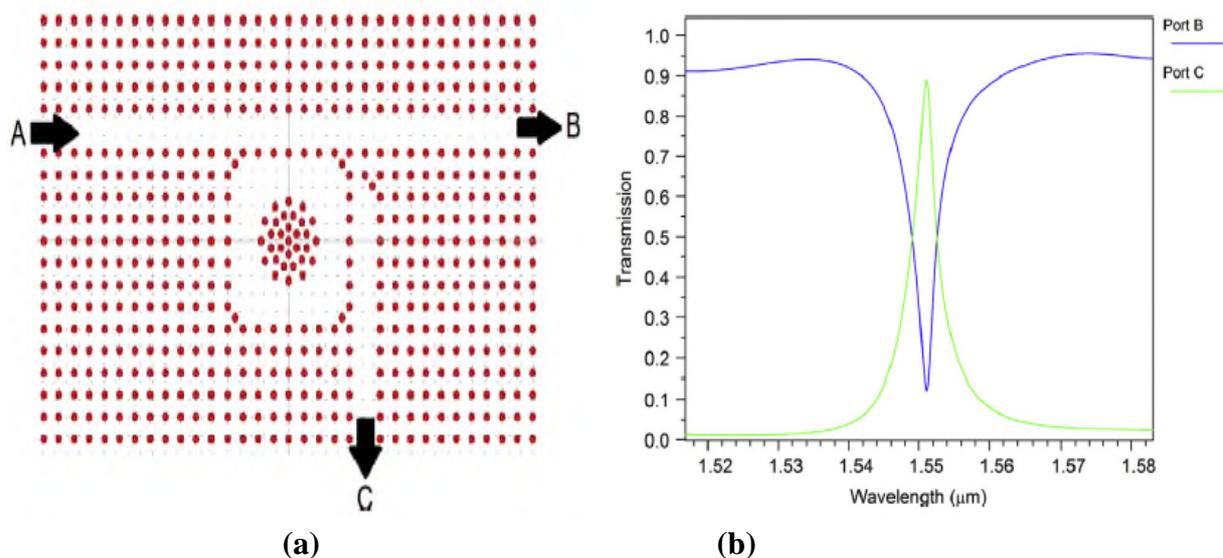
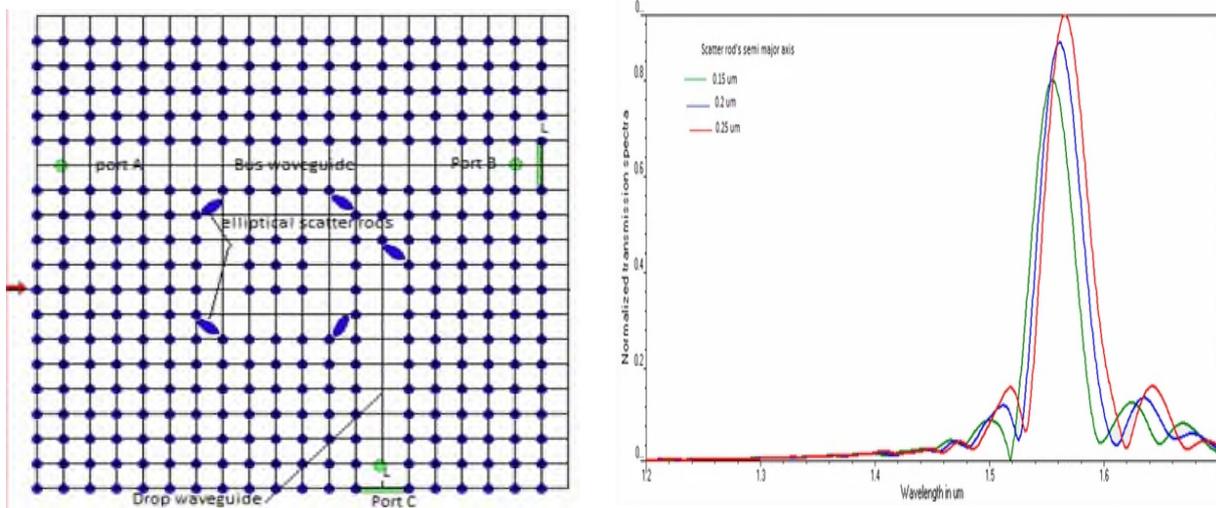


Figure II.10 :(a) Structure schématique et (b) spectres de transmission normalisée du CDF en forme de T proposé par [30].



(a) (b)

Figure II.11 :(a) Structure schématique et (b) spectres de transmission normalisée du CDF en forme de T proposé par [31].

II.5. Filtres accordables

Il apparaît que le filtre optique accordable est un composant indispensable dans le monde des télécommunications optiques, notamment dans la réalisation de démultiplexeurs en longueur d'onde. On en veut pour preuve l'importance qu'ont portée plusieurs chercheurs à ce domaine depuis plusieurs années.

Généralement, les concepteurs de filtres accordables cherchent à faire varier la fréquence de fonctionnement du filtre de manière contrôlée tout en maintenant stable les autres grandeurs. Les concepteurs de filtres accordables ont donc choisi différentes approches afin de garantir le contrôle ou la stabilité des facteurs de qualité et de la transmission des filtres. La plupart des techniques de filtrage accordable en longueur d'onde utilisent les effets suivants : thermique [32,33], mécanique [34,35], et les actionneurs des systèmes micro-électromécaniques (MEMS)[36]. Théoriquement, la modification de la longueur d'onde de fonctionnement du filtre est réalisée en changeant les paramètres structuraux tels que l'indice de réfraction, le rayon des tiges et la constante du réseau.

Divers auteurs se sont attachés à accorder la longueur d'onde de résonance dans différentes conceptions du CDF [37, 27, 28,30]. Dans la référence [30], les auteurs présentent un CDF, à

Chapitre II : Filtrage dans les cristaux photoniques

trois ports, susceptible de se décaler en longueur d'onde en modifiant le pas du réseau, l'indice de réfraction et le rayon des tiges intérieures et de la structure entière. Ils ont montré que la longueur d'onde résonnante du CDF dépend de ces paramètres, ce qui signifie qu'en changeant l'un de ces derniers, on peut contrôler la longueur d'onde de sortie de la structure (figure II.12).

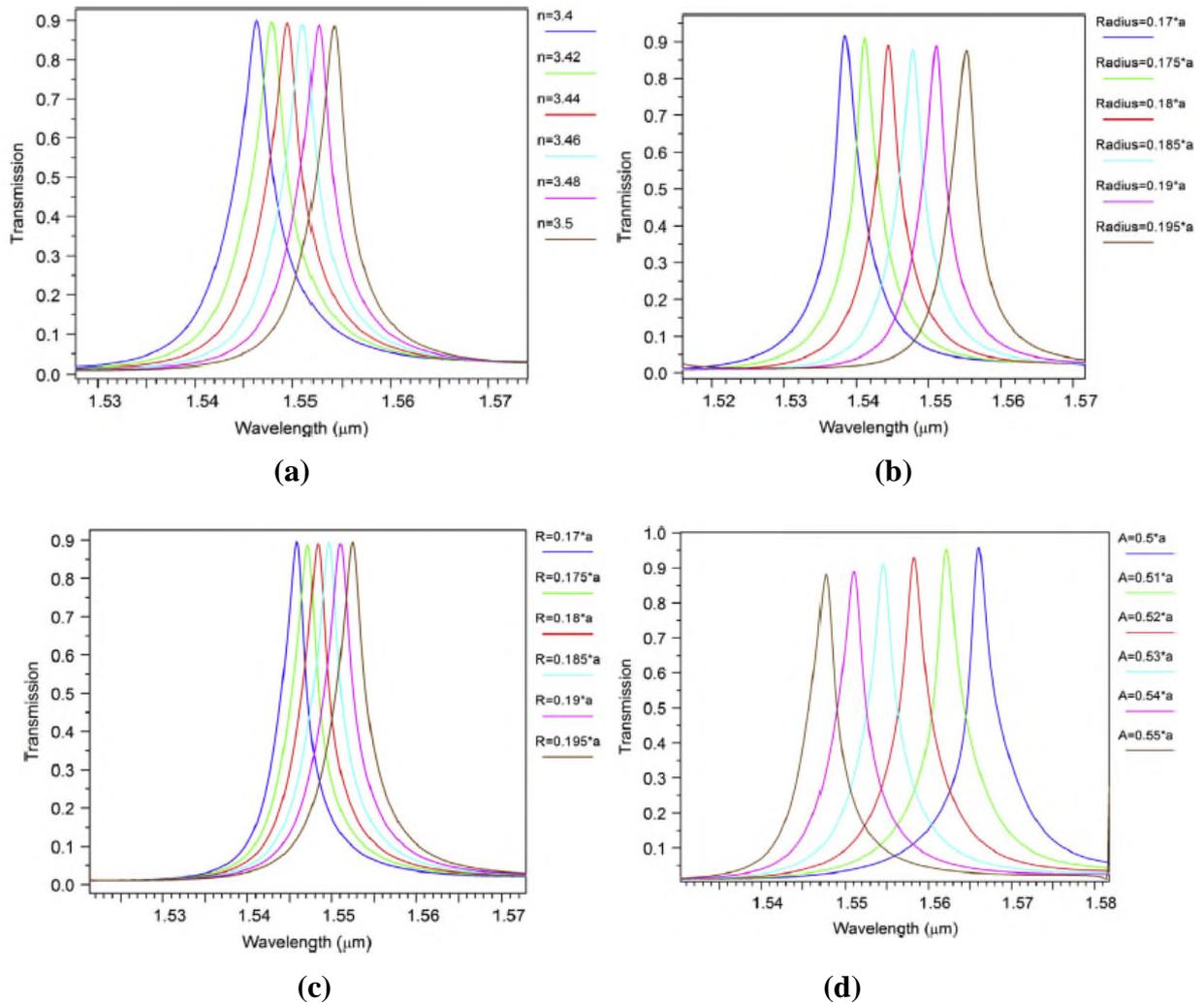


Figure II.12: Les spectres de transmission du filtre proposé dans la référence [30] pour différentes valeurs de : (a) l'indice de réfraction de toute la structure, (b) le rayon des tiges de toute la structure, (c) le rayon des tiges internes, (d) le pas du réseau.

II.6. Démultiplexeur à cristaux photoniques

Au cours de ces dernières années, l'accroissement du volume des données échangées dans les systèmes de télécommunications optiques a entraîné le développement de réseaux de télécommunications à très haut débit qui nécessitent une intégration plus dense des composants et réclament leur miniaturisation. Ces composants doivent traiter une plus grande quantité d'informations et sous des débits de transfert plus élevés. Etant l'un des composants les plus importants et les plus essentiels de cette chaîne, le démultiplexeur optique permet d'extraire plusieurs longueurs d'ondes bien précises et bien distinctes d'un flux de données (voir figure II.13).



Figure II:13 : Schéma du principe de fonctionnement d'un démultiplexeur [38].

La performance du démultiplexeur est évaluée quantitativement en mesurant sa diaphonie, qui est définie comme le rapport de la puissance au port de sortie indésirable pour une longueur d'onde spécifique à la puissance à un port souhaité [39]. Selon cette définition, une faible diaphonie signifie une meilleure performance.

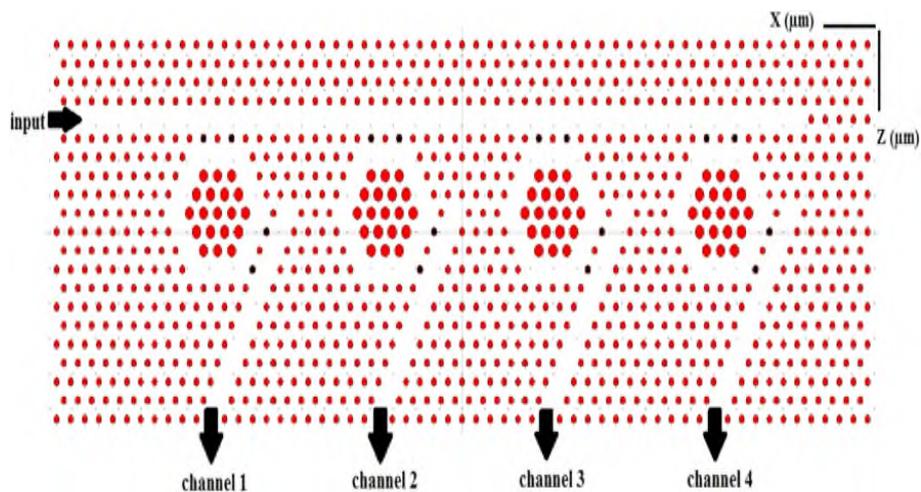
Généralement, les composants à multiplexage en longueur d'onde (WDM, Wavelength Division Multiplexing) sont réalisés en utilisant des filtres à couche mince, des réseaux de Bragg ou des réseaux de guides d'ondes. Toutefois, ces dispositifs ne sont pas pratiques pour une intégration ultra-dense. Lors de ces dernières années, il a été démontré que les cristaux photoniques, notamment les bidimensionnels, étaient des candidats prometteurs pour l'intégration de diverses fonctions pour les réseaux de communication tout optiques.

Différentes techniques ont déjà été présentées dans la littérature pour démultiplexer un signal grâce aux cristaux photoniques. Tout d'abord, il est possible d'utiliser le couplage entre

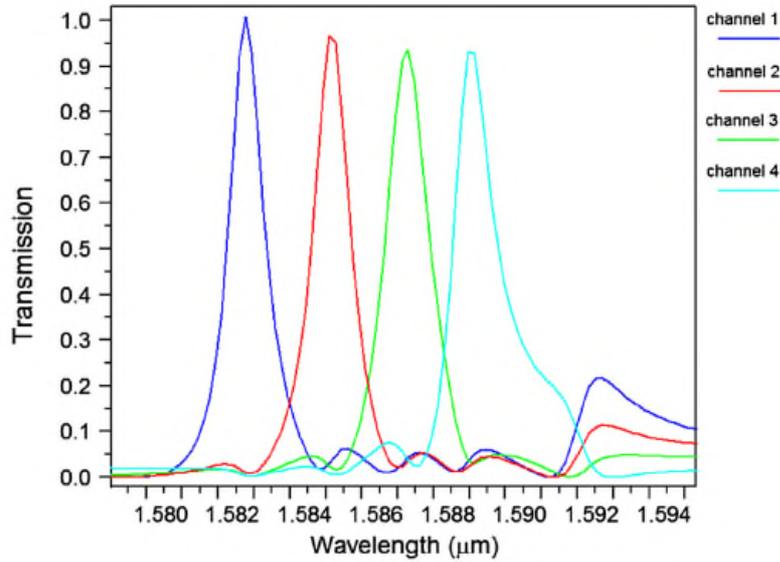
Chapitre II : Filtrage dans les cristaux photoniques

deux guides à cristaux photoniques séparés par une faible distance, ces guides forment ce qu'on appelle un coupleur directionnel [40,41]. On peut aussi se servir du couplage entre deux guides et une cavité formant un filtre sélectif en longueur d'onde [42,43]. Enfin, l'effet super prisme permet également de réaliser un démultiplexage en longueur d'onde [44, 45].

Le filtre à extraction à base de résonateur en anneau à cristaux photoniques est un autre dispositif très utilisé pour la conception des démultiplexeurs optiques. Récemment, différentes structures ont été proposées pour réaliser des démultiplexeurs optiques en utilisant des PCRR de diverses formes [46, 47, 48,49, 50, 51, 31]. La figure II.14 extraite de la référence [51] représente la structure schématique d'un démultiplexeur 4 canaux conçue à partir d'un filtre à extraction (système à trois ports) à base d'un résonateur en anneau de forme hexagonale. Les longueurs d'ondes désirées à la sortie de chaque canal sont obtenues en modifiant les rayons des tiges intérieures de chaque résonateur. Les résultats de la simulation ont montré que cette structure possède de bonnes performances et ont révélé une puissance transmise moyenne supérieure à 95.8 %, l'espacement des canaux est d'environ 2 nm. Les valeurs minimale et maximale de la diaphonie entre les canaux de sortie dans cette structure sont d'environ -14 et -27 dB, respectivement.



(a)



(b)

Figure II.14:(a) Structure schématique et (b) spectres de transmission normalisée du démultiplexeur proposé par [51].

Les auteurs de la référence [31], eux aussi ont proposé un démultiplexeur à partir d'un CDF à trois ports (figure II.15). La structure de base du filtre utilisé est constituée d'un PCRR de forme carrée. Dans leur dispositif, la sélection des longueurs d'onde pour chaque canal se fait en modifiant les rayons des tiges intérieures de chaque résonateur. Leurs calculs théoriques donnent une transmission moyenne de 78% du signal. Les valeurs minimale et maximale de la diaphonie entre les canaux de sortie dans cette structure sont d'environ -12 et -24 dB, respectivement.

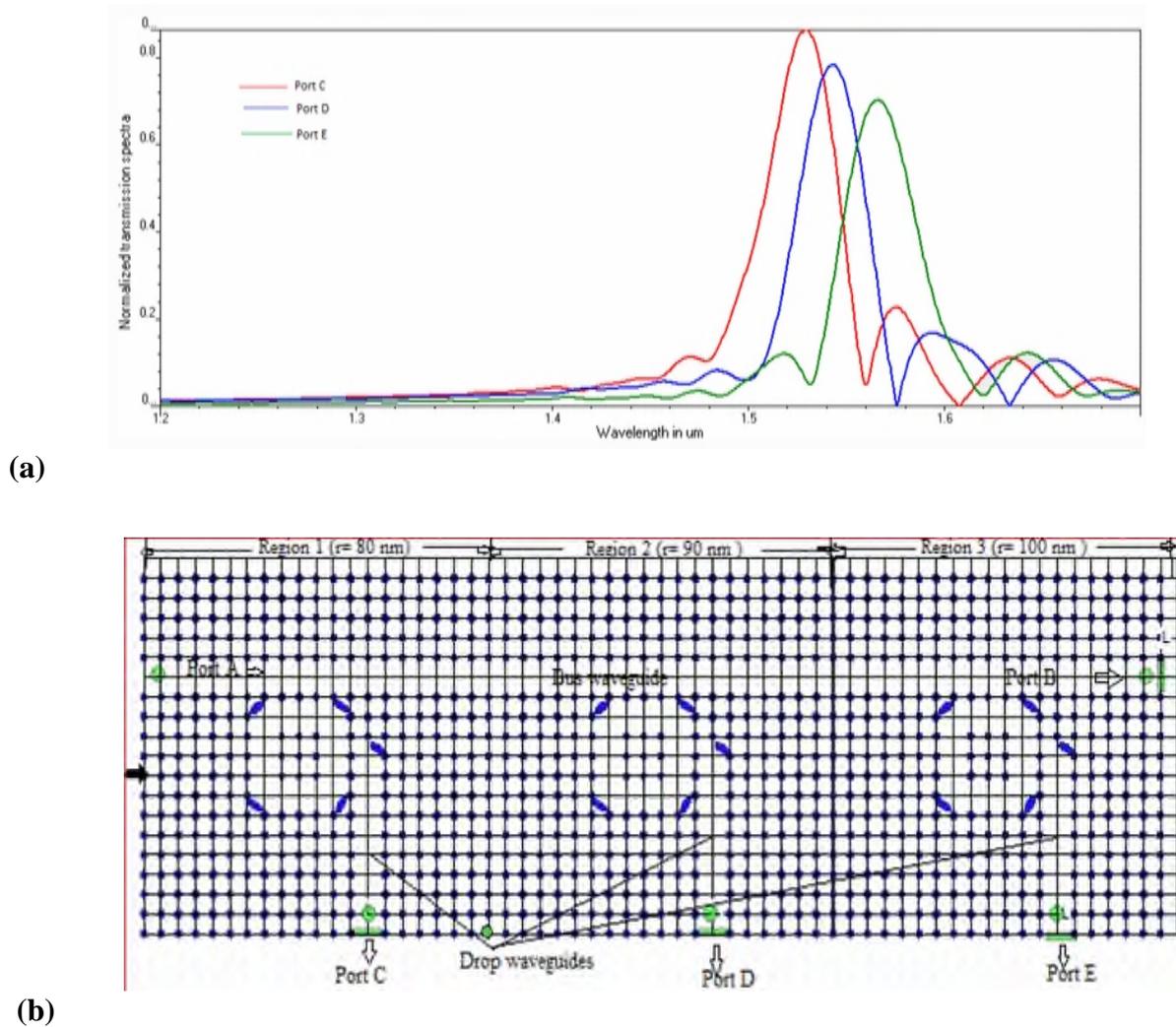


Figure II.15 :(a) Structure schématique et (b) spectres de transmission normalisée du démultiplexeur proposé par [31].

Chapitre II : Filtrage dans les cristaux photoniques

II.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons évoqué les filtres optiques et plus précisément les filtres à extraction à base de résonateurs en anneaux à cristaux photoniques. Différents exemples portant sur la conception de ces filtres à base de différents PCRRs ont été présentés. Grâce à leurs propriétés optiques importantes comme la sélectivité spectrale élevée, ces dispositifs sont considérés comme des candidats prometteurs pour la conception de démultiplexeurs en longueurs d'onde.

Chapitre II : Filtrage dans les cristaux photoniques

Références du chapitre II

- [1] S Bilal. L. Fares. “Conception des filtres à base des cristaux photoniques ”, mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2018.
- [2] B. Hanane. “Conception des filtres ultra-sélectifs hauts débits pour les systèmes DWDM ”,Mémoire de Master, Université Belkaïd–Tlemcen, 2019.
- [3] Y. Akahane, M. Mochizuki, T. Asano, Y. Tanaka et S. Noda, “Design of a channel drop filter by using a donor-type cavity with high-quality factor in a two-dimensional photonic crystal slab,” App. Phys. Lett., vol.82, N°9, p.1341-1343,2003.
- [4] S. Noda, A. Chutinan et M. Imada, “Trapping and emission of photons by a single defect in a photonic bandgap structure,” Nature, vol. 407, p.608-610,2000.
- [5] C.J.M. Smith, R.M. De La Rue, M. Rattier, S. Olivier, H. Benisty, C. Weisbuch, T.F. Krauss, R. Houdré et U. Oesterle, “Coupled guide and cavity in a two-dimensional photonic crystal,”App. Phys. Lett., vol. 78, N°11, p.1487, 2001.
- [6] H. Takano, Y. Akahane, T. Asano et S. Noda, “In-plane-type channel drop filter in a two-dimensional photonic crystal slab,” App. Phys. Lett., vol.84, vol.13, p. 2226, 2004.
- [7] J. S. Foresi, P. R. Villeneuve, J. Ferrera, E. R. Thoen, G. Steinmeyer, S. Fan, J. D. Joannopoulos, L. C.Kimerling, Henry I. Smith et E. P. Ippen, “Photonic-bandgap microcavities in optical waveguides,” Nature, vol. 390, p. 143,1997.
- [8] A.S. Jugessur, P. Pottier et R.M. De La Rue, “One dimensional periodic photonic crystal microcavity filters with transition mode-matching features, embedded in ridge waveguide,” Elec. Lett., vol. 39, N°4, p. 367,2003.
- [9] T. Yoshie, J. Vuckovic, A. Scherer, H. Chen, et D. Deppe, “High-Quality Slab photonic crystals slab cavities,” Appl.Phys. Lett., vol.79, p.4289-4291,2001.
- [10] C. Grillet, P. Pottier, X. Letartre, C. Seassal, P. Rojo-Romeo, P. Viktorovitch, M. Le Vassord’Yerville, et D. Cassagne, “ Characterisation of 2D photonic crystals cavities on InP membranes,” Eur. Phys. J. AP, vol. 16, p.37,2001.
- [11] S. Arafa. “Étude des composants à base de cristaux photoniques : Application dans le domaine du démultiplexage et de la détection”, thèse de Doctorat, Université Frères Mentouri, Constantine, 2018.
- [12] Vahid Fallahi. Mahmood Seifouril. Saeed Olyae . Hamed Alipour-Banaei. “ Channel drop filter based on photonic crystal ring resonator”, 2018.

Chapitre II : Filtrage dans les cristaux photoniques

- [13] Y.Zheng.S.G.Kang. “Two-Dimensional photonic crystal channel filter based on ring resonator”.physics, 2009.
- [14] L. Wu, M. Wang, “1x2 type photonic crystal power splitter with ring resonators,” *Optik*, vol. 126, pp. 3613–3615, 2015.
- [15] F.L. Hsiao, C. Lee , “Computational study of photonic crystals nano-ring resonator for biochemical sensing,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 10, pp. 1185–1191,2010.
- [16] H. Alipour-Banaei, F. Mehdizadehb, S. Serajmohammadi, “A novel 4-channel demultiplexer based on photonic crystal ring resonators,” *Optik*, vol. 124, pp. 5964–5967,2013.
- [17] Rezzag Bara Fadila. “Etude des micro-résonateurs a base de polymères utilisés dans un filtre des longueurs d’ondes ”, mémoire de Master,Université kasbi merbah ouaegla, 2014.
- [18] RP Photonics Encyclopedia.<https://www.rp-photonics.com/finesse.html>.Finesse.
- [19] L. Ghisa. “Couplage de micro résonateurs. Applications aux fonctions optiques de traitement du signal, thèse de Doctorat, Université Rennes 1,2008.
- [20] R. Bendjelloul, “Etude et caractérisation de circuits photoniques à base de cristaux photoniques de micro piliers : Application aux filtres à base de résonateurs”, thèse de Doctorat’ Université des frères Mentouri-Constantine, 2017.
- [21] S. Robinson and R. Nakkeeran. “Photonic Crystal Ring Resonator Based Optical Filters”, Reviewed: October 19th 2012Published: February 13th 2013.
- DOI: 10.5772/54533
- [22] Z. Qiang, W. Zhou, R.A. Soref. “Optical add-drop filters based on photonic crystal ring resonators,” *Optics Express*, vol. 15, pp. 1823–1831, 2007.
- [23] M. Youcef Mahmoud, G. Bassou, A. Taalbi, and Z. M. Chekroun,“Optical channel drop filters based on photonic crystal ringresonators,” *Opt. Commun.*, vol. 285, pp. 368–372,2012.
- [24] M. Youcef Mahmoud, G. Bassou, F.deFornel and A. Taalbi“Channel drop filterforCWDMsystems” *Opt. Commun.*, vol. 306, pp. 179–184,2013.
- [25] R. Bendjelloul, T. Bouchemat, M. Bouchemat, “An optical channel drop filter based on 2D photonic crystal ring resonator,” *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 30, pp. 2402–2410, 2016.

Chapitre II : Filtrage dans les cristaux photoniques

- [26] M. Seifouri, V. Fallahi, S. Olyaei, "Ultra-high-Q optical filter based on photonic crystal ring resonator," *Photon NetwCommun*, vol. 35, pp.225–230,2018.
- [27]S. Robinson, R. Nakkeeran, "Two dimensional Photonic Crystal Ring Resonator based Add Drop Filter for CWDM systems," *Optik*, vol. 124, pp. 3430–3435,2013.
- [28] F. Mehdizadeh, H. Alipour-Banaei, S. Serajmohammadi, "Channel-drop filter based on a photonic crystal ring resonator,"*Journal of Optics*, vol. 15, pp. 075401,2013.
- [29] M. David, A.Ghaffari, F.Monifi, M. S Abrishamian, "T-Shaped channel drop filters using photonic crystal ring resonators", *Physica E*, vol. 40, pp. 3151-3154,2008.
- [30] H. Alipour-Banaei, M. Jahanara, F. Mehdizadeh, "T-shaped channel drop filter based on photonic crystal ring resonator," *Optik*, vol. 125, pp. 5348–5351, 2014.
- [31] J. Divya, S. Selvendran and A. S. Raja, "Two-dimensional photonic crystal ring resonator-based channel drop filter for CWDM application" *Photonic Network Communications*, vol. 35, pp. 353–363,2018.
- [32] T. Asano, W. Kunishi, M. Nakamura, B.S. Song, S. Noda, "Dynamic Wavelength Tuning of Channel drop Device in Two-dimensional Photonic Crystal Slab," *Electronics Letters*, vol. 41, pp. 37–38,2005.
- [33] G. Bi, Y. Zhang, H. Wang, "Tunable Study of Frequency Selective Filter Based on Photonic Crystal," *Progress In Electromagnetics Research Symposium*, pp. 22–26,2005.
- [34] S. Hadzialic, S. Kim, A.F. Sarioglu, A. Sveinung-Sudbo, O. Solgaard, "Displacement sensing with a mechanically tunable photonic crystal," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 22, pp. 1196–1198,2010.
- [35] O. Levy, B.Z. Steinberg, A. Boag, S. Krylov, I. Goldfarb, "Mechanical tuning of two-dimensional photonic crystal cavity by micro electron mechanical flexures," *Sensors and Actuators A*, vol. 139, pp. 47–52, 2007.
- [36] X. Chew, G. Zhou, F. Siong-Chau, J. Deng, X. Tang, Y. Chong-Loke, "Dynamic tuning of an optical resonator through MEMS driven coupled photonic crystal nano cavities," *Optics Letters*, vol. 35, pp. 2517–2519,2010.
- [37] M.R. Rakhshani, M.A. Mansouri-Birjandi, "Realization of tunable optical filter by photonic crystal ring resonators,"*Optik*, vol. 124, pp. 5377– 5380,2013.

Chapitre II : Filtrage dans les cristaux photoniques

- [38] L.Farah. “Conception des Nouvelles Topologies des Démultiplexeurs Sélectifs à plusieurs canaux en Longueurs d’ondes à base de Cristaux Photoniques Bidimensionnels CPs-2D’”, thèse de Doctorat, Université Abou bakr Belkaïd– Tlemcen –Spécialité: Télécommunications, 2019.
- [39] S. Boscolo, M. Midrio and C. G. Someda, “Coupling and decoupling of electromagnetic waves in parallel 2D photonic crystal waveguides”, IEEE Journal of Quantum Electronics, vol. 38, n° 1, pp. 47-53, 2002.
- [40] M. Koshiba, “Wavelength division multiplexing and demultiplexing with photonic crystal waveguide couplers”, Journal of Lightwave Technology, vol. 19, n° 12, pp. 1970-1975, 2001.
- [41] A. S. Sharkawy, S. Shi, D. W. Prather et R. A. Soref, “Electro-optical switching using coupled photonic crystal waveguides”, Optics Express, vol. 10, n° 20, pp. 1048-1059, 2002.
- [42] C. Jin, S. Han, X. Meng, B. Cheng et D. Zhang, “Demultiplexer using directly resonant tunneling between pointdefects and waveguides in a photonic crystal”, Journal of Applied Physics, vol. 91, n° 7, pp. 4771-4773, thèse de Doctorat, 2002.
- [43] E. Drouard, H. Hattori, C. Grillet, A. Kazmierczak, X. Letartre, P. RojoRomeo et P. Viktorovitch, “Directional channel-drop filter based on a slow Bloch mode photonic crystal waveguide section”, Optics Express, vol. 13, n° 8, pp. 3037-3048, 2005.
- [44] H. Kosaka, T. Kawashima, A. Tomita, M. Notomi, T. Tamamura, T. Sato et S. Kawakami, “Photonic crystals for micro lightwave circuits using wavelength dependent angular beam steering”, Applied Physics Letters, vol. 74, n° 10, pp. 1370-1372, 1999.
- [45] T. Matsumoto, S. Fujita et T. Baba, “Wavelength demultiplexer consisting of Photonic crystal superprism and superlens”, Optics Express, vol. 13, n° 26, pp. 10768-10776, 2005.
- [46] H. Alipour-Banaei, F. Mehdizadeh, S. Serajmohammadi, “A novel 4-channel demultiplexer based on photonic crystal ring resonators,” Optik, vol. 124, pp. 5964–5967, 2013.
- [47] M. Djavid, F. Monifi, A. Ghaffari, M.S. Abrishamian, “Heterostructure wavelength division demultiplexers using photonic crystal ring resonators,” Optics communication, vol. 281, pp. 4028–4032, 2008.

Chapitre II : Filtrage dans les cristaux photoniques

- [48] H. Alipour-Banaei, F. Mehdizadeh, S. Serajmohammadi “Optical wavelength demultiplexer based on photonic crystal ring resonators,” *Photonic Network Communications*, vol. 29, pp. 146–150, 2015.
- [49] M.R. Rakhshani, M.A. Mansouri-Birjandi, “Design and simulation of wavelength demultiplexer based on heterostructure photonic crystals ring resonators,” *Physica E*, vol. 50, pp. 97–101, 2013.
- [50] M.A. Mansouri-Birjandi, M.R. Rakhshani, “A new design of tunable four-port wavelength demultiplexer by photonic crystal ring resonators,” *Optik*, vol. 124, pp. 5923–5926, 2013.
- [51] Vahid Fallahi. Mahmood Seifouri. Saeed Olyaei. Hamed Alipour-Banaei. “Four-channel optical demultiplexer based on hexagonal photonic crystal ring resonators”, *Journal of optoelectronic Nanostructures*, 2017.

Chapitre III

Résultat et Interprétation

Chapitre III : Résultats et interprétations

III.1. Introduction :

Au cours des dernières décennies, l'effort de nombreux groupes de recherche dans le monde a été axée sur l'étude et le développement d'une nouvelle génération de dispositifs photoniques basés sur des structures à bande interdite photonique (BIP), également appelé cristaux photoniques (CPs).

La conception des composants utilisés en télécommunications tout optique à base de cristaux photoniques représente le point fondamental de notre étude. En effet, l'étude des caractéristiques de ces matériaux est indispensable pour concevoir des composants optimaux qui répondent aux critères de conception.

Dans ce chapitre, nous allons présenter une description détaillée du logiciel de simulation Rsoft, avec ses modules de simulation BondSolve et FullWAVE, que nous avons utilisé dans notre travail pour la modélisation des structures à base de cristaux photoniques. L'un est développé pour obtenir la bande interdite photonique et l'autre pour contrôler le spectre de transmission et la propagation du champ électromagnétique dans les structures périodiques. De point de vue de simulation, nous allons utiliser d'une manière générale les deux techniques numériques de simulation FDTD et PWE pour la modélisation des structures à bande interdite photonique à deux dimensions.

Dans notre travail, nous présentons une analyse générale des structures de filtre à extraction composées de deux guides d'ondes et d'un résonateur à cristal photonique. Nous montrons que 100% de transfert entre les deux guides d'ondes peut se produire par 'intermédiaire du résonateur en anneau.

Chapitre III : Résultats et interprétations

III.2. Présentation du simulateur RSoft :

Le Rsoft CAD est un programme de base de Rsoft tPassive Device, il permet aux chercheurs et ingénieurs de créer des systèmes pour la conception des dispositifs de guide d'onde, des circuits optiques et d'autres dispositifs photoniques. Dans Rsoft, il existe plusieurs modules intégrés, chaque module assure une fonction bien précise [1], tels que : Beam PROP, Full WAVE, Band SOLVE, Grating MOD et Diffract MOD. Dans notre travail, nous avons utilisé les deux modules : BandSOLVE, et FullWAVE.

La figure (III.1) représente la fenêtre du programme RSoft CAD où on trouve :

- ❖ En haut : une barre de menus.
- ❖ À gauche : une barre d'outils qui porte plusieurs icônes.
- ❖ En bas : une barre d'état.

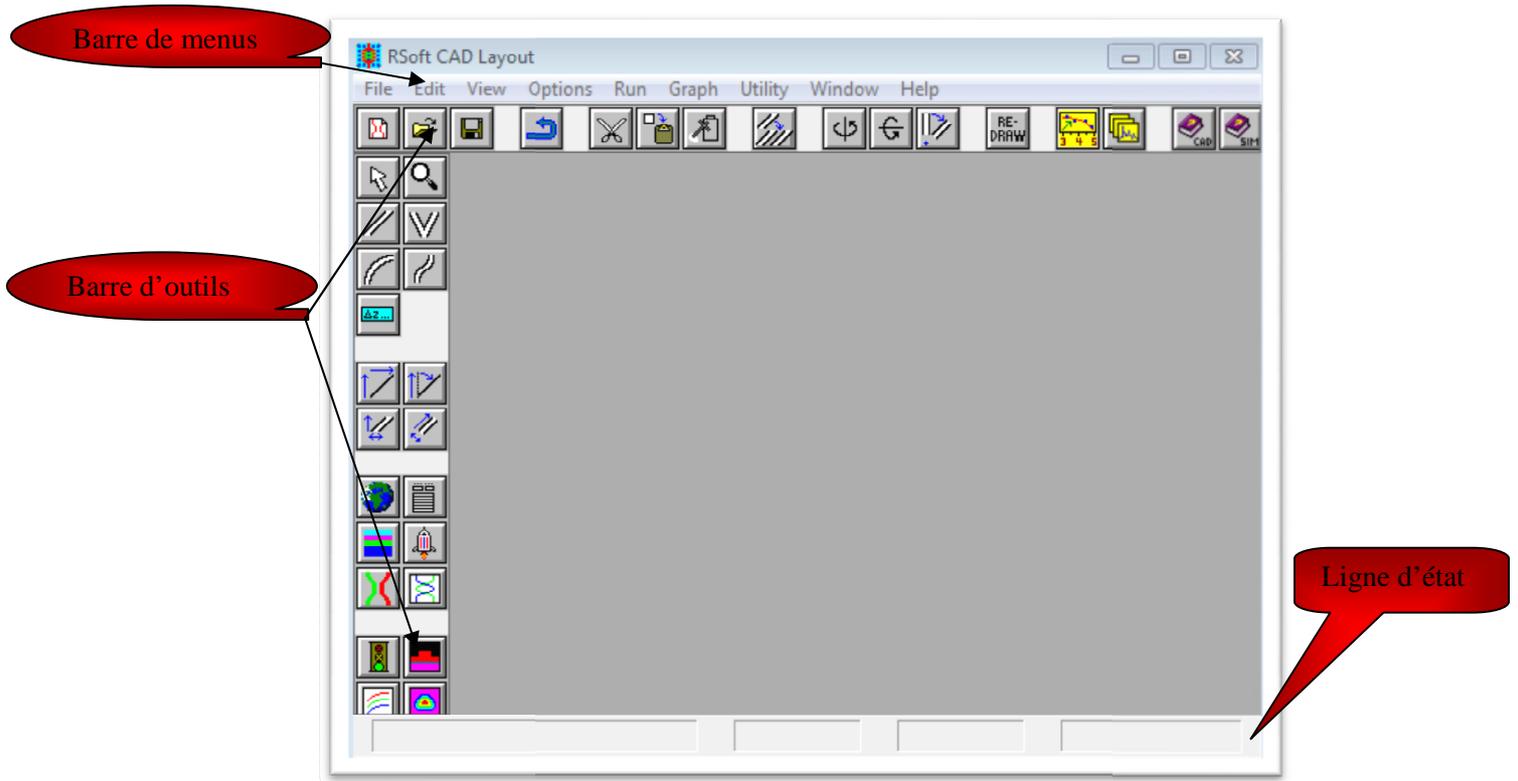


Figure III.1 : La fenêtre de programme de RSoft CAD

Chapitre III : Résultats et interprétations

III.2.1. Modules de simulation associés

III.2.1.1. BandSOLVE

BandSOLVE est un module de simulation pour la génération et l'analyse des structures à bandes interdites photoniques. Ce module de simulation utilise la méthode des ondes planes (PWE) pour calculer les bandes interdites des structures périodiques.

BandSOLVE est idéal pour la réalisation des diagrammes de bande pour les structures à bande interdite photonique classique, tels que 2D et 3D. En outre, il peut être appliqué à des structures de fibres telles que les fibres à bande interdite photonique, qui sont particulièrement difficiles pour les autres techniques de simulation [2].

En particulier, BandSOLVE est particulièrement utile pour l'optimisation des propriétés des structures de bandes des cristaux photoniques, qui sont ensuite simulées dans le FullWAVE afin d'examiner la propagation de la lumière dans les matériaux à BIP.

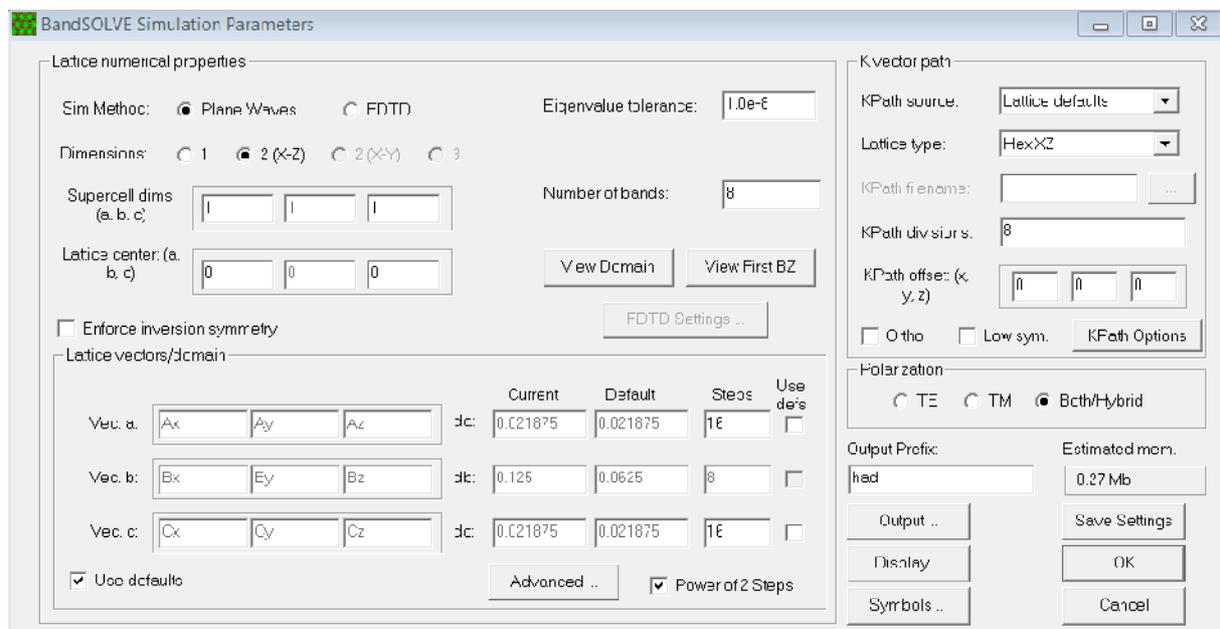


Figure III.2 : La fenêtre principale de BandSolve

III.2.1.2. FullWAVE

Le moteur de simulation FullWAVE est une partie de Rsoft photonique, Il est basé sur la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD) [2]. Il calcule le champ électromagnétique en fonction du temps et de l'espace dans une structure d'index donné en réponse à une excitation électromagnétique donnée. Le FullWAVE est idéal pour étudier la propagation de la lumière dans une grande variété de structures photoniques.

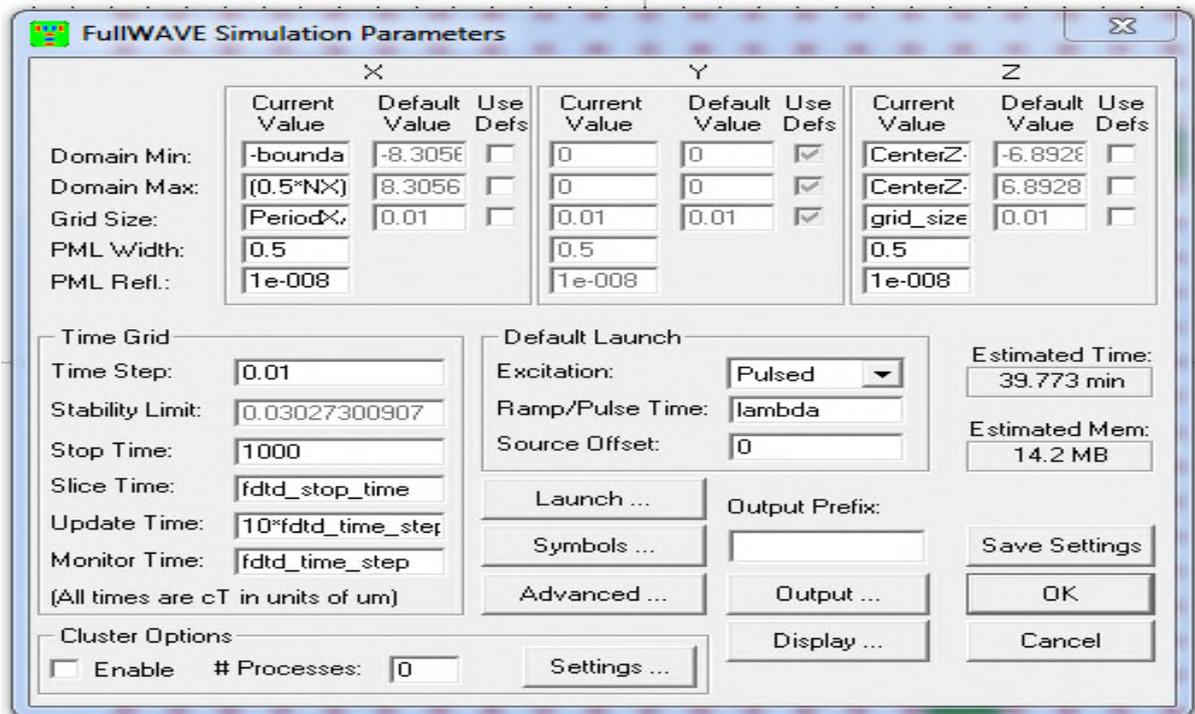


Figure III.3 : La fenêtre principale de FullWAVE

III.3. Description de la structure étudiée

Dans notre travail, la structure que nous avons proposée est conçue en utilisant un cristal photonique bidimensionnel de piliers de silicium ($n_{\text{Si}}=3.48$) plongés dans l'air ($n_{\text{air}}=1$). Les piliers de Si ont une section circulaire et sont réparties selon un réseau carré, comme le montre la figure III.4. Le nombre de tiges dans les directions X et Z est de 21. La distance entre le centre de deux tiges adjacentes est de $a=0.6703 \mu\text{m}$, appelée constante du réseau. Le rayon des tiges est de $r=0.107*a \mu\text{m}$.

Nous avons choisi le silicium car c'est un matériau prometteur, particulièrement dans le domaine de la photonique. En effet, son indice de réfraction élevé et sa transparence aux longueurs d'onde des télécommunications permettent la création de résonateurs et guides d'ondes à fort confinement du champ électromagnétique. De plus, sa technologie est bien maîtrisée actuellement et compatible avec les technologies de la microélectronique.

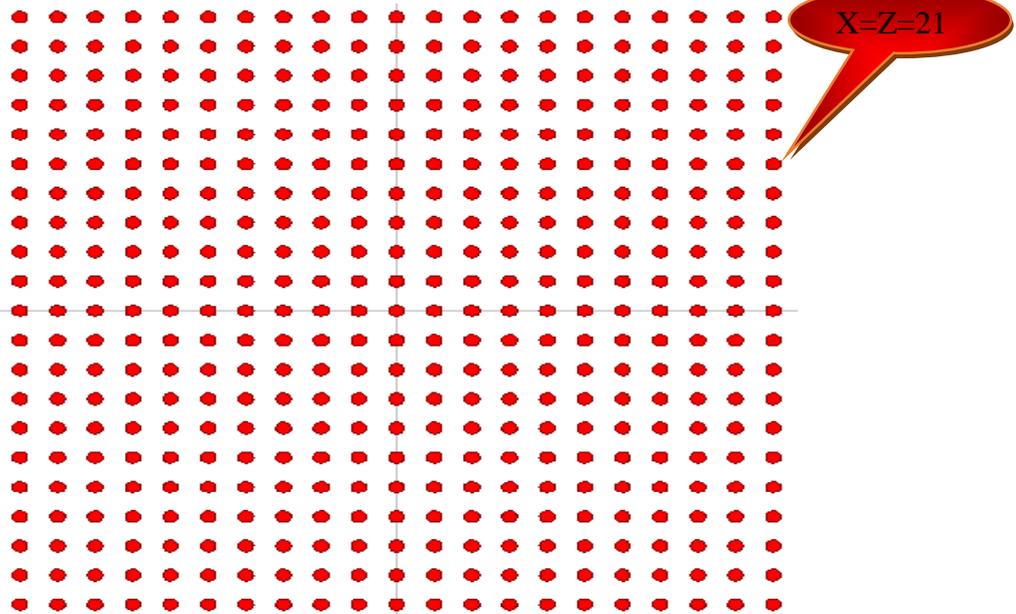


Figure III.4 : Structure schématique d'un CP-2D formé par un réseau carré de pas $a = 0.6703\mu\text{m}$ de tiges cylindriques d'indice de réfraction $n = 3.48$ entourées par l'air.

Un cristal de base à maille carrée a été adopté. Ce choix est justifié par le fait que ce type de réseau est mieux adapté aux formes des PCRRs (forme carré et circulaire) que le réseau triangulaire. Les paramètres du réseau carré des piliers sont choisis pour ouvrir une bande interdite aux alentours de la gamme de longueur d'onde souhaitée.

Les propriétés de dispersion de la structure à CP sans défaut sont analysées en utilisant la méthode 2D-PWE du logiciel BandSolve. Les simulations seront effectuées pour les modes TE et TM pour connaître le comportement des structures à BIP.

Le diagramme de bandes de cette structure est représenté sur la figure III.5. De cette figure, on constate l'existence de deux bandes interdites photoniques qui apparaissent seulement pour le mode de propagation TM (Transverse Magnétique) et entre ces deux bandes, c'est la plus grande qui sera exploitée. De la figure III.5, on peut aisément voir que le plus grand gap photonique est situé entre $0.402 < a/\lambda < 0.492$, ce qui fournit une bande interdite photonique pour les longueurs d'ondes situées entre $1.362\mu\text{m} < \lambda < 1.667\mu\text{m}$. Dans ce cas, une onde électromagnétique incidente dans le plan perpendiculaire au réseau des tiges sera réfléchi, si sa fréquence est comprise dans l'intervalle spectral précédent. Le calcul des bandes interdites est réalisé par le module BandSolve du simulateur Rsoft.

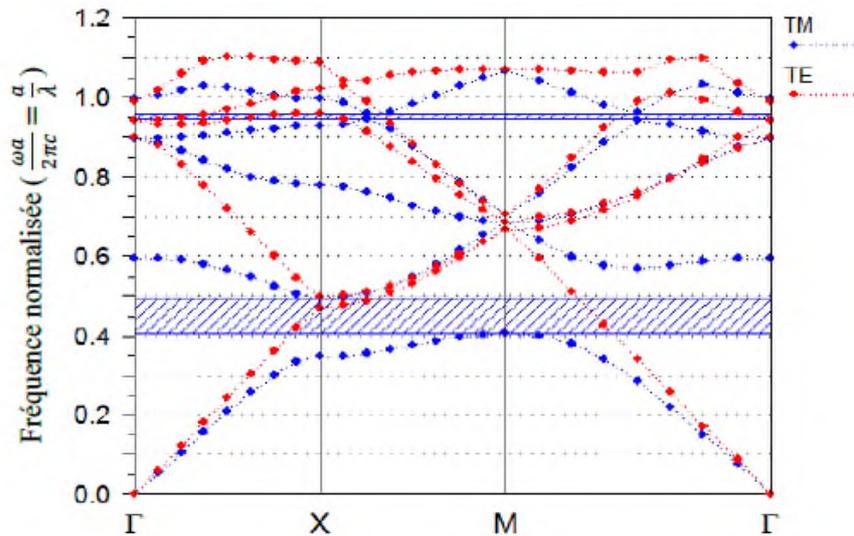


Figure III.5 : Diagramme de bandes d'un CP-2D constitué par un réseau carré.

III.3.1. Étude de filtre Channel-drop à base d'un résonateur en anneau à cristaux photoniques

III.3.1.1. Structure de base

Dans notre étude, La structure de filtre a extraction (channel drop filtre) en forme de T considéré est représentée sur la figure III.6, Il est composé de deux guides d'onde et d'un résonateur en anneau à cristal photonique, en forme de carré, placé entre les deux guides d'onde. La partie interne du résonateur à une forme circulaire, elle est créée en déplaçant huit tiges (indiquées en bleu sur la figure III.6) de leur position initiale. Les tiges situées à l'intérieur du PCRR sont appelées tiges intérieures tandis que les tiges de couplage sont celles placées entre le PCRR et les guides d'ondes.

La distance qui sépare le résonateur et chaque guide d'onde est désignée par la distance de couplage (D_c), elle est de deux rangées de piliers. Le port d'entrée et les ports de sortie sont étiquetés respectivement A, B et C.

Le guide d'onde supérieur (guide bus) est appelé guide d'onde d'entrée ; il est créé par l'omission d'une rangée de tiges du cristal photonique dans la direction horizontale. Tandis que le deuxième guide (guide drop) est appelé guide d'onde de sortie ; Il est créé en supprimant quelques motifs du cristal photonique dans la direction verticale. Le port du signal d'entrée est marqué source. Les tiges situées à l'intérieur du PCRR sont appelées tiges intérieures tandis que les tiges de couplage sont celles placées entre le PCRR et les guides d'ondes.

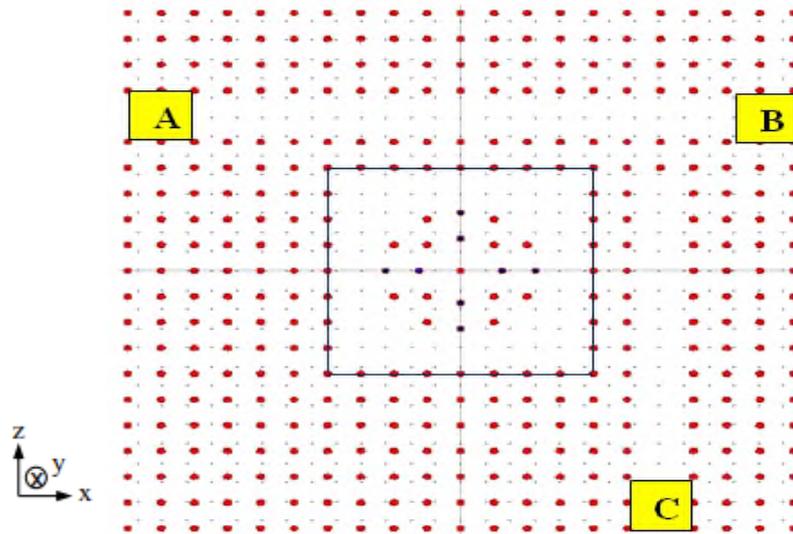


Figure III.6 : Structure schématique du CDF en forme de T proposé.

Les caractéristiques les plus importantes de ce filtre sont l'efficacité d'extraction et le facteur de qualité. Ils sont obtenus à partir du spectre de transmission du filtre à extraction. Le calcul FDTD-2D fait par le logiciel FullWave de RSoft, permet de tracer le spectre de transmission.

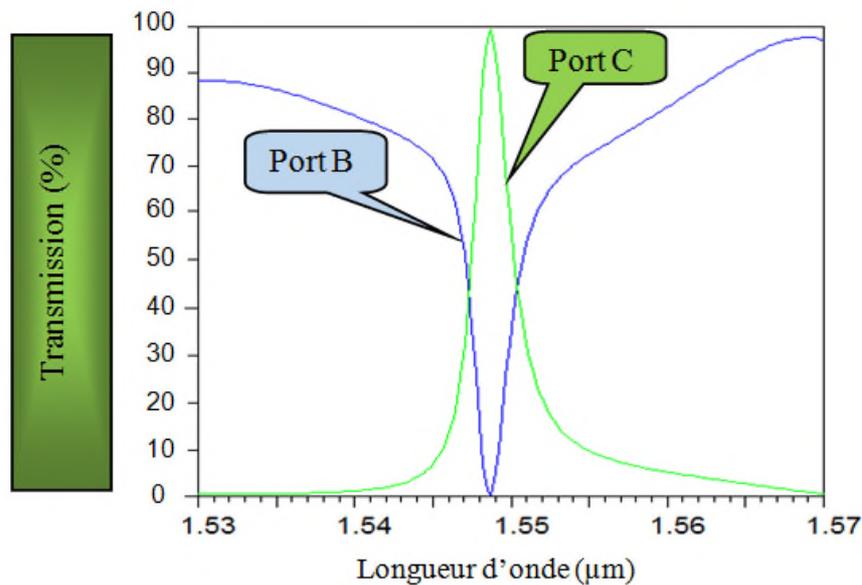


Figure III.7 : La réponse spectrale du filtre CDF en forme de T.

La figure III.7 représente le spectre de transmission du CDF, qui présente l'existence d'un pic résonant à $\lambda = 1,548\mu m$, Obtenu à la sortie du port C. Ce pic est caractérisé par un taux de transmission de 99.59 %, qui correspond à l'efficacité d'extraction du filtre, et un facteur de qualité de 543.49. Les résultats obtenus restent encore à améliorer.

Chapitre III : Résultats et interprétations

III.3.1.2. Structure modifiée

Afin d'améliorer les caractéristiques de notre filtre, deux solutions sont possibles :

- La première solution réside dans la modification de la structure du PCRR, par modification de sa géométrie, ou de ses contours. En effet, la courbure à 90° à chaque coin du résonateur donne naissance à des modes de contre-propagation qui peuvent provoquer des oscillations parasites dans le spectre de transmission. Pour cela, nous allons introduire des tiges localisées (dites tiges de dispersion) à chaque coin du PCRR. Cette technique a été investiguée pour la première fois par Kumar et al. [3], elle améliore de manière significative les résultats de transmission de la structure sans tiges de dispersion.
- La deuxième solution est basée sur la modification de la distance de couplage entre le PCRR et les deux guides d'onde. En effet, la valeur du facteur de qualité calculé dans le cas du résonateur couplé aux guides d'onde est trop faible par rapport à celle obtenue pour un résonateur isolé (non couplé). Ce résultat est due au fait qu'en approchant un guide d'onde d'un résonateur en anneau de facteur de qualité Q , on permet aux parties évanescentes des champs du guide et du résonateur de se coupler. Le facteur de qualité Q du résonateur est alors réduit par les pertes dues au couplage entre le guide et le résonateur. On peut donc dire que l'écart entre les deux valeurs du facteur Q est principalement dû au faible confinement dans les sections de couplage entre les deux guides d'onde et le PCRR. Afin d'acquérir un facteur de qualité Q du filtre le plus élevé possible, la distance de couplage (D_c) entre les guides et le résonateur doit être ajustée de façon à réaliser un bon confinement dans les sections de couplage.

III.3.1.2.1. Introduction des tiges de dispersion

Afin de remédier au problème des modes de contre-propagation du aux coins tranchants du résonateur, nous avons adopté la technique proposée par Kumar et al. Dans un premier temps, nous avons ajouté une tige au coin de la partie haute du guide d'onde drop avec une constante de demi-réseau dans le but d'éviter les pertes de propagation en réduisant les pertes par courbures dans ce dernier. Ensuite, Nous avons introduit une tige de dispersion dans chaque coin du résonateur. Les quatre tiges de dispersion sont représentées en vert pour être distinguées des autres tiges. Le rayon et l'indice de réfraction de ces tiges sont les mêmes que celles de la structure fondamentale. La structure finale du CDF modifié est reportée sur la figure III.8.

Chapitre III : Résultats et interprétations

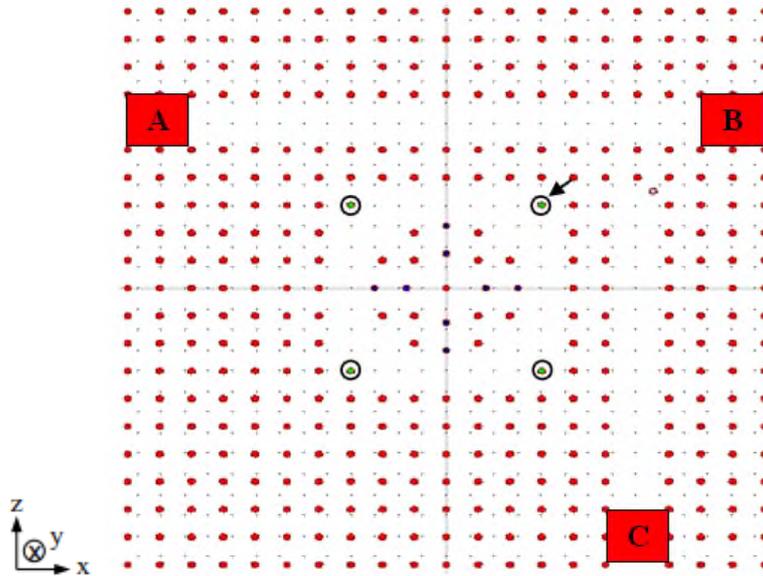


Figure III.8 : Structure du CDF avec l'insertion des tiges de dispersion.

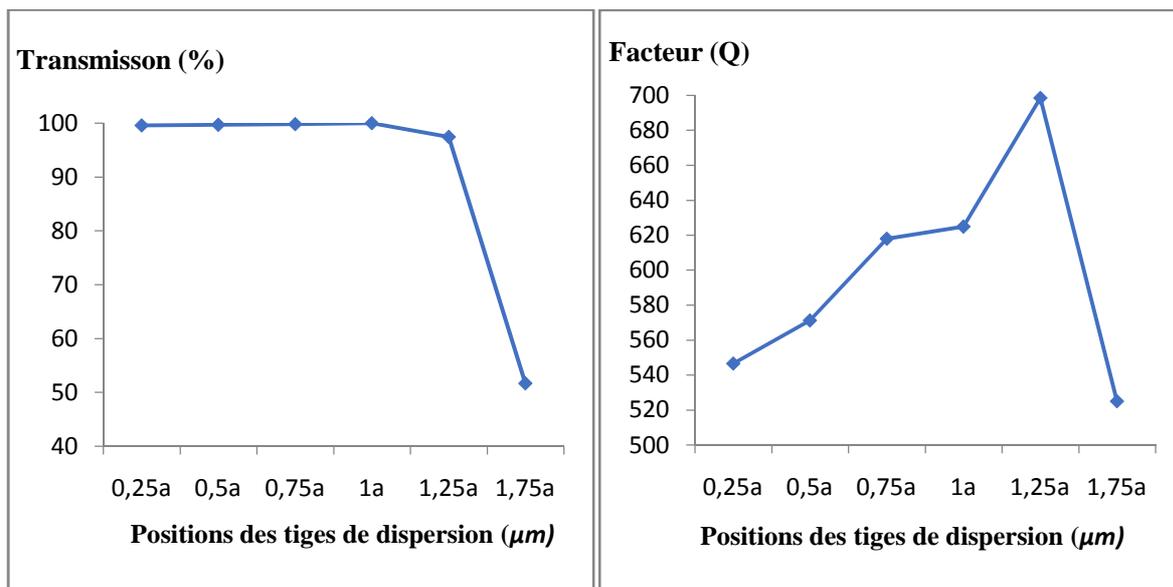
Nous nous intéressons dans cette partie à optimiser la position des tiges de dispersion ajoutées pour aboutir aux meilleurs résultats, La position optimale de celles-ci est obtenue, en les déplaçant suivant l'axe X et Z à partir de chaque coin du résonateur (indiquer avec une flèche noir sur la figure III.8). Un tableau explicatif (tableau III.1) viendrait dans ce qui suit pour montrer clairement les positions de ces tiges, l'efficacité de transmission, le facteur de qualité et la longueur d'onde obtenus.

X=Z	λ (μm)	Transmission(%)	Facteur (Q)
$P_1=0.25*a$	1.54846	99.59	546.49
$P_2=0.5*a$	1.54902	99.68	571.23
$P_3=0.75*a$	1.54972	99.81	617.91
$P_4=1*a$	1.55014	100	624.89
$P_5=1.25*a$	1.55144	97.42	698.60
$P_6=1.5*a$	1.56011	51.68	524.99

Tableau III.1 : Caractéristiques du CDF proposé pour différentes positions des tiges de dispersion

Chapitre III : Résultats et interprétations

Comme on peut le voir sur le tableau précédant, nous avons pu améliorer non seulement l'efficacité d'extraction de notre filtre, mais aussi le facteur de qualité Q avec une valeur de 624.89 relevée à la position P_4 tout en gardant le mode résonant aux alentours de $1.55 \mu m$. Ce qui signifie que chaque tige introduite dans le résonateur agit comme un réflecteur à angle droit réduisant ainsi les pertes par courbures dans chaque coin. Pour mieux percevoir l'influence de la position des quatre tiges de dispersion sur les l'efficacité d'extraction et le facteur de qualité, nous représentons les résultats sous forme de graphes et nous les présentons sur la figure III.9.



(a)

(b)

Figure III.9 : (a) Transmission et (b) Facteur de qualité du CDF en fonction des positions des tiges de dispersion.

III.3.1.2.2. Modification des rayons des tiges de dispersion

Une autre piste peut être explorée afin d'améliorer le taux de puissance transférée vers le guide d'onde drop (port C), cette méthode est inspirée des travaux de plusieurs groupes de recherches [4, 5, 6], Cette piste consiste à étudier la dépendance de la transmission en fonction des rayons des tiges de dispersion situées aux différents coins externes du PCRR. Pour ce faire, nous allons faire varier la valeur des rayons de ces quatre tiges. Cette variation va apporter des améliorations significatives aux caractéristiques de notre CDF, tout en gardant la position optimale des tiges de dispersion trouvée précédemment.

Chapitre III : Résultats et interprétations

Les résultats obtenus sont reportés sur le tableau III.2. Il est donc clair que la transmission optimale (100%) obtenue est relevée à $\lambda=1.55014 \mu\text{m}$ pour le rayon r_2 . On a noté également une valeur maximale du facteur de qualité qui est égale à 624.89. Le facteur de qualité rend compte de la capacité du résonateur à piéger la lumière et représente la mesure des pertes. À la résonance, le photon subit des réflexions multiples entre les miroirs définissant la cavité et ne sort de celle-ci qu'après un certain temps que l'on peut considérer comme la durée de vie du photon dans le résonateur.



Rayon	$\lambda (\mu\text{m})$	Transmission(%)	Facteur (Q)
$r_1=0.10*a$	1.55001	99.79	621.90
$r_2=0.107*a$	1.55014	100	624.89
$r_3=0.12*a$	1.55043	99.71	625.81
$r_4=0.13*a$	1.55073	99.69	629.66
$r_5=0.14*a$	1.55110	99.65	630.43
$r_6=0.15*a$	1.55158	99.53	626.91
$r_7=0.16*a$	1.55220	99.35	618.31
$r_8=0.17*a$	1.55318	99.23	620.90

Tableau III.2 : Spécifications du CDF proposé pour différentes valeurs des rayons des tiges de dispersion.

La figure III.10 montre mieux l'effet de la variation des rayons des tiges de dispersion sur l'efficacité d'extraction et le facteur de qualité.

Chapitre III : Résultats et interprétations

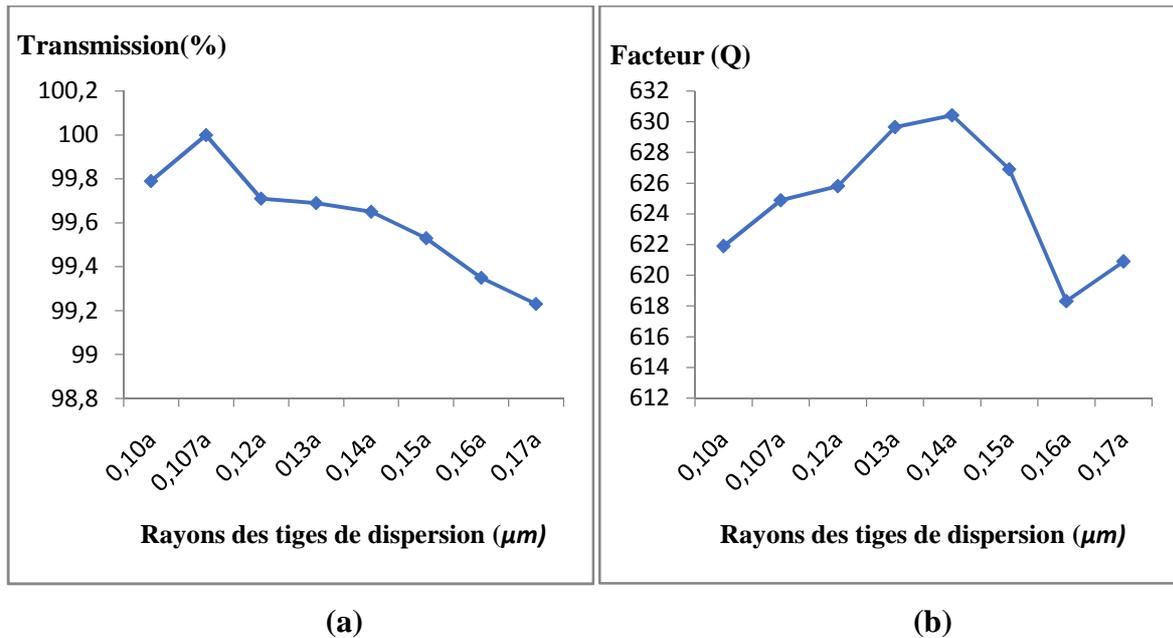
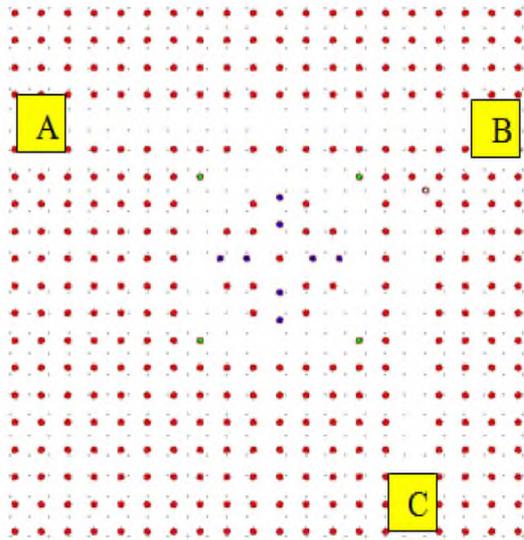


Figure III.10 : (a) transmission et (b) Facteur de qualité du CDF en fonction de la variation des rayons des tiges de dispersion.

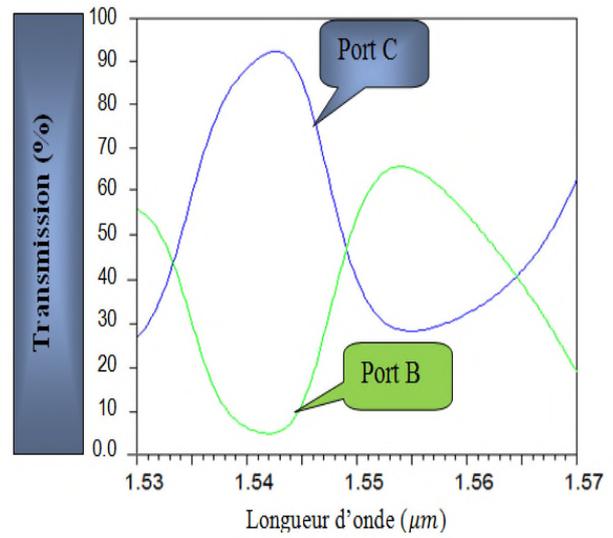
III.3.1.2.3. Modification de la distance de couplage

Dans cette section, nous nous focaliserons sur l'analyse spectrale des performances du filtre à extraction étudié, en fonction de la distance de couplage entre le résonateur et les guides d'ondes. Le but est de transférer Cette distance doit être ajustée de façon à ce que le maximum de puissance lumineuse se propageant dans le guide d'onde bus soit transféré vers le guide d'onde drop.

Sur les figures III.11, III.12 et III.13, Nous avons présentées spectres de transmission du CDF proposé, en fonction de la distance de couplage entre les guides et le PCRR. Plusieurs informations peuvent être collectées à partir de ces figures. Tout d'abord, la puissance transmise dans le guide drop augmente à mesure que les guides d'onde se rapprochent du résonateur (en diminuant D_c). Cela s'explique simplement par le fait qu'en rapprochant les guides, on renforce la force du couplage, permettant ainsi un transfert de la puissance du guide bus vers le guide drop plus important. D'autre part, il est clairement visible qu'à mesure que la distance de couplage augmente, le facteur Q du CDF s'améliore. Cela est du au fait que lorsque les guides d'onde sont loin du résonateur, ce dernier se comporte comme un résonateur seul, induisant à une diminution des pertes de couplage et une augmentation du confinement du résonateur.

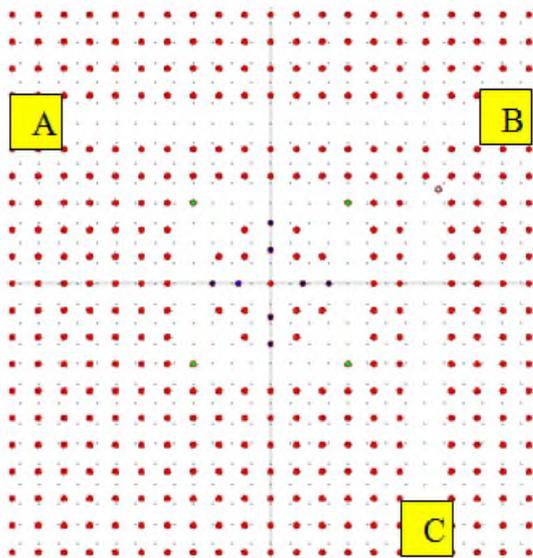


(a)

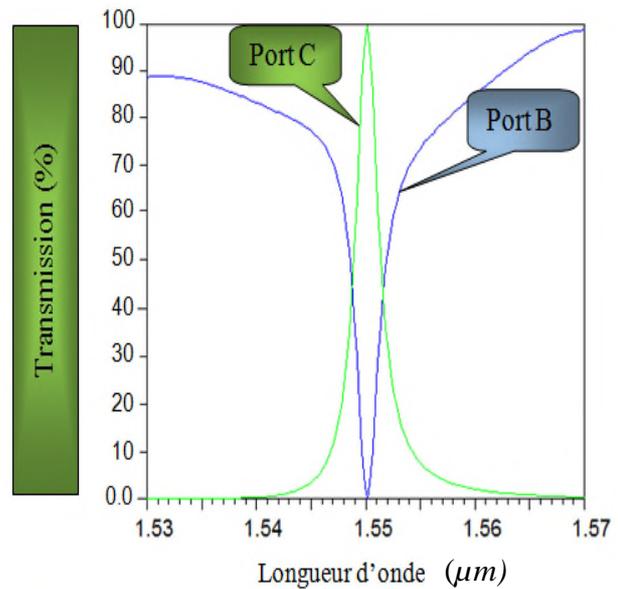


(b)

Figure III.11 : (a) Schématique du CDF a une distance de couple d'une seule rangé (b) son spectre de transmission.



(a)



(b)

Figure III.12 : (a) Schématique du CDF a une distance de couplage de deux rangées (b) son spectre de transmission.

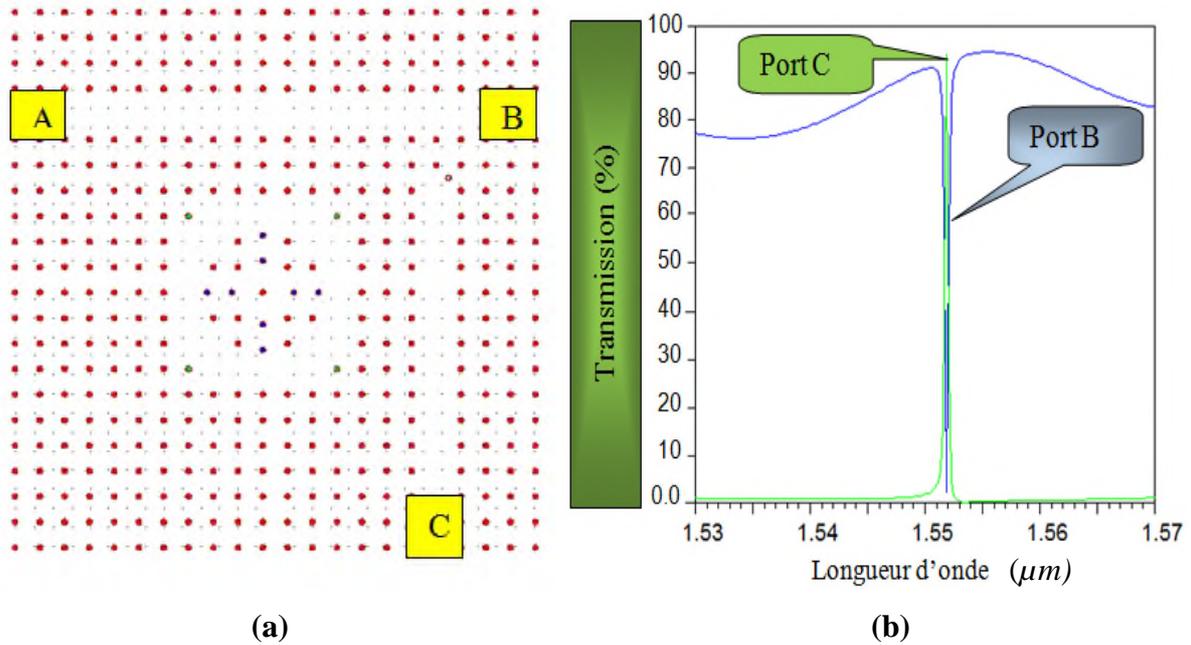


Figure III.13 : (a) Schématic du CDF a une distance de couple de trois rangées (b) son spectre de transmission.

III.3.1.3. Structure finale

Nous venons donc de voir qu'un transfert sélectif en longueur d'onde, entre deux guides d'onde par l'intermédiaire d'un résonateur en anneau à cristal photonique, nous a amené à considérer la possibilité de concevoir un filtre channel drop en forme de T. Dans les conditions optimales (distance de couplage égale deux rangées de tiges, $p=p_4$, $r_s = r$), 100 % de la lumière du guide d'onde bus est effectivement transférée vers le guide d'onde drop au mode résonant situé à $\lambda = 1.55014 \mu m$, avec un bon facteur Q égal à 624.89 (figure III.14.b).

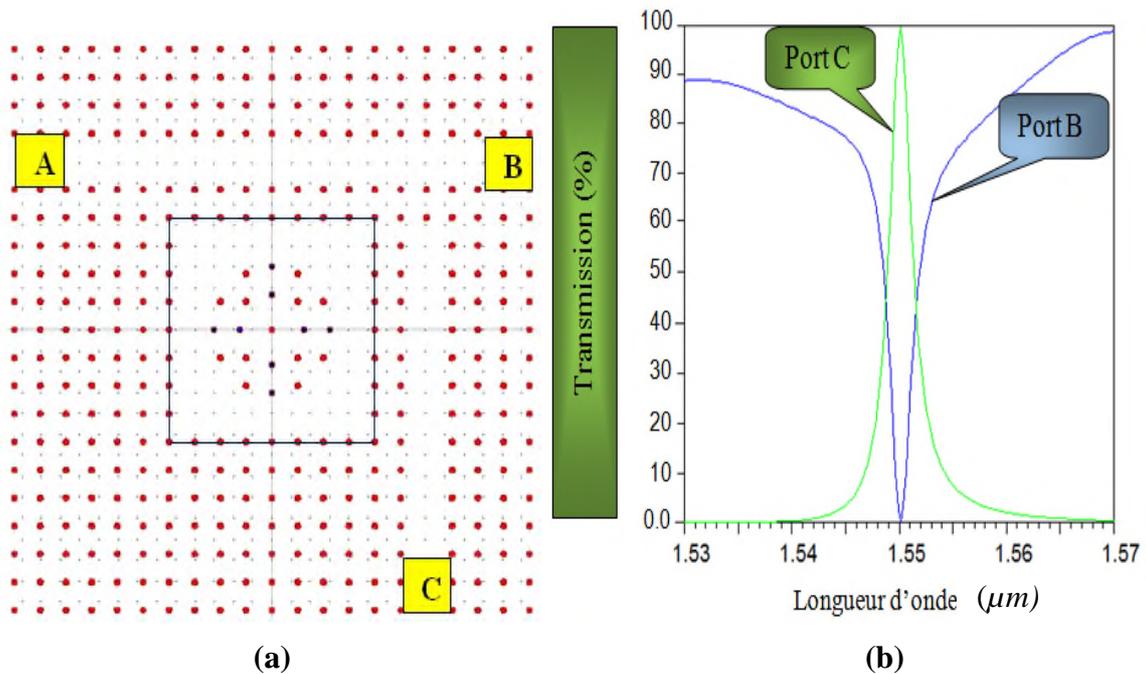


Figure III.14:(a) Schéma final du CDF proposé et (b) sa réponse spectrale

Dans le but de confirmer les performances du filtre étudié, nous avons simulé la distribution du champ électrique pour deux longueurs d'onde différentes : $\lambda_1 = 1.55014 \mu m$ et $\lambda_2 = 1.53 \mu m$.

Les deux cartographies représentant la distribution du champ électrique régnant au sein du PCRR confirment l'existence du phénomène d'extraction et montrent le confinement du champ électromagnétique le long des guides d'ondes. En plus en raison du couplage entre le guide d'onde et le résonateur en anneau à la longueur d'onde de résonance ($\lambda_2 = 1.55014 \mu m$), le signal est complètement extrait du guide d'onde bus et transféré ensuite au guide d'onde drop via le résonateur. Alors qu'en absence de résonance ($\lambda_1 = 1.53 \mu m$), le signal ne se couple pas et continue de se propager dans le guide bus et sort par le port B.

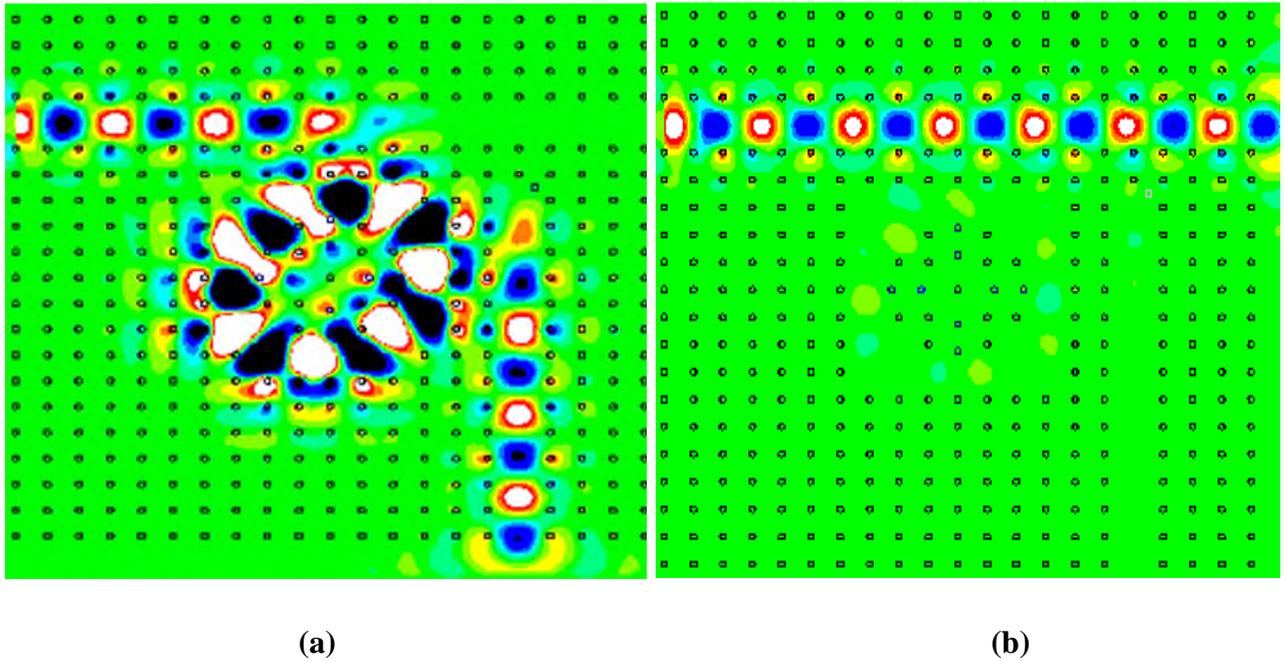


Figure III.15 : Répartition du champ dans le CDF en polarisation T Maux longueurs d'onde : (a) $1.55014\mu m$ (à la résonance) et (b) $1.53\mu m$ (hors résonance).

D'après les résultats obtenus, la structure optimisée constitue une plateforme prometteuse pour des applications de démultiplexage, car elle présente un taux de transmission maximal et un facteur de qualité relativement élevé. De plus, la lumière est confinée dans des volumes très faibles. En comparaison avec d'autres filtres à extraction à base de résonateurs en anneaux à cristaux photoniques, notre filtre présente de meilleures performances que ce que l'on peut trouver dans la littérature [7, 8, 9].

III.4. Paramètres affectant les caractéristiques du filtre

Il est essentiel de noter que pour les applications de ce type de filtre sélectif, le contrôle de sa longueur d'onde de fonctionnement est indispensable. Les paramètres qui permettent ce contrôle, incluent l'indice de réfraction, le rayon des tiges et le pas du réseau.

Dans un premier temps, nous allons varier la valeur de l'indice de réfraction des piliers de toute la structure. Les résultats obtenus sont reportés sur le tableau III.3, et montrent qu'en augmentant la valeur de l'indice de réfraction, la longueur d'onde de résonance se déplace vers des longueurs d'onde plus élevées, alors que la transmission et les facteurs de qualités sont légèrement modifiés.

Chapitre III : Résultats et interprétations

N	λ (μm)	T (%)	Q
3.38	1.53988	99.25	589.62
3.48	1.55014	100	620.89
3.58	1.55932	99.89	869.74

Tableau III.4 : Spécifications du CDF proposé pour différentes valeurs de n.

Nous avons également étudié l'effet de la variation de rayon des tiges de la structure, D'après les résultats reportés dans le tableau III.4, on remarque que la position de la longueur d'onde de résonance dépend de la valeur du rayon r . Par conséquent quand on fait varier le rayon des tiges, on peut atteindre n'importe quelle fréquence située dans la bande interdite photonique. On remarque aussi que lorsqu'on augmente la taille du rayon (r) les longueurs d'ondes de résonance se décalent vers les grandes valeurs avec une légère modification des valeurs de l'efficacité d'extraction et du facteur de qualité.

R	λ (μm)	T(%)	Q
0.102a	1.5388	99.25	610.91
0.107a	1.55014	100	624.89
0.112a	1.55909	99.48	838.45

Tableau III.5 : Spécifications du CDF proposé pour différentes valeurs de (r).

Un autre changement paramétrique est étudié afin de contrôler la longueur d'onde résonnante du filtre channel drop. Il s'agit de la constante de réseau (a). Comme la montre le tableau III.5, en augmentant la valeur de la constante de réseau, la longueur d'onde de résonance se déplace vers des longueurs d'onde plus élevées, quant a la transmission et au facteur de qualité ne changent pas de manière significative.

A	λ (μm)	T(%)	Q
0.6653	1.53845	99.73	623.04
0.6703	1.55014	100	624.89
0.6753	1.56176	99.58	624.63

Tableau III.6 : Spécifications du CDF proposé pour différentes valeurs de a.

Chapitre III : Résultats et interprétations

Généralement, le réglage de la longueur d'onde de résonance de CDF à base de PCRR peut être effectué en modifiant les paramètres structuraux tels que l'indice de réfraction (constante diélectrique), la constante de réseau et le rayon des tiges dans la structure. Parmi ceux-ci, le moyen le plus efficace pour régler la longueur d'onde de résonance (de fonctionnement) de CDF est de changer l'indice de réfraction du matériau car cela n'entraîne pas de dégradation des performances du filtre.

III.5. Démultiplexeur à base de PCRRs

Dans cette section, nous présentons une conception d'un démultiplexeur en longueur d'onde dans un cristal photonique hétéro-structure en utilisant le CDF étudié précédemment comme élément de base. Ce démultiplexeur contient trois régions avec diverses constantes diélectriques comme le montre la figure III.16. Les ports de sortie de la structure sont étiquetés par B, C, D et E.

Afin d'obtenir la structure du démultiplexeur, Trois CDF avec différents indices de réfractifs ($n_1=3.58$, $n_2=3.48$, $n_3=3.38$) ont été utilisés. Chaque filtre a une constante diélectrique différente; cela signifie que chaque filtre a une longueur d'onde de fonctionnement différent.

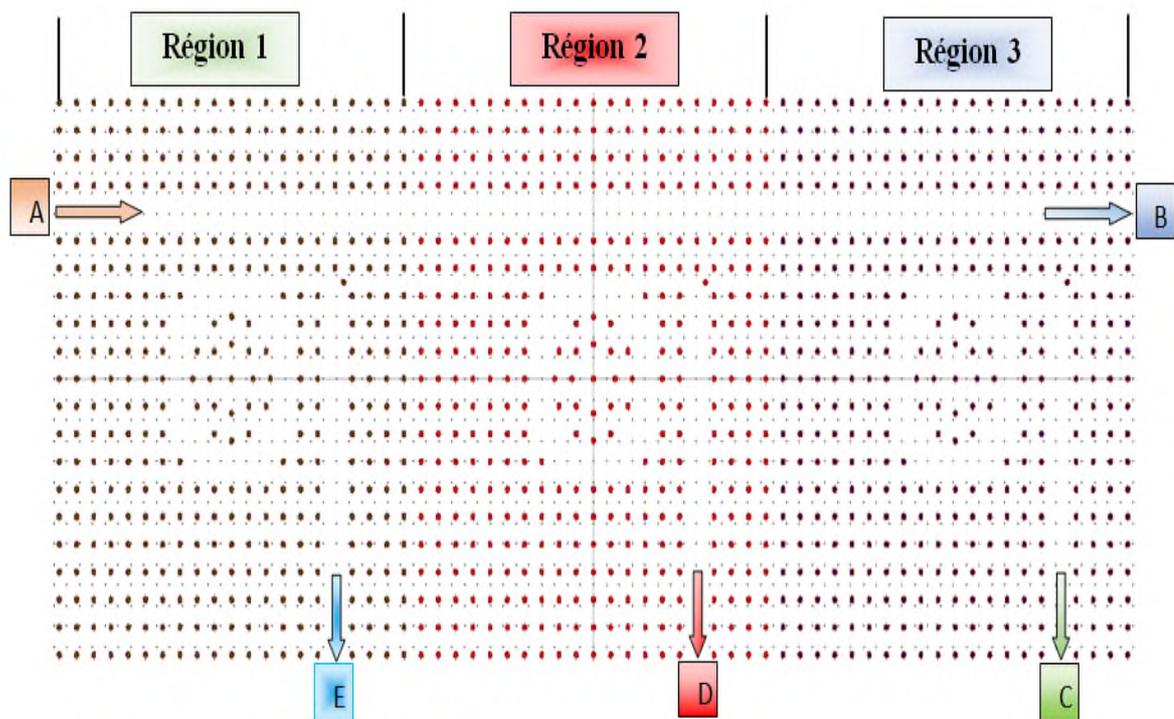


Figure III.16 : Structure schématique du démultiplexeur proposé.

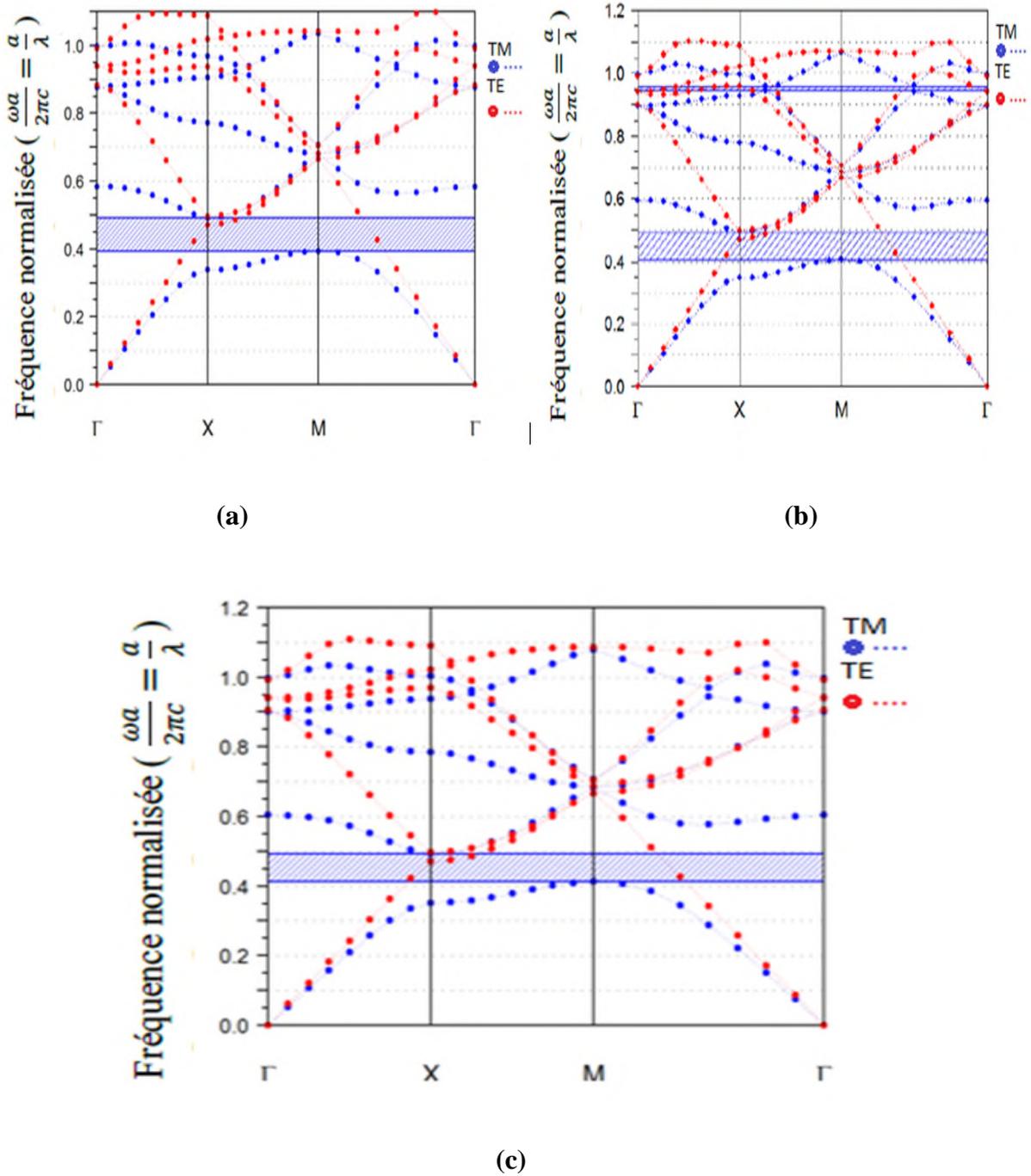


Figure III.17 : Diagramme de bandes d'un CP-2D constitué par un réseau carré de piliers d'indice de réfraction (a) $n = 3.58$, (b) $n = 3.48$, et (c) $n = 3.38$.

La structure du démultiplexeur est appelée une hétéro-structure, car elle est créée à partir de trois sous-structures (régions) d'indice de réfraction différent. Afin d'éviter les pertes de propagation à la frontière des différentes régions, les bandes interdites de ces dernières doivent se chevaucher dans une certaine plage de fréquence. Pour cet effet, nous calculons les

Chapitre III : Résultats et interprétations

BIPs des trois sous-structures séparément en utilisant la méthode des ondes planes, et nous présentons les résultats sur la figure III.18. Les BIPs des trois régions sont :

- Régions 1 : $0,393 \leq a / \lambda \leq 0,492$
- Régions 2 : $0,402 \leq a / \lambda \leq 0,492$
- Régions 3 : $0,412 \leq a / \lambda \leq 0,493$

Par conséquent, la bande interdite de l'hétéro-structure appartient à l'intervalle $0,412 \leq a / \lambda \leq 0,493$, qui correspondant aux longueurs d'onde $1,359 \mu\text{m} < \lambda < 1,626 \mu\text{m}$. C'est la zone de chevauchement des trois bandes interdites photoniques.

Sur la figure III.18, nous avons reporté les spectres de transmission associés aux différentes sorties du démultiplexeur. Sur cette figure, nous observons l'existence de trois pics résonant à $\lambda = 1,55932 \mu\text{m}$, $\lambda = 1,5504 \mu\text{m}$, $\lambda = 1,53988 \mu\text{m}$, obtenu à la sortie des ports E, D et C respectivement. Ces pics sont caractérisés par des taux de transmission de 99.14 %, 96.04 %, 87.92 %, et des facteurs de qualité de 975.34, 364 et 245.51, respectivement. A partir de ce résultat, on peut dire donc que la structure proposée réussit à séparer les différentes longueurs d'onde incidentes à travers les différentes sorties. La distribution du champ illustré sur la figure III.19, confirme la faisabilité de la fonction de démultiplexage.

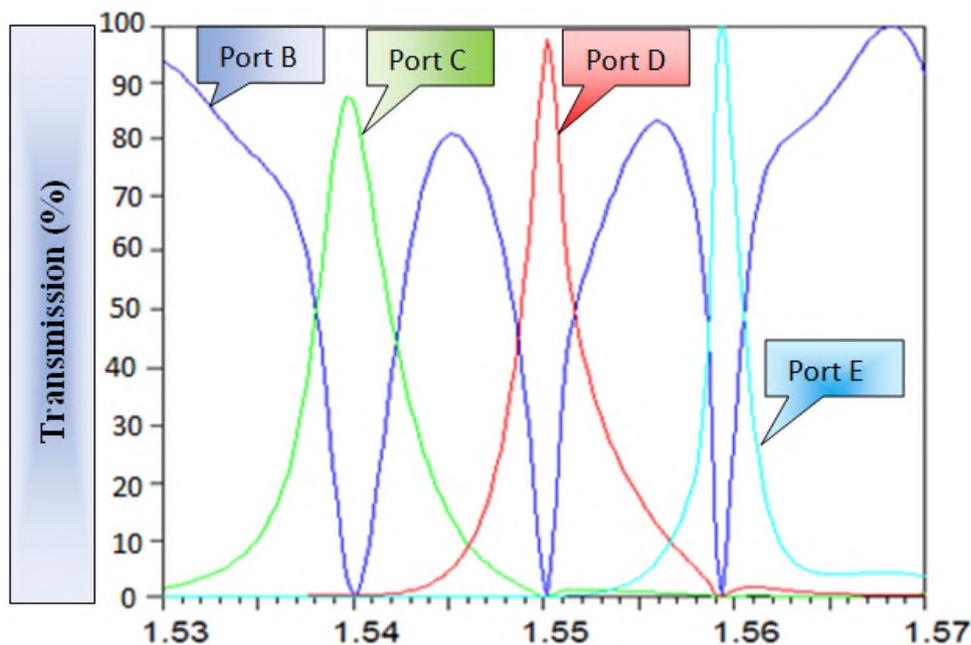


Figure III.18 : Spectre de transmission du démultiplexeur.

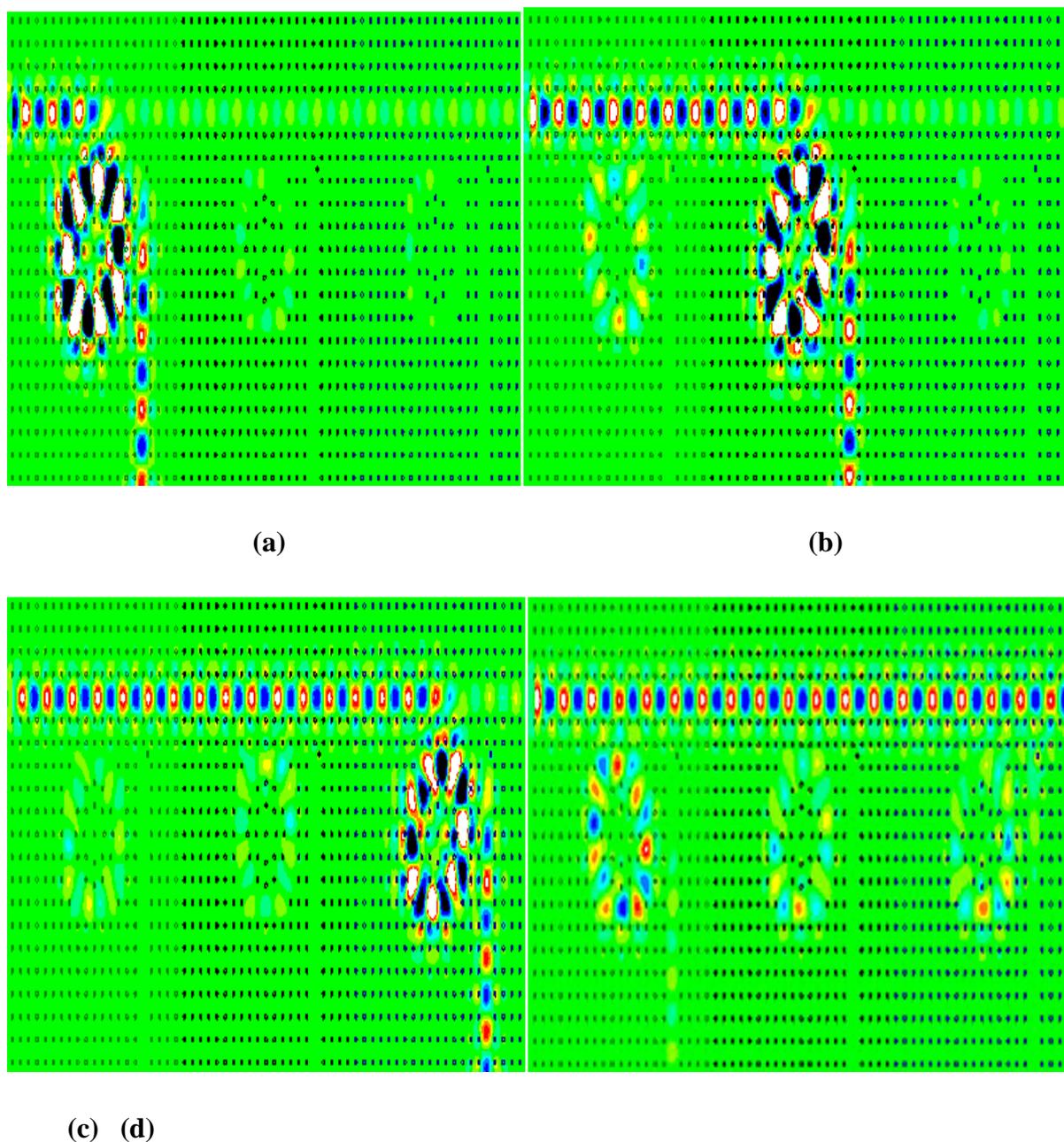


Figure III.19 : Répartition du champ dans le démultiplexeur aux longueurs d'onde : (a) $\lambda = 1.55932\mu\text{m}$, (b) $\lambda = 1.5504\mu\text{m}$, (c) $\lambda = 1.553988\mu\text{m}$ et (d) $\lambda = 1.565\mu\text{m}$.

Chapitre III : Résultats et interprétations

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, une conception d'un filtre à extraction à base d'un résonateur en anneau à cristal photonique est proposée et démontrée numériquement. Ce filtre permet d'extraire la longueur d'onde $1.55014 \mu m$, avec une efficacité d'extraction de 100% et un facteur de qualité de 624.89. Le contrôle de la longueur d'onde de résonance de ce filtre est théoriquement étudié en modifiant les paramètres structurels.

Une partie de ce chapitre a été consacrée à l'étude d'un démultiplexeur à hétéro-structure, en utilisant le CDF précédent comme élément de base dans sa conception.

Chapitre III : Résultats et interprétations

Références du chapitre III

- [1] F. Meryem. ‘Etude et Conception d'un démultiplexeur 8 canaux à cristaux photoniques bidimensionnels ’, mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf-Msila, 2018.
- [2] S. Bilal. L. Fares. ‘‘ Conception des filtres à base des cristaux photoniques ’’, mémoire de Master, Université KasdiMerbah Ouargla, 2018.
- [3] V.D.Kumar, T.Srinivas, A.Selvarajan. ‘‘Investigation of ring resonators in photonic crystal circuits,’’ Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications, vol. 2, pp. 199–206, 2004.
- [4] H. Alipour-Banaei. M.J ahanara. F.Mehdizadeh. ‘‘T-shaped channel drop filters based on photonic crystal ring resonator ’’, Optica Applicata, Vol. XLVIII, No. 4, 2018 10.5277/oa180406, 2014.
- [5] R.Bendjelloul, ‘‘Etude et caractérisation de circuits photoniques à base de cristaux photoniques de micro piliers : Application aux filtres à base de résonateurs’’, thèse de doctorat, Université des frères Mentouri-Constantine, 2017.
- [6] M.R. Rakhshani, M.A. Mansouri-Birjandi, ‘‘Realization of tunable optical filter by photonic crystal ring resonators,’’Optik, vol. 124, pp. 5377– 5380,2013.
- [7] M. David, A.Ghaffari, F.Monifi, M. S Abrishamian, ‘‘T-Shaped channel drop filters using photonic crystal ring resonators’’, Physica E, vol. 40, pp. 3151-3154,2008.
- [8] H. Alipour-Banaei, M. Jahanara, F. Mehdizadeh, ‘‘T-shaped channel drop filter based on photonic crystal ring resonator,’’ Optik, vol. 125, pp. 5348–5351, 2014.
- [9] J. Divya, S. Selvendran and A. S. Raja, ‘‘Two-dimensional photonic crystal ring resonator-based channel drop filter for CWDM application’’Photonic Network Communications, vol. 35, pp. 353–363,2018.

Conclusion générale

Les cristaux photoniques sont des nouveaux matériaux dont les propriétés optiques permettent de manipuler la lumière à l'échelle de la longueur d'onde. Ces cristaux sont des structures dont l'indice diélectrique varie fortement à l'échelle de la longueur d'onde sur une, deux ou trois directions de l'espace. Cela en fait des réflecteurs efficaces, multidirectionnels, et compacts dont l'utilisation permet d'envisager une réduction en taille des composants d'optique guidée.

Ces nouveaux matériaux pour l'optique peuvent par exemple interdire la propagation de la lumière dans certaines directions, et pour des énergies comprises dans ce que l'on appelle une bande interdite photonique BIP (ou un gap photonique). Aussi ils permettent d'envisager la réalisation de dispositifs nanométriques pour la manipulation de la lumière. Des nouveaux comportements apparaissent, se différenciant nettement de ceux de l'optique traditionnelle.

Si l'on introduit des défauts dans le cristal photonique, de nouveaux états permis apparaissent dans la bande interdite photonique, comme lors du dopage des impuretés d'un semi-conducteur. La lumière peut être confinée selon plusieurs dimensions, selon le défaut et la dimensionnalité du cristal photonique. Par exemple, si l'on introduit un défaut unidimensionnel dans un cristal photonique bidimensionnel, la lumière est confinée en deux dimensions : une cavité bidimensionnelle est créée. Si l'on introduit un défaut linéaire dans un cristal photonique bidimensionnel, la lumière est confinée dans une dimension et elle est libre de se propager dans l'autre dimension, ce qui constitue un guide d'onde. En utilisant ces concepts de base, il est alors possible de concevoir des dispositifs pour l'optique intégrée. Pour atteindre de tels objectifs, nous avons choisi de développer des composants à base de cristaux photoniques bidimensionnels à base de pillier à fort contraste d'indice. Ceux-ci permettent en effet un contrôle de la lumière dans des volumes restreints.

Pour mener à bien ce modeste travail, nous avons commencé par une étude théorique, qui nous a permis de se familiariser avec le sujet et de connaître la structure et les paramètres caractéristiques des cristaux photoniques étudiés. Nous avons présenté tout d'abord quelques définitions et descriptions des cristaux photoniques, nous nous sommes intéressés à certains concepts sur les cristaux photoniques bidimensionnels, leurs défauts et leurs applications. Finalement, nous avons cité quelques méthodes de modélisation qui permettent de déterminer les caractéristiques de ces matériaux périodiques.

L'ensemble des travaux présentés dans la dernière partie de ce mémoire sont consacrés pour la conception de dispositifs pour le filtrage et de démultiplexage en longueur d'onde. Dans ce contexte, nous avons débuté par l'étude des filtres à extraction (Channel drop filters, CDFs) basés sur le couplage entre des guides d'onde et des résonateurs en anneaux à cristaux photoniques (PCRRs). Le type de filtres que nous avons proposé est un filtre à trois ports, un port d'entrée et deux ports de sortie, dans lequel un PCRR est introduit entre deux guides d'onde perpendiculaires, donnant ainsi la forme d'un T. La structure proposée est conçue en utilisant un PC-2D de piliers de silicium (Si) de sections circulaires répartis selon un réseau carré. Pour effectuer la modélisation d'un tel dispositif, nous avons utilisé le logiciel Rsoft et notamment ses deux modules BandSolve et Fullwave, qui sont les mieux adaptés à la simulation et la conception des structures périodiques (CPs).

Afin d'obtenir les meilleures efficacités d'extraction et les facteurs de qualité possibles, nous avons tout d'abord opté pour la forme circulaire de la partie interne du résonateur en anneau, ensuite on a envisagé quelques pistes tel que l'ajout de quatre tiges de dispersion à l'intérieur du résonateur, qui améliorent de manière significative les caractéristiques du CDF. Une efficacité d'extraction et un facteur de qualité de 100 % et 624.89 ont été obtenus.

Par la suite, une étude permettant le contrôle de la longueur d'onde résonnante du CDF a été mise au point. La modification des paramètres géométriques de la structure proposée tels que l'indice de réfraction (n), le rayon (r) et le pas de réseau (a) permet à la longueur d'onde de résonance de se déplacer vers des longueurs d'onde plus élevées.

Un des dispositifs clé de l'optique intégrée qui a reçu une grande considération dans le domaine des télécommunications optiques est le démultiplexeur. L'objectif de ce dernier est d'extraire des longueurs d'onde bien précises dans un flux de données. Dans notre travail, la fonction de démultiplexage a été réalisée grâce à la combinaison de trois filtres à extraction. Les résultats de simulation ont montré une efficacité de transmission moyenne supérieure à 94%.

D'après les résultats obtenus, les structures proposées dans ce travail constituent une plateforme très prometteuse pour les applications de filtrage et de démultiplexage. De ces résultats, il est donc possible de dégager quelques perspectives intéressantes. Les performances de filtrage pourraient être améliorées d'avantage, notamment du point de vue de la conception des PCRRs.