

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

Université Abderrahmane Mira-Bejaia

Faculté de la Technologie



Département d'Automatique, Télécommunication et d'Electronique

## Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme de Master

**Filière** : télécommunication

**Spécialité** : système des télécommunications

### Thème

**Etude et conception d'un diviseur de puissance à base de cristaux photoniques bidimensionnels**

**Préparé par :**

MOUSLI Loubna

ZAIDI Nadjjet

**Dirigé par :**

Mme BENDJELLOUL Rahima

**Examiné par :**

Mr BERRAH

Mme GHENNAM

Année universitaire : 2021/2022



## REMERCIEMENT

*Nous remercions DIEU le tout puissant qui nous a donné durant toutes ces années, la santé, le courage et la foi en nous même pour pouvoir avancer et mener nos études à leurs termes.*

*Nous ne saurions, réellement, trouver les expressions éloquentes que mérite notre encadreur Madame **BENDJELLOUL Rahima** pour sa patience, son encouragement, son aide, son dévouement, son apport précieux et sa présence efficace durant toute cette étude.*

*Nous exprimons nos reconnaissances aux membres du jury pour bien vouloir accepter de présider et d'examiner ce travail.*

*Enfin, nous remercions du fond du cœur tout particulièrement ceux qui nous sont très chers, nos parents pour leur confiance, leur soutien, leur amour, et surtout leur patience.*



## Dédicaces

*Ce modeste travail est dédié*

*À nos chers parents qui nous ont soutenus et encouragés*

*Tout au long de notre cursus.*

*À nos frères et sœurs*

*À nos ami(e)s*

*À toutes les personnes qui nous ont apportés de l'aide.*

*Loubna & Nadjat*

<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>Chapitre I : généralités sur les cristaux photoniques.</b>	
I.1 Introduction.....	3
I.2. Définition des cristaux photoniques.....	3
I.3. Analogie électron-photon.....	4
I.4. Types des cristaux photoniques .....	6
I.4.1 Cristaux photoniques unidimensionnels (1D).....	6
I.4.2 Cristaux photoniques bidimensionnels (2D).....	7
I.4.2.1 Différentes familles des cristaux photoniques bidimensionnelles.....	8
I.4.2.2 Diagramme de bandes.....	9
I.4.2.3 Réseau réciproque et Zone de Brillouin .....	9
I.4.3. Cristaux photoniques tridimensionnels (3D) .....	11
I.5 Défauts dans les cristaux photoniques .....	12
I.5.1 Défauts ponctuels.....	12
I.5.2 Défauts linéaires.....	13
I.6 Application des cristaux photoniques .....	13
I.8. Techniques de modélisation.....	14
I.8.1. Décomposition en ondes planes .....	14
I.8.2. méthode FDTD (Finite Différence Time Domain) .....	15
I.9 Conclusion .....	16
References du chapitre I .....	17
<b>Chapitre II: Diviseur de puissance à base de guide d'onde en CP.</b>	
II .1 Introduction.....	19
II.2 Guide d'onde à cristaux photoniques.....	19
II.3 Différents types des guides d'ondes .....	19
II.3.1 guide d'onde droit.....	20
II.3.2 Guide d'onde courbé.....	20
II.4 Pertes dans les guides d'onde .....	21
II.5 Diviseur de puissance à base de guides d'ondes.....	22

II.5.1 Définition.....	22
II.5.2 Différent types des diviseurs de puissance .....	22
II.5.2.1 Diviseurs 1x2 à cristaux photoniques.....	23
II.5.2.2 Diviseurs 1x4 à cristaux photoniques.....	23
II.5.2. 3 Diviseurs 1x8 à cristaux photoniques.....	23
II.6. Travaux réalisés sur les diviseurs de puissance à base de cristaux photoniques .....	24
II.6.a Diviseur 1x2.....	24
II.6.b Diviseur 1X4.....	25
II.6.c Diviseur 1x8.....	26
II.7 Conclusion .....	27
Référence chapitre II.....	28

**Chapitre III: Résultats et interprétations.**

III.1 Introduction .....	29
III.2 Présentation de l’outil de simulation .....	29
III.2.1 Simulateur FullWAVE.....	30
III.2.2 Simulateur BandSOLVE .....	31
III.3 Diviseur de puissance à base de guides d’onde.....	32
III.3.1 Structure d’étude sans défauts .....	32
III.3.2 Diviseur 1x2 .....	34
III.3.2.1 Structure non optimisée .....	34
III.3.2.2 Diviseur 1x2 optimisé .....	35
a ) Optimisation de la jonction Y.....	35
b) Optimisation des guides courbés.....	37
III.3.2.3 Structure finale.....	41
III.3.3 Diviseur 1x4 .....	42
III.3.3.1 Structure non optimisée .....	42
III.3.3.2 Structure optimisée .....	43
III.4 Conclusion.....	44
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>45</b>

**Chapitre I :**

**Figure I.1 :** Cristaux photoniques naturels : (a) Bracelet monté d'une opale naturelle quasi-périodique de silice, (b) Plume de paon, (c) Papillon Morpheus.

**Figure I.2 :** Représentation schématique des trois types de cristaux photoniques. Les différentes couleurs représentent des matériaux avec différentes constantes diélectriques.

**Figure I.3 :** Schéma d'un miroir de Bragg constitué d'un empilement de couches.

**Figure I.4 :** Structure bidimensionnelles : (a) connectée, (b) déconnectée.

**Figure I.5 :** Polarisation possibles dans une structure à bande interdite photonique bidimensionnelle

**Figure I.6 :** réseau direct 2D : (a) structure carrée, (b) structure triangulaire, (c) structure hexagonale.

**Figure I.7 :** Représentation d'un réseau carré dans l'espace réel et l'espace réciproque avec sa première zone de Brillouin.

**Figure I.8 :** Diagramme de bandes d'une structure bidimensionnelle pour les polarisations TE (en rouge) et TM (en bleu)

**Figure I.9 :** La Yablonovite.

**Figure I.10 :** exemple d'une structure 3D de tas de bois.

**Figure I.11 :** (a) : les défauts ponctuels, (b) : défauts lacunaire, (c) : défauts de substitution

**Figure I.12 :** Exemples de défauts linéaires dans un cristal photoniques 2D créés par : (a) la modification de la distance entre motifs, (b) la modification de l'indice de réfraction, (c) la suppression de motifs, (d) la modification de la taille des motifs.

**Figure I.13 :** Images MEB (a) d'un guide d'onde et (b) D'une fibre optique photonique dans des CPs 2D.

## **Chapitre II :**

**Figure II.1 :** Représentation schématique de deux types de guide créés dans un réseau bidimensionnel de trous d'air : (a) "W1" : omission d'une seule rangée de trous d'air, (b) "W2" : omission de deux rangées de trous d'air.

**Figure II.2 :** Virage réalisé dans un cristal photonique bidimensionnel.

**Figure II.3 :** (a) configuration envisagée pour réduire les pertes par décalage dans un guide courbé conventionnel, (b) configuration par courbure continûment variable, (c) configuration par miroir réfléchissant.

**Figure II.4 :** Structure schématique d'un diviseur 1x2 pour : (a) jonction Y et (b) jonction T.

**Figure II.5 :** Structure schématique d'un diviseur 1x4 pour : (a) jonction Y et (b) jonction T.

**Figure II.6 :** Structure schématique d'un diviseur 1x8 pour : (a) jonction Y et (b) jonction T.

**Figure II.7 :** (a) : diviseur y intégré dans une hétéro structure photonique, (b) : champ électrique.

**Figure II.8 :** Spectres de transmission normalisée de l'hétéro-structure.

**Figure II.9 :** Structure optimisé d'un diviseur 1x4.

**Figure II.10 :** Réponse spectrale d'un diviseur 1x4.

**Figure II.11 :** Structure optimisé d'un diviseur 1x8.

**Figure II.12 :** Réponse spectrale d'un diviseur 1x8.

## **Chapitre III :**

**Figure III.1:** Fenêtre principale de Rsoft CAD.

**Figure III. 2:** Fenêtre principale des paramètres de simulation de FullWAVE.

**Figure III. 3:** Fenêtre principale des paramètres de simulation de BandSOLVE.

**Figure III.4 :** Structure sans défauts.

**Figure III. 5 :** Diagramme de bandes de la structure d'étude.

**Figure III.6 :** Structure schématique du diviseur 1x2 non optimisé

**Figure III.7 :** Spectre de transmission d'un diviseur 1x2 non optimisée

**Figure III.8 :** Structure schématique optimisée de la jonction Y.

**Figure III.9 :** Spectre de transmission du diviseur 1x2 en fonction de différentes valeurs du rayon  $R_1$  : (a)  $R_1=0.12 \mu\text{m}$ , (b)  $R_1=0.14 \mu\text{m}$ , (c)  $R_1 = R =0.167 \mu\text{m}$ , (d)  $R_1=0.22 \mu\text{m}$ , (e)  $R_1=0.24 \mu\text{m}$ , (f)  $R_1=0.26\mu\text{m}$ .

**Figure III.10 :** Structure optimisée du guide courbé.

**Figure III.11 :** Spectre de transmission du diviseur 1x2 en fonction de différentes positions du trou  $R_2$  : (a)  $x= 3a/8$  et  $z= 3a/4$  ; (b)  $x=2a/5$  et  $z=2a/3$  ; (c)  $x=a/4$  et  $z=a/2$  ; (d)  $x=a/3$  et  $z=3a/6$  ; (e)  $x=a/16$  et  $z=a/8$  ; f)  $x=3a/8$  et  $z=a/4$ .

**Figure III.12 :** Spectre de transmission du diviseur 1x2 en fonction de différentes valeurs du rayon  $R_2$  : (a)  $R_2= 0.12 \mu\text{m}$ , (b)  $R_2=0.14 \mu\text{m}$ , (c)  $R_2 = R =0.167 \mu\text{m}$ , (d)  $R_2=0.20 \mu\text{m}$ , (e)  $R_2=0.22 \mu\text{m}$ , (f)  $R_2=0.24\mu\text{m}$ .

**Figure III.13 :** Structure finale du diviseur 1x2.

**Figure III.14 :** Spectre de transmission de la structure final du diviseur 1x2.

**Figure III.15 :** Structure schématique du diviseur 1x4 non optimisé.

**Figure III.16 :** Spectre de transmission d'un diviseur 1x4 non optimisé.

**Figure III.17 :** Structure schématique du diviseur 1x4 optimisé.

**Figure III.18 :** Spectre de transmission du diviseur 1x4 optimisé.

**1D** : une dimension

**2D** : deux dimensions

**3D** : trois dimensions

**BIP** : bande interdite photonique

**CPs** : cristaux photoniques

$\epsilon(\mathbf{r})$  : Permittivité diélectrique

$\mu$  : Perméabilité magnétique

$\rho$  : charge

**TM** : Transverse magnétique

**TE** : Transverse électrique

**PWE** : plane wave expansion

**FDTD** : Finite Difference Time Domain

**ZB** : zone de brouillon

### **Introduction générale**

Nous vivons dans un monde dominé par la technologie, où la demande à l'accès aux services d'information à l'échelle mondiale augmente considérablement à mesure que le nombre d'utilisateurs augmente. Afin de satisfaire cette requête, la communauté scientifique a commencé à chercher une alternative dans le domaine optique pour élaborer des matériaux artificiels dont le comportement vis-à-vis des ondes électromagnétiques et contrôler les propriétés conductrices de certains matériaux. Parmi ces matériaux on trouve les cristaux photoniques (CPs) ou matériaux à bandes interdites photoniques (BIPs).

Les cristaux photoniques sont des structures artificielles dans lesquelles la variation périodique de la constante diélectrique contrôle le flux de lumière dans une, deux ou trois dimensions. Ils sont capables de contrôler et de manipuler la lumière dans une certaine gamme de fréquences. L'introduction d'éléments à base des cristaux photoniques permettrait de traiter toute l'information sous forme lumineuse et de miniaturiser les circuits actuels. C'est la raison pour laquelle de nombreuses propositions pour des dispositifs à base des cristaux photoniques ont été faites et parfois déjà réalisées, comme les guides d'ondes, les filtres sélectifs, les diviseurs de puissances et les multiplexeurs...

L'objet de ce mémoire est l'optimisation des caractéristiques des diviseurs de puissance 1x2 et 1x4, créés à base de guides d'onde à cristaux photoniques bidimensionnels. Ce manuscrit s'articule autour de trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous allons définir les concepts de base des cristaux photoniques, Puis, nous allons énumérer les types de ces cristaux et les principaux défauts qui existent aux niveaux des cristaux bidimensionnels. A la fin de ce chapitre, nous citerons quelques applications intéressantes des cristaux photoniques et nous présenterons les techniques de modélisation utilisées pour l'analyse de ces structures.

Dans le deuxième chapitre, nous commencerons par la définition des guides d'ondes à cristaux photoniques et la présentation de leurs types. Nous citerons les principales causes des pertes rencontrées au niveau de ces guides. Par la suite, nous nous focaliserons sur les diviseurs de puissance à base de cristaux photoniques bidimensionnels et nous présenterons quelques travaux réalisés sur ces composants.

Dans le troisième chapitre, nous discuterons les résultats obtenus. Dans un premier temps nous montrerons que l'utilisation d'une technique d'optimisation, basée sur la modification de la zone de la jonction et les zones de courbure dans les guides virages, permet

d'améliorer l'efficacité de transmission du diviseur 1x2. Par la suite, nous analyserons la transmission d'un diviseur 1x4. Dans ce cas aussi, l'utilisation de la même technique d'optimisation améliore son efficacité de transmission.

Ce mémoire se terminera par une conclusion générale.

# **Chapitre I :**

## **Généralités sur les cristaux photoniques**

## **I.1 Introduction**

Pendant la dernière décennie, les cristaux photoniques (CPs), également connus sous le nom de structures à bandes interdites photoniques (BIPs), ont été sujets de plusieurs travaux de recherche. Les cristaux photoniques sont des structures artificielles qui permettent de contrôler les ondes électromagnétiques dans des circuits photoniques.

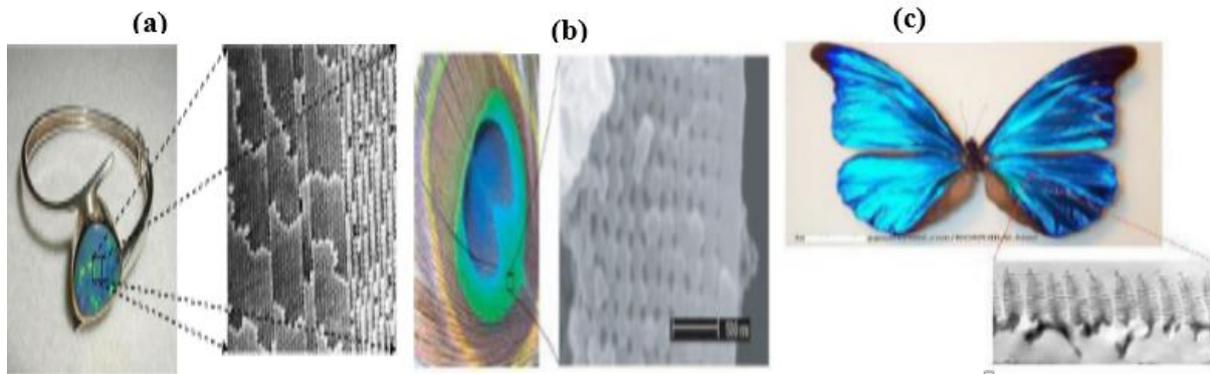
Ce premier chapitre, sera consacré à la présentation des caractéristiques générales des cristaux photoniques et en particulier les cristaux photoniques bidimensionnels (2D). Nous débuterons par la définition des cristaux photoniques, puis nous feront une analogie électrons-photons. Nous continuerons par une présentation des différentes applications à base des cristaux 2D, et nous terminerons par les différentes techniques de modélisation.

## **I.2 Définition des cristaux photoniques**

Les cristaux photoniques sont des microstructures possédant une modulation périodique de l'indice de réfraction. La propriété la plus intéressante dans ce type de structures est leur possession de bandes interdites photoniques (BIPs). Cette propriété provient de la modulation de la lumière par la distribution spatialement périodique des constantes diélectriques. La bande interdite photonique (ou GAP photonique) correspond à la plage de longueurs d'ondes où la densité d'états des photons est nulle. Lorsqu'un défaut de réseau est introduit dans une structure cristalline photonique parfaite, il entrainera l'apparition de mode de défaut, permettant la propagation d'onde électromagnétique à des fréquences bien définies. La distribution du champ électrique du défaut présente un confinement de ce dernier dans le site du défaut [1].

Les cristaux photoniques à l'état naturel existent à l'intérieur de complexe minéraux tels que les opales (figure I.1.a), et à l'intérieur des systèmes biologiques tels que les yeux de certains céphalopodes sous forme de réseaux périodiques de bâtonnets, les plumes de paon (figure I.1.b) faites de cristaux de kératines ou encore les ailes de certains papillons et insectes (figure I.1.c).

En effet, la nature présente des structures périodiques auto-organisées qui ne possèdent pas un contraste d'indices suffisant : c'est le cas de l'opale minérale naturelle. L'opale est une roche constituée de microbilles de silice réparties selon un arrangement plus ou moins régulier. C'est un cristal photonique naturel, même si celui-ci n'a pas de bande interdite complète [2].



**Figure I.1** : Cristaux photoniques naturels : (a) Bracelet monté d'une opale naturelle quasi-périodique de silice, (b) Plume de paon, (c) Papillon Morpheus [2].

### I.3 Analogie électron-photon

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 charge ( $\rho = 0$ ) ni courants et de constante diélectrique réelle  $\epsilon(r)$  (le matériau est non absorbant), les quatre équations de Maxwell s'écrivent :

$$\nabla \cdot (\epsilon(r)E(r, t)) = 0 \dots\dots\dots \text{I-1}$$

$$\nabla \cdot H(r, t) = 0 \dots\dots\dots \text{I-2}$$

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

$$\nabla \times H(r, t) = \epsilon_0 \epsilon(r) \frac{\partial}{\partial t} E(r, t) \dots\dots\dots \text{I-4}$$

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

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

D'après l'équation I-4 on a:

$$\frac{\partial E(r, t)}{\partial t} = \frac{\nabla \times H(r, t)}{\epsilon_0 \epsilon(r)} \dots\dots\dots \text{I-6}$$

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

$$\nabla \times \left( \frac{\nabla \times H(r,t)}{\epsilon(r)} \right) = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 H(r,t)}{\partial t^2} \dots\dots\dots I-7$$

Où  $C = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$  est la vitesse de la lumière dans le vide :

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

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 :

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

L'équation de Schrödinger en régime stationnaire pour la fonction d'onde  $\psi$  d'un électron dans un potentiel  $V$  s'écrit sous la forme suivante [3] :

$$\nabla^2 \psi(r) = -\frac{2m}{\hbar^2} (E - V(r)) \psi(r) \dots\dots\dots I-10$$

Où:  $E$  est l'énergie de l'électron.

$m$  : la masse de l'électron.

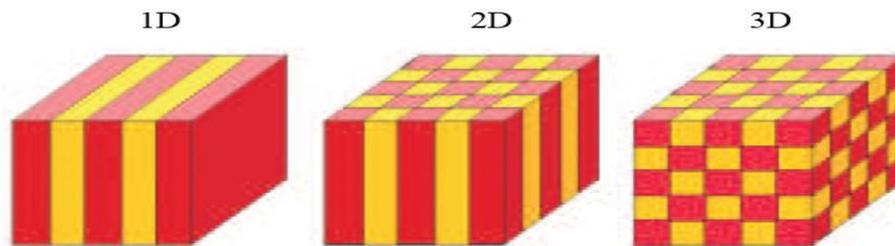
$\hbar$  : la constante de Planck réduite.

$H(r)$  étant l'analogie électromagnétique de la fonction d'onde électronique  $\psi(r)$  et  $\epsilon(r)$  celui du potentiel atomique  $V(r)$ .

L'équation (I-10) de Schrödinger qui décrit le mouvement des électrons dans le potentiel  $V$  est analogue à l'équation de propagation des photons dans un milieu de constante diélectrique  $\epsilon$  (équation I-9). 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 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 [3].

## I.4 Types des cristaux photoniques

Les cristaux photoniques sont classés selon leur dimensionnalité en trois types : cristaux photoniques unidimensionnels (1D), bidimensionnels (2D) et tridimensionnels (3D). La figure (I.2) représente les structures schématiques de ces trois types.



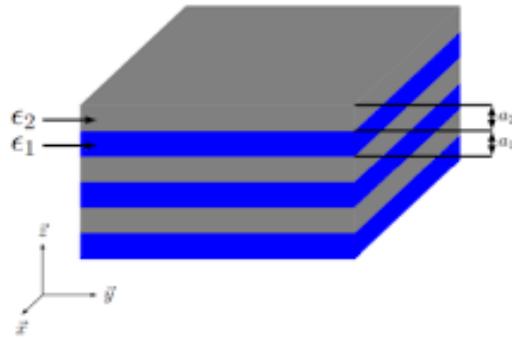
**Figure I.2** : Représentation schématique des trois types de cristaux photoniques. Les différentes couleurs représentent des matériaux avec différentes constantes diélectriques [1].

### I.4.1 Cristaux photoniques unidimensionnels (1D)

Les cristaux photoniques unidimensionnels sont couramment utilisés sous le nom de réseau de Bragg. Ce milieu est composé d'alternances périodiques dans une seule direction de l'espace de deux couches de matériaux diélectriques ayant des constantes diélectriques différentes  $\epsilon_1$  et  $\epsilon_2$  comme le montre la figure (I.3). La BIP d'un cristal photonique unidimensionnel provient de la forte réflexion multiple et de l'interférence destructive induite entre les interfaces des couches à indice de réfraction élevé et à ceux à faible indice. De ce fait, les propriétés de la bande interdite photonique d'un CP-1D sont principalement déterminées par les paramètres suivants [1] :

- L'épaisseur des deux types de couches diélectriques.
- La constante du réseau (pas du réseau).
- Le contraste d'indice de réfraction entre les indices des couches diélectriques.

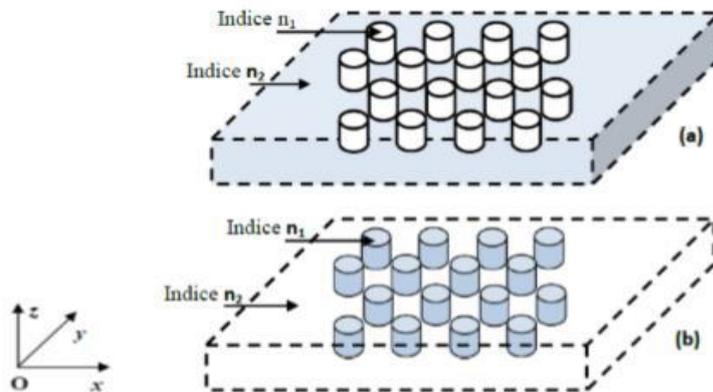
Les structures 1D sont utilisées dans plusieurs applications, tel que, les filtres sélectifs, les multiplexeurs, les convertisseurs de modes pour fibre optiques, laser spéciaux à bande étroite...



**Figure I.3** : Schéma d'un miroir de Bragg constitué d'un empilement de couches [1].

## I.4.2 Cristaux photoniques bidimensionnels (2D)

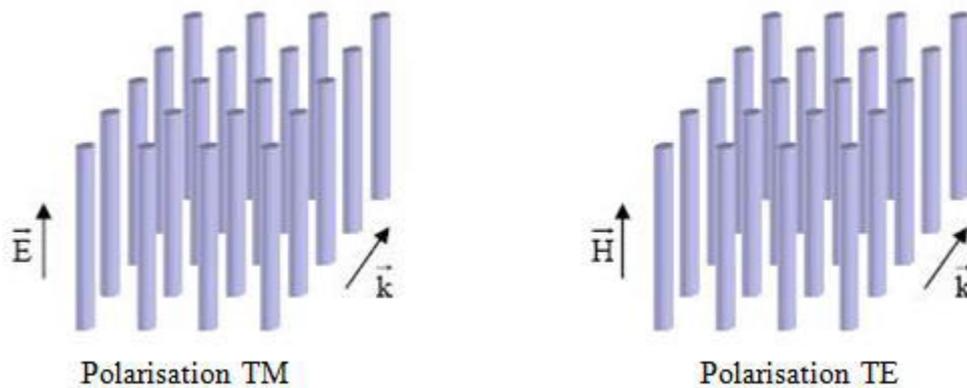
Un cristal photonique bidimensionnel est une structure qui présente une modulation périodique de la permittivité diélectrique suivant deux directions de l'espace. Il existe plusieurs façons de réaliser ces structures, par exemple, on peut placer des tiges diélectriques dans l'air (structure déconnectée) ou encore dans un autre diélectrique (structure connectée), comme le montre la figure (I.4). Afin d'ouvrir des bandes interdites larges, il faut un contraste d'indice (différence entre les indices du milieu et des tiges) suffisamment grand [4].



**Figure I.4** : Structure bidimensionnelles : (a) connectée, (b) déconnectée [4].

Les propriétés optiques des structures bidimensionnelles sont fortement dépendantes de la polarisation de l'onde électromagnétique [5] :

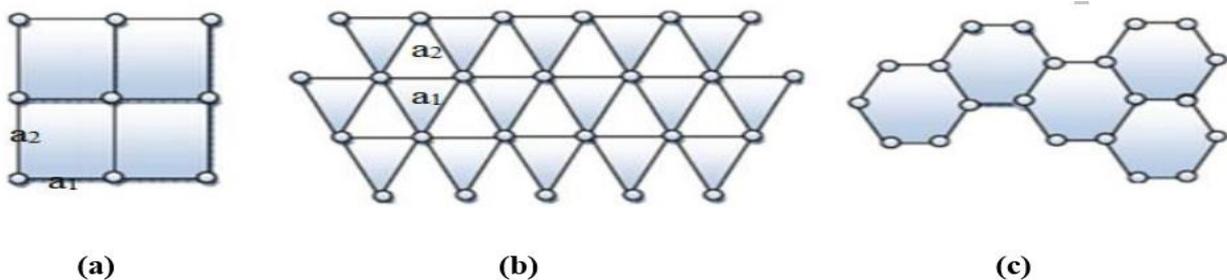
- La polarisation TE (Transverse Electric) : lorsque le champ magnétique est parallèle à l'axe des tiges, comme le montre la figure (I.5.b).
- La polarisation TM (Transverse Magnétique) : lorsque le champ électrique est parallèle à l'axe des tiges, comme il est schématisé sur la figure (I.5.a).



**Figure 1.5 :** Polarisations possibles dans une structure à bande interdite photonique bidimensionnelle [5].

### I.4.2.1 Différentes familles des cristaux photoniques bidimensionnelles

On trouve trois principales familles des cristaux photoniques bidimensionnels selon la forme de leurs réseaux : réseau carré, réseau triangulaire et réseau hexagonal, qui sont illustrées sur la figure (I.6) [4].



**Figure I.6 :** Réseau direct 2D : (a) structure carrée, (b) structure triangulaire, (c) structure hexagonale [4].

### I.4.2.2 Diagramme de bandes

Pour une structure périodique 2D, la définition du diagramme de bandes consistera à reporter les courbes de dispersion  $\omega_n(k)$  représentant la variation de la fréquence des modes en fonction du module du vecteur  $k$  qui parcourt le périmètre du triangle de la zone de Brillouin irréductible. Le calcul du diagramme de bandes nous renseigne sur les propriétés (la position et la largeur) des bandes interdites photoniques pour chaque polarisation [5].

Beaucoup de propriétés des cristaux photoniques (CPs) sont directement compréhensibles par l'étude de leur diagramme de bandes. Pour les étudier, on utilise les notions de réseau réciproque et de zones de Brillouin, que nous allons définir dans la section suivante.

### I.4.2.3 Réseau réciproque et Zone de Brillouin

Le réseau réciproque d'un CP 2D est défini à partir du réseau réel par la relation suivante :

$$\vec{a}_i \cdot \vec{b}_j = 2\pi\delta_{ij}$$

Où  $\vec{a}_i$  et  $\vec{b}_j$  : vecteurs des réseaux réels et réciproques.

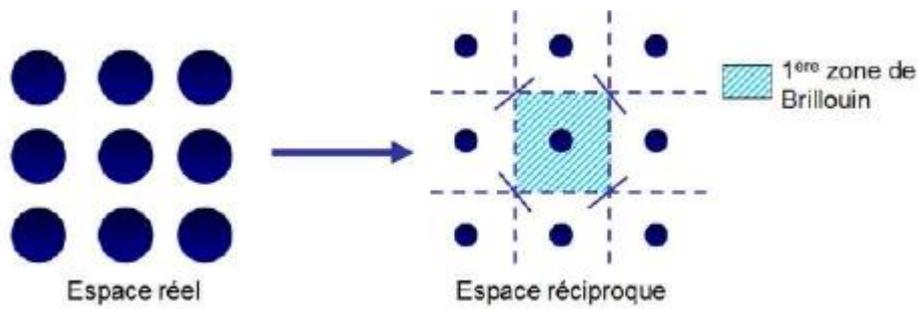
$\delta_{ij}$  : Symbole de Kronecker.

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 0 & i \neq j \\ 1 & i = j \end{cases}$$

La zone de Brillouin (BZ) est une région qui divise l'espace réciproque associé aux cristaux. La première zone de Brillouin est le plus petit volume entièrement contenu entre les plans médians (les lignes reliant un nœud donné à tous ses voisins) des segments de droite du réseau réciproque tirés de l'origine. La première ZB est souvent appelée simplement la zone de Brillouin (figure I.7). L'importance de la première zone de Brillouin vient de la description en ondes de Bloch des ondes dans les milieux périodiques, qui montre que les solutions peuvent être entièrement caractérisées par leur comportement dans cette zone. Elle peut être obtenue de la manière suivante :

- Joindre un nœud du réseau à ses voisins les plus proches (premiers voisins).
- Tracer les plans médiateurs de ces segments.

On appelle zone de Brillouin irréductible la plus petite surface qui permet de déduire la Relation de dispersion dans tout l'espace réciproque [6].

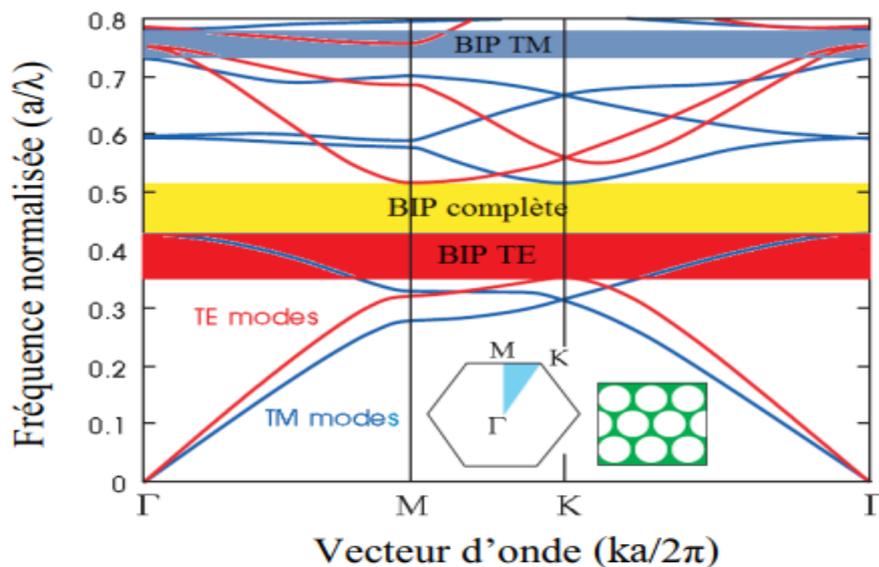


**Figure I.7 :** Représentation d'un réseau carré dans l'espace réel et l'espace réciproque avec sa première zone de Brillouin [6].

La figure (1.8) représente le diagramme de bandes calculé pour un réseau triangulaire pour les deux polarisations. Les polarisations TE et TM se distinguent par des traits de couleurs différentes. La structure correspond à une matrice bidimensionnelle de trous d'air ( $\epsilon=1$ ) dans un matériau de permittivité  $\epsilon = 13$ , où le diamètre des trous est égal à  $0.48 \cdot a$  (' $a$ ' est le pas du réseau).

Le diagramme de la figure (I.8) représente :

- En abscisse, le parcours fait par le vecteur d'onde lorsqu'il décrit le contour formé par les points de haute symétrie  $\Gamma$ , M, K de la première zone de Brillouin.
- En ordonnée, les fréquences des modes calculés.



**Figure I.8 :** Diagramme de bandes d'une structure bidimensionnelle pour les polarisations TE (en rouge) et TM (en bleu) [7].

## I.4.3 Cristaux photoniques tridimensionnels (3D)

Les cristaux photoniques tridimensionnels sont des structures périodiques suivant les trois directions de l'espace. Il existe un grand nombre de structure possibles :

### a) La Yablonovite

En 1993, E. Yablonovitch a fabriqué un cristal photonique 3D en perçant chaque trou dans un bloc de plexiglas selon trois angles azimutaux séparés de  $120^\circ$  (figure I.9). 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 [8].

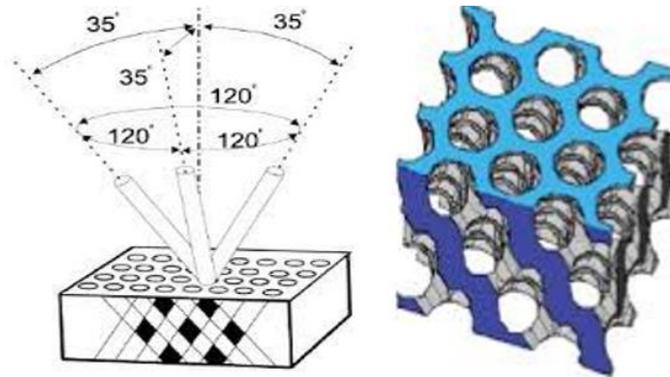


Figure I.9 : La Yablonovite [8].

### b) Structure de tas de bois

Ces structures 3D sont obtenues en déposant par couches successives des rubans de silicium polycristallin dans des tranchées de silice. Après avoir bâti la structure, la silice est retirée pour obtenir un cristal photonique 3D Si/air dont le contraste d'indice est suffisant pour ouvrir une bande d'énergies interdites omnidirectionnelle (figure I.10) [9].



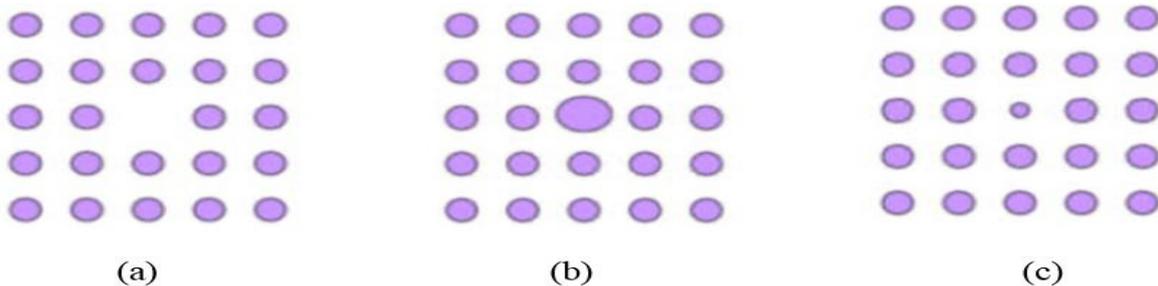
Figure I.10 : Exemple d'une structure 3D de tas de bois [9].

## I.5 Défauts dans les cristaux photoniques

Les cristaux photoniques ne permettront de réaliser de véritables fonctions optiques et de contrôler les flux de lumière que si l'on y introduit des défauts. Ces défauts sont obtenus en brisant localement la périodicité du cristal, autrement dit en créant une imperfection dans la structure périodique. Dans le cas des cristaux photoniques 2D on obtient deux principaux types de défaut : les défauts ponctuels (cavités) et les défauts linéaires (guides d'onde).

### I.5.1 Défauts ponctuels

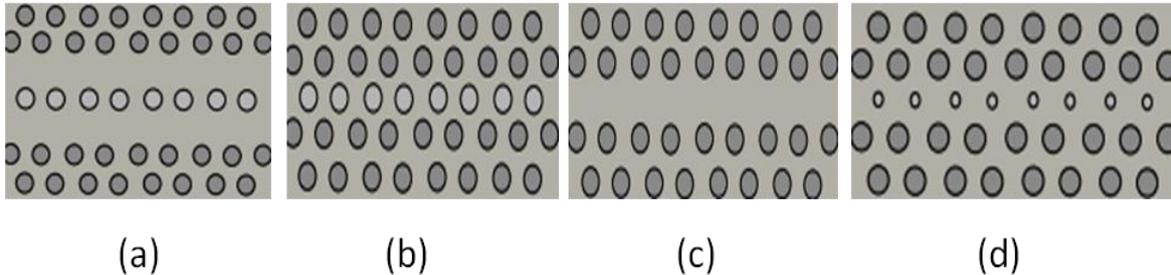
Les défauts ponctuels sont créés en modifiant les caractéristiques d'un seul motif dans la structure périodique. Ils sont réalisés, soit, par une modification locale de la constante diélectrique ou la taille d'un motif (défauts de substitution), soit par le déplacement d'un de ces motifs ou encore par le retrait d'un motif (défaut lacunaire) [10], comme le montre la figure (I.11). La présence d'un défaut ponctuel peut conduire à l'existence de niveaux discrets d'énergie dans une ou plusieurs bandes interdites à la fois.



**Figure I.11** : Défauts ponctuels : (a) défauts lacunaire, (b) et (c) défauts de substitution [10].

### I.5.2 Défauts linéaires

Les défauts linéaires appelés aussi défauts étendus, sont créés par la suppression ou la modification de la taille d'une ou plusieurs rangées de motifs du cristal photonique. L'introduction de ces défauts permet de guider la lumière selon une direction choisie. La figure I.12 représente les différents défauts étendus [11].



**Figure I.12** : Exemples de défauts linéaires dans un cristal photoniques 2D créés par : (a) la modification de la distance entre motifs, (b) la modification de l'indice de réfraction, (c) la suppression de motifs, (d) la modification de la taille des motifs [11].

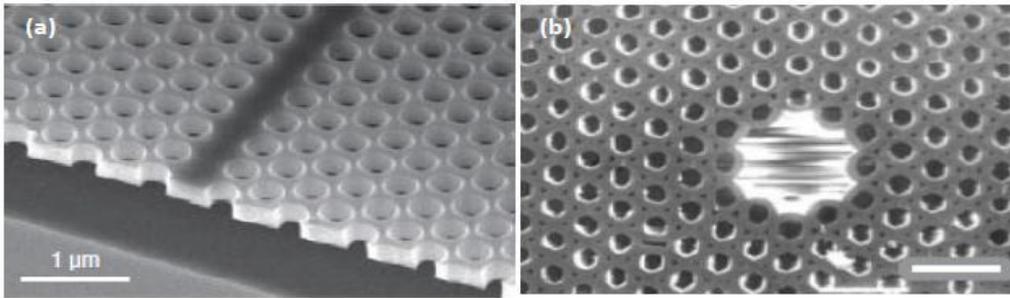
### I.6 Application des cristaux photoniques

Par leurs périodicités et leurs propriétés, les cristaux photoniques permettent de réaliser des dispositifs optiques ou électromagnétiques capables de stocker, filtrer ou guider la lumière à l'échelle de la longueur d'onde.

Les cristaux photoniques sont souvent utilisés dans le domaine des télécommunications et de l'information [12] notamment dans le domaine des optiques intégrées. En effet, en utilisant les photons à la place des électrons, les informations seront transmises plus rapidement avec moins de perte, du fait d'une baisse d'interférence avec les matériaux diélectriques en comparaison aux électrons (figure I.13).

L'utilisation des cristaux photoniques dans d'autres applications se développent comme pour [13] :

- Le solaire avec l'amélioration de l'efficacité des cellules photovoltaïques.
- Les capteurs biologiques ou chimiques.
- Les lasers avec l'optimisation de leurs performances pour les lasers à bas seuil.



**Figure I.13** : Images MEB (a) d'un guide d'onde et (b) D'une fibre optique photonique dans des CPs 2D [13].

### I.8 Techniques de modélisation

Pour étudier et comprendre la propagation des champs électromagnétiques dans les CPs, des méthodes différentes nécessitent souvent des investissements importants en programmation et en analyse numériques. Parmi ces méthodes principales on distingue : la méthode de décomposition en ondes planes et la méthode des différences finies dans le domaine temporel.

Chacun de ces outils de calcul nous permet d'extraire les informations nécessaires pour comprendre le principe de fonctionnement des cristaux photoniques.

#### I.8.1 Décomposition en ondes planes

La méthode des ondes planes (Plan Wave Expansion ou PWE) est une technique numérique répandue pour résoudre des problèmes électromagnétiques périodiques. Cette technique est basée sur la décomposition des champs électromagnétiques en une superposition d'ondes planes, c.-à-d. résoudre des équations de Maxwell dans le domaine fréquentiel.

La technique PWE est essentiellement utilisée pour analyser les propriétés dispersives des matériaux à BIP et permet de déterminer la fréquence, la polarisation, la symétrie et la distribution du champ pour les modes d'une structure photonique. En pratique, la structure est définie par une unité et un réseau périodique selon lequel l'unité est répliquée pour couvrir complètement l'espace. Pour un cristal sans défaut, la cellule peut être qu'un motif d'un cristal photonique, mais elle peut aussi avoir des dimensions plus importantes dans le cas de structure aperiodique telles que des guides d'ondes ou des cavités [14].

### **I.8.2 méthode FDTD (Finite Différence Time Domain)**

La méthode FDTD est une approche numérique permettant la résolution des équations différentielles dans le domaine du temps et est actuellement l'une des méthodes les plus utilisées en électromagnétisme. L'application de cette méthode aux équations de Maxwell dans l'espace libre a été introduite pour la première fois par Yee en 1966 [15].

Elle consiste à discrétiser d'une manière particulière la propagation des champs électromagnétiques E et H dans l'espace et dans le temps. En pratique, un domaine spatial en tout point duquel les champs E et H seront calculés est d'abord défini, puis la structure à cristal photonique est créée en définissant le matériau diélectrique associé à chaque point du domaine. Les conditions initiales fixent la valeur du champ électromagnétique à l'instant ( $t = 0$ ) et la discrétisation supplémentaire sur le temps permet alors de suivre l'évolution temporelle des champs. Il est alors possible d'obtenir la réponse fréquentielle du cristal photonique en appliquant la transformée de Fourier aux signaux temporels obtenus. En choisissant une source dont le spectre est large en fréquence, toutes les fréquences des modes résonants peuvent être déterminées en une seule simulation, ce qui peut s'avérer fort utile pour identifier les modes d'intérêt.

Les conditions aux limites imposées par les dimensions finies du réseau constituent également un point très important dans cette méthode. Les conditions aux limites absorbantes (ou conditions PML pour Perfectly Matched Layers) peuvent être définies sur les bords du cristal photonique afin de limiter les perturbations liées aux réflexions [15].

Il est aussi possible d'utiliser des conditions de périodicité de propagation ou de symétrie selon certaines directions du cristal photonique, permettant ainsi de réduire significativement le temps de simulation. Une seule simulation dure quelques heures, mais dans la mesure où la plupart du temps l'influence d'un paramètre est évaluée, l'obtention d'une série de points peut parfois atteindre plusieurs jours.

Ainsi il est possible de déterminer, entre autres, grâce au calcul FDTD :

- Les fréquences des modes propres pour une structure dont les dimensions sont finies dans les trois directions de l'espace
- La durée de vie des photons pour ces modes (ce qui correspond au facteur de qualité)
- La cartographie du champ électromagnétique d'un mode du cristal photonique.
- Les volumes modaux des cavités peuvent ensuite être déduits de la cartographie par intégration.

### **Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons défini les concepts de base liés aux cristaux photoniques. En premier lieu, nous avons énuméré les différents types de ces cristaux en portant une attention particulière aux cristaux 2D. Nous avons ensuite présenté les défauts pouvant être créés au niveau des structures bidimensionnelles et abordé quelques applications potentielles à base de ces cristaux. A la fin de ce chapitre, nous avons cité quelques techniques de modélisation des CPs, à savoir la méthode des ondes planes (PWE) et la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD).

### **References du chapitre I**

- [1] K. Guven, E. Ozbay, « coupling and phase analysis of cavity structures in two-dimensional photonic crystals», *phys.Rev.B*, vol.71, pp. 85-108, 2005.
- [2] H. Abri Badaoui, « Etude et conception des micros composants à base des cristaux photoniques bidimensionnels », thèse de doctorat, univ. Tlemcen, 2012.
- [3] C. Kittel, *Quantum Theory of Solids*, John Wiley and Sons Inc, New York, 1963.
- [4] Benoit Lombardet, « Etude et Réalisation de Cristaux Photoniques Pour L'optique Intégrée », thèse de Doctorat, Ecole. Polytechnique Fédérale De Lausann, 2005.
- [5] Zouache Tarek, « Etude et conception de capteurs mécaniques à base des cristaux photoniques », thèse de doctorat, univ. M'sila, 2019.
- [6] M. Grillet, « Cristaux Photoniques et intégration photonique », thèse de doctorat, univ. Lyon, 2003.
- [7] J.D. Joannopoulos, R. D. Meade, J. N. Winn, *Photonic Crystals- Molding the Flow of Light*, Princeton University Press, Princeton, NJ, 2008.
- [8] Yannick Merle, « Etude de la dispersion électronique dans les matériaux périodiques diélectriques bidimensionnels », thèse de doctorat, univ. Limoges, 2003.
- [9] B. yassine, « optimisation de cristaux photonique pour l'optique non linéaire », univ. Paris sud 11, 2008.
- [10] Ghezali, sanaa, « conception et modélisation numérique de composants optiques en nano photonique intégrée », thèse de doctorat, univ. Sidi Bel-Abbès, 2018.
- [11] Fan, S, et al, «Channel drop filters in photonic crystals», *Optics Express*, vol.3, pp. 4-11, 1998.
- [12] Sakamoto, J.S. and B. Dunn, « Hierarchical battery electrodes based on inverted opal structures», *Journal of Materials Chemistry*, vol.12, pp. 2859-2861, 2002.
- [13] Lydie Ferrier, Ounsi El Daif, Xavier Letartre, Pedro Rojo Romeo, Christian Seassal, Radoslaw Mazurczyk, and Pierre Viktorovitch, « Surface emitting microlaser based on 2d photonic crystal rod lattices », vol.17, pp. 9780-9788, 2009.

## *Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques*

---

[14] A. Glushko, « Plan wave method for out-of-plane propagation in 2D photonic crystals », IEEE, pp.406-408, 2006.

[15] Jean-Pierre Berenger, «A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves», Journal of Computational Physics, vol.114, pp.185-200, 1994.

# **Chapitre II :**

## **Diviseur de puissance à base de guide d'onde en CP**

### **II.1 Introduction**

Un attrait majeur des cristaux photoniques repose sur l'insertion contrôlée de défauts au sein du cristal lors de leur fabrication. Les géométries possibles sont presque infinies et peuvent aller de la modification de la taille ou de l'indice d'un motif à des défauts plus importants, comme la suppression d'une rangée entière de motifs. Dans le cas des guides d'ondes, ces défauts peuvent créer des états permis dans la bande interdite d'un cristal parfait. Le diviseur de puissance est l'une des applications à base des guides d'onde à CPs. Ce dispositif permet de répartir équitablement la puissance du signal d'entrée sur plusieurs ports de sortie.

Dans ce chapitre, les diviseurs de puissance basés sur les guides d'onde à cristaux photoniques bidimensionnels sont décrits. Les différents types de guides d'onde sont également décrits. Nous présentons ensuite les différents types de ces diviseurs. Enfin la dernière partie de ce chapitre est consacrée à la présentation de quelques travaux réalisés sur ces composants.

### **II.2 Guide d'onde à cristaux photoniques**

Les guides d'ondes à CP sont définis par le retrait, l'ajout ou la modification de motifs dans une ou plusieurs rangées parallèles du cristal. L'introduction d'un grand nombre de guides en parallèle ou en série ne pose pas plus de difficultés que d'introduire un seul guide, car les tiges du cristal se répètent à l'identique de façon périodique.

Dans les guides à cristaux photoniques, le processus de guidage de la lumière est plus robuste que celui rencontré dans les guides classiques, où le guidage est assuré par réflexion totale interne, il est déterminé par le phénomène de la bande interdite photonique. Les réflexions multiples sur les motifs du cristal localisent la lumière au niveau de la zone du défaut [1].

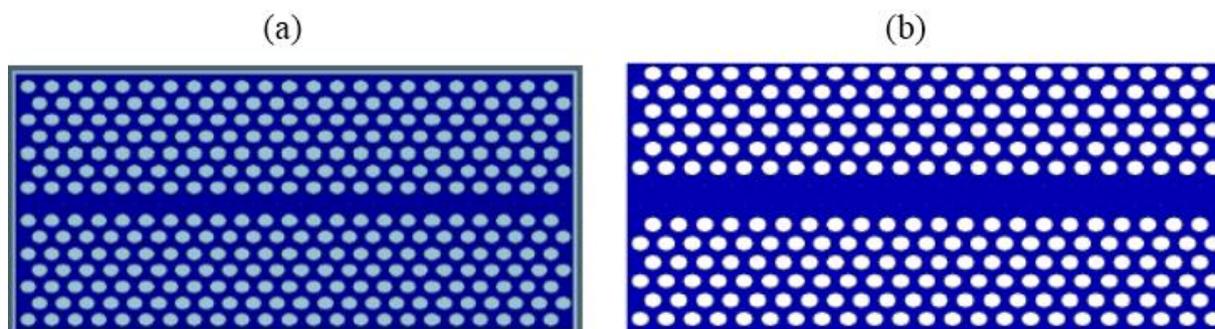
### **II.3 Différents types des guides d'ondes**

Il existe une grande variété de guides à cristaux photoniques. En regard de leur structure géométrique, on peut globalement classer ces guides en deux classes principales :

### II.3.1 guide d'onde droit

Les guides droits à cristaux photoniques sont obtenus en créant un défaut linéique dans la structure photonique. Au sein de ces défauts, des modes ayant une fréquence appartenant à la bande interdite photonique peuvent exister. Pour des cristaux photoniques bidimensionnels, ce guide il peut être créé en retirant (ou modifiant) directement une ou plusieurs rangées de motifs du cristal photonique (Figure II.1) [2].

On appelle " $W_n$ " les guides d'onde, où " $n$ " est la largeur exprimée en nombre de rangées manquantes de trous du cristal photonique bidimensionnel. La figure (II.1) représente par exemple deux types de guides d'onde droit, le premier est formé par l'omission d'une seule rangée de trous (figure II.1.a), ce guide est appelé " $W_1$ " et le deuxième est créé par la suppression de deux rangées de trous d'air (figure II.1.b), ce guide est appelé " $W_2$ ".

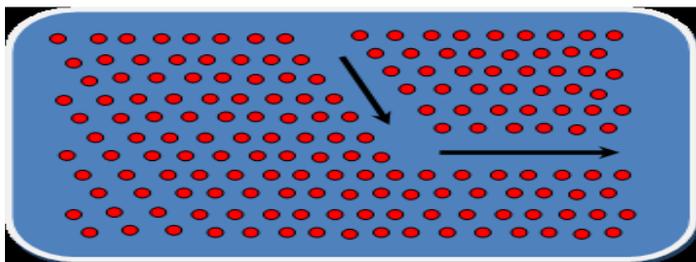


**Figure II.1 :** Représentation schématique de deux types de guide créés dans un réseau bidimensionnel de trous d'air : (a) " $W_1$ " : omission d'une seule rangée de trous d'air, (b) " $W_2$ " : omission de deux rangées de trous d'air [2].

### II.3.2 Guide d'onde courbé

Les guides virages constituent aussi un domaine d'application privilégié des cristaux photoniques car ils permettent théoriquement de réaliser des virages avec des rayons de courbure de l'ordre de la longueur d'onde sans pertes (Figure II.2). La démonstration expérimentale du guidage dans des virages a été réalisée rapidement [3], mais des problèmes de réflexion et de pertes subsistent. Ces virages peuvent être réalisés simplement en omettant de graver des trous dans les directions de symétrie du cristal (virages à  $60^\circ$  et  $120^\circ$ ).

Dans le cas des virages simples à  $60^\circ$ , les meilleurs résultats mesurés ont été des transmissions d'environ 80 à 90 % pour un guide étroit ( $W_1$ ) [4]. Le virage peut être amélioré en ajoutant ou supprimant des trous ou encore en modifiant la topologie de la courbure.



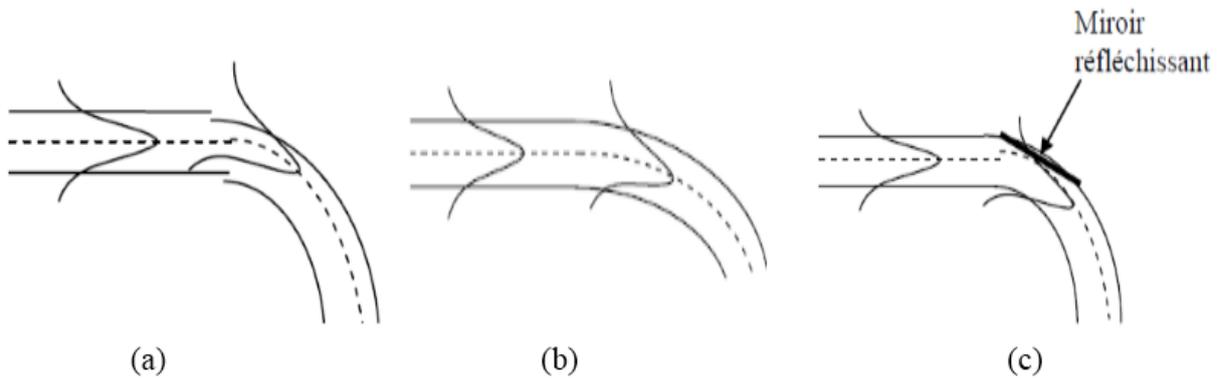
**Figure II.2** : Virage réalisé dans un cristal photonique bidimensionnel [4].

### II.4 Pertes dans les guides d'onde

Les pertes sont un problème crucial pour les guides à cristaux photoniques. Cette problématique mobilise d'ailleurs de nombreux groupes de recherche depuis plusieurs années. Ces pertes sont pour l'instant encore importantes, mais il y a fort à penser que l'amélioration des procédés d'élaboration diminuera cette contrainte. Néanmoins, les pertes obtenues atteignent déjà des valeurs qui permettent la réalisation de dispositifs intégrés avec ces guides [5].

Le couplage d'un mode de guide droit à un guide courbé produit une efficacité inférieure à l'unité, car le mode du guide courbé est décalé vers l'extérieur de la courbure (Figure II.3). Trois stratégies sont souvent utilisées en optique guidée pour réduire ces pertes [6] :

- La première consiste à décaler l'entrée du guide courbé par rapport au guide droit (Figure II.3.a). Lorsque le guide droit est décalé vers l'extérieur de la courbe, il anticipe le décalage que va subir l'onde en entrant dans le guide courbé et rend ainsi le couplage optimal entre guide droit et guide courbé.
- La deuxième stratégie consiste à réaliser des guides à courbure continûment variable (Figure II.3.b) de manière à passer d'une façon adiabatique du guide droit à un guide de courbure donnée.
- La troisième approche combinant miroir à  $45^\circ$  et cavité faiblement résonnante (Figure II.3.c). La puissance réfractée au niveau de la cavité devrait être réfléchiée et réorientée vers l'intérieur, ce qui augmente la résonance de la cavité.



**Figure II. 3 :** (a) configuration envisagée pour réduire les pertes par décalage dans un guide courbé conventionnel, (b) configuration par courbure continûment variable, (c) configuration par miroir réfléchissant [6].

## **II.5 Diviseur de puissance à base de guides d'ondes**

### **II.5.1 Définition**

Un diviseur à cristaux photoniques est un élément optique utilisé pour séparer et distribuer simultanément la lumière sur plusieurs sorties. Il existe principalement deux approches différentes pour diviser la puissance d'un signal entrant vers plusieurs ports de sortie, en utilisant une jonction Y ou une jonction T créés à base de guides d'onde à cristaux photoniques. Idéalement, la puissance d'entrée est également répartie entre les ports de sortie sans réflexion ni perte de rayonnement importante [7,8].

### **II.5.2 Différent types des diviseurs de puissance**

En général, un diviseur de puissance est constitué d'un seul port d'entrée et de plusieurs ports de sortie. Selon le nombre de ports de sortie, nous distinguons différents types de diviseurs de puissance à CP :

### II.5.2.1 Diviseurs 1x2 à cristaux photoniques

Ce type de diviseur est formé d'une seule entrée et deux ports de sortie.

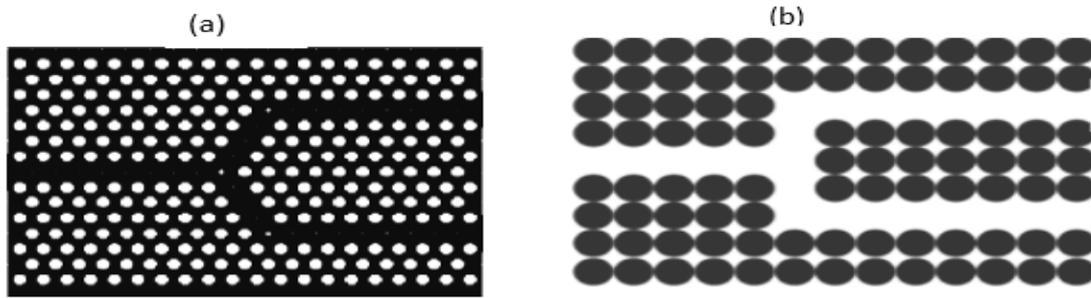


Figure II.4 : Structure schématique d'un diviseur 1x2 pour : (a) jonction Y et (b) jonction T.

### II.5.2.2 Diviseurs 1x4 à cristaux photoniques

Ce dispositif contient une seule entrée et quatre sorties, il peut être réalisé en utilisant une jonction Y ou une jonction T.



Figure II.5 : Structure schématique d'un diviseur 1x4 pour : (a) jonction Y et (b) jonction T.

### II.5.2.3 Diviseurs 1x8 à cristaux photoniques

C'est un composant qui comporte huit sortie et peut être conçu en utilisant une jonction Y ou une jonction T.

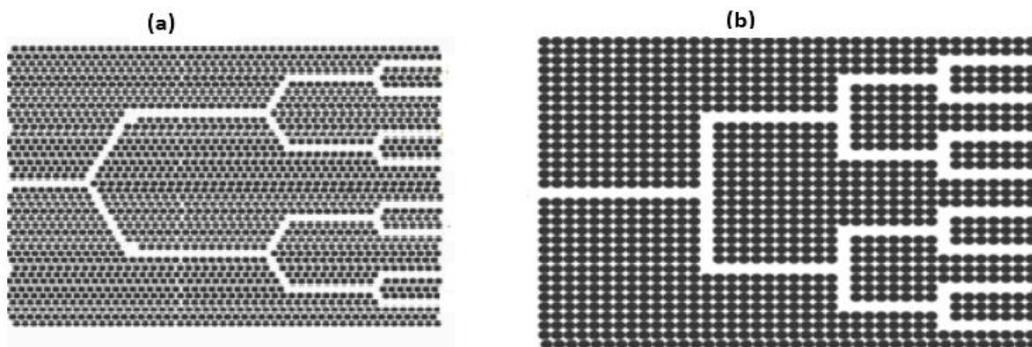


Figure II.6 : Structure schématique d'un diviseur 1x8 pour : (a) jonction Y et (b) jonction T.

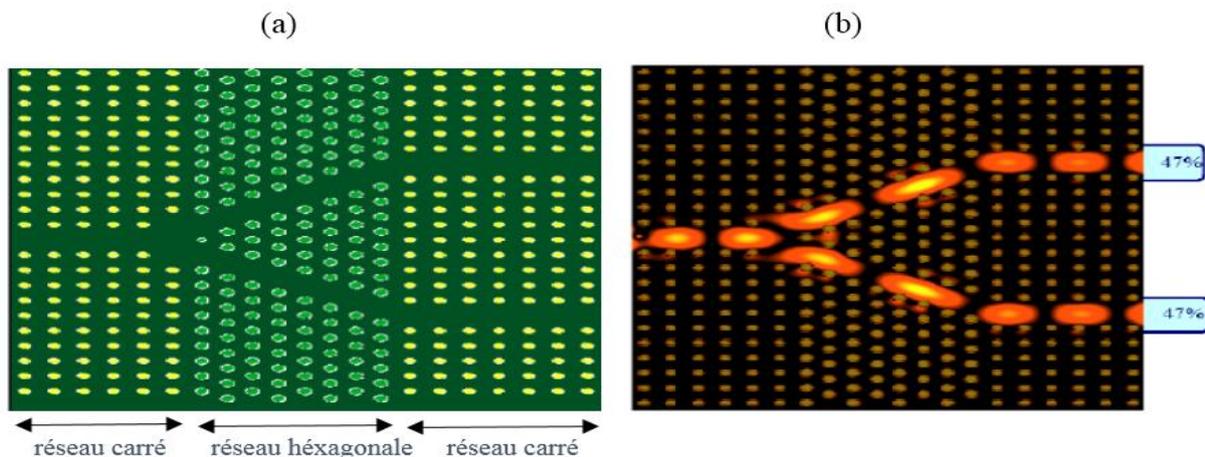
## II.6. Travaux réalisés sur les diviseurs de puissance à base de cristaux photoniques

Après de nombreuses recherches sur les diviseurs à base de cristaux photoniques, nous avons aperçus quelques travaux effectués auparavant. Donc, nous nous sommes inspirés par ces travaux pour étudier notre sujet en termes de méthodes, résultats de simulation, et finalement tirer quelques idées utiles pour la conception des diviseurs à base des CPs bidimensionnels.

Plusieurs groupes de recherche ont étudié différents types de diviseurs de puissance à base de cristaux photoniques bidimensionnels dans des réseaux carré et triangulaire, afin d'améliorer leurs performances. Dans le paragraphe suivant, nous présenterons les résultats de simulation de quelques travaux de différents groupes de recherche obtenus pour la jonction Y en utilisant les types 1x2, 1x4 et 1x8.

### II.6.a Diviseur 1x2

La structure 1x2 est la plus simple des diviseurs de puissance. Dans la référence [9], l'auteur a présenté dans son étude une conception à hétéro-structure : c'est une structure qui réunit deux types de réseaux, un réseau carré et un réseau hexagonal. Afin d'améliorer l'efficacité de transmission et minimiser les pertes par réflexions, l'auteur a modifié la géométrie de la structure au niveau de la jonction. Cette structure est illustrée sur la figure (II.7).



**Figure II.7 :** (a) : Diviseur de puissance à hétéro-structure photonique, (b) : distribution du champ électrique [9].

Dans cette étude, l'auteur a montré que le réseau carré est plus adapté aux guides d'ondes droits tandis que pour la zone de la jonction en forme de Y, le réseau hexagonal est privilégié. Le résultat de simulation pour cette hétéro-structure est illustré sur la figure (II.8). L'efficacité de transmission obtenue pour chaque port de sortie est de 47 %.

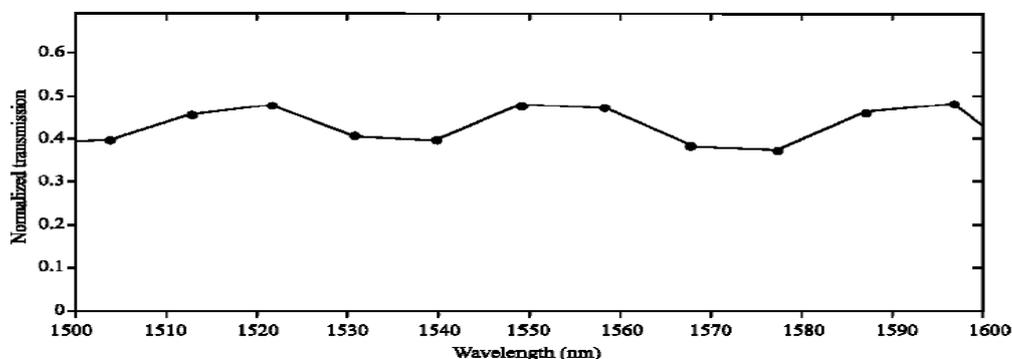


Figure II.8 : Spectres de transmission normalisée de l'hétéro-structure [9].

### II.6.b Diviseur 1X4

La structure schématique du diviseur 1x4 proposé par les auteurs de la référence [10] est représenté sur la figure (II.9). Le but de leur étude est d'optimiser la topologie du dispositif conçu afin d'améliorer la transmission sur une large gamme de longueurs d'onde dans tous les ports de sortie.

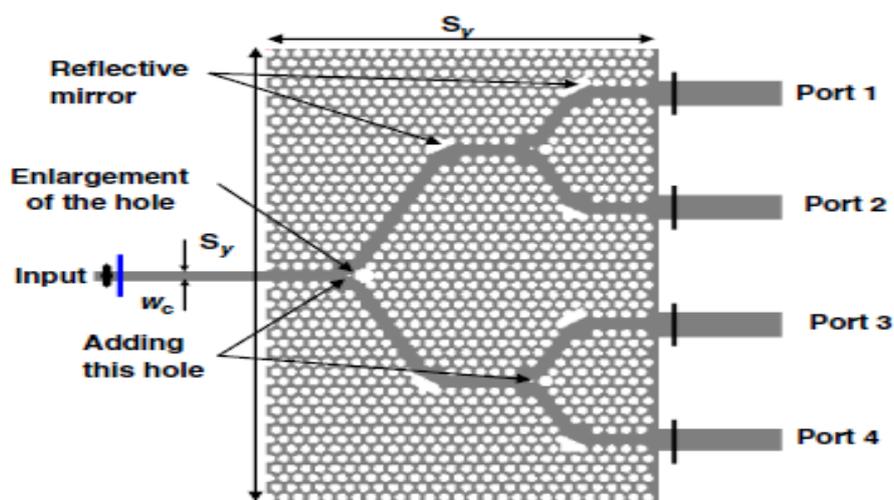


Figure II.9 : Structure optimisée d'un diviseur 1x4 [10].

Les différents résultats obtenus à la sortie des quatre ports sont présentés sur la figure (II.10). La transmission enregistrée à la longueur d'onde de 1.546  $\mu\text{m}$  est de 20 %, 25 %, 20 % et 19 % pour les ports 1, 2, 3, et 4, respectivement.

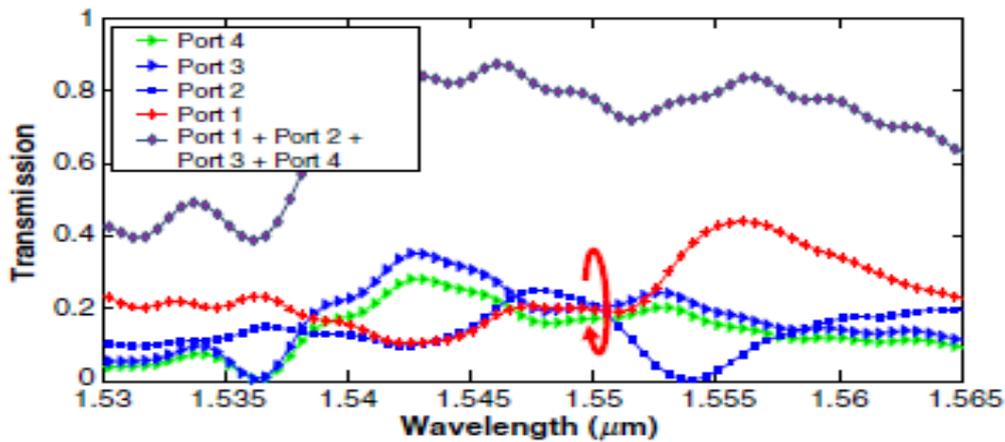


Figure II.10 : Réponse spectrale d'un diviseur 1x4 [10].

### II.6.c Diviseur 1x8

Dans la référence [10], les auteurs se sont focalisés sur la conception d'un diviseur de puissance 1x8, basé sur un cristal photonique bidimensionnel dans un réseau triangulaire. La figure (II.11) représente la structure schématique de ce dispositif.

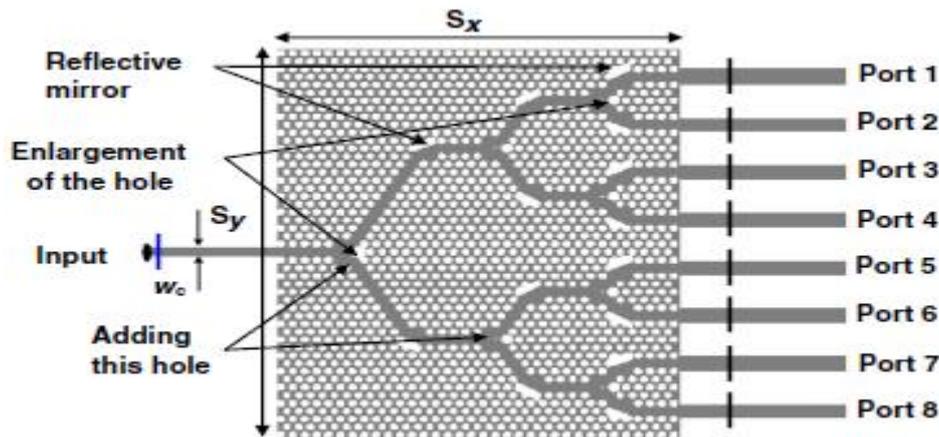


Figure II.11 : Structure optimisée d'un diviseur 1x8 [10].

Afin d'améliorer la réponse spectrale du diviseur proposé, les auteurs sont basées sur une technique d'optimisation qui consiste à modifier la géométrie de la zone de courbure et de la jonction Y. La figure (II.12) montre la réponse spectrale du diviseur 1 x 8 excité en mode TE. Selon les résultats de simulation obtenus par la méthode FDTD 2-D, les taux de

transmission relevé pour les 8 ports sont respectivement 12%, 12%, 12%, 0.9%, 0.9%, 10%, 12% et 12%.

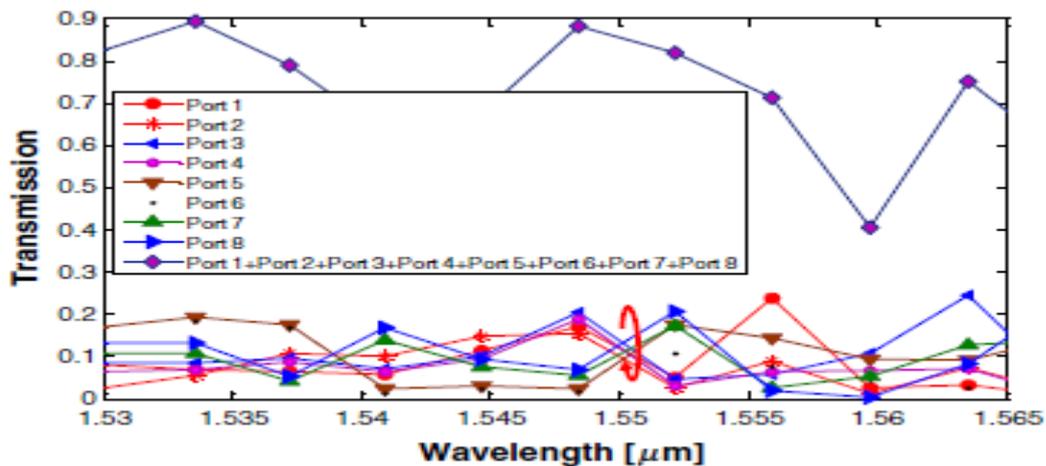


Figure II.12 : Réponse spectrale d'un diviseur 1x8 [10].

## II.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons évoqué les diviseurs de puissance et plus précisément les diviseurs à base de guides d'onde à cristaux photoniques. Plusieurs topologies portant sur l'utilisation de différentes techniques d'optimisation ont été présentés. Grâce à leur efficacité de transmission élevée et leur structure simple, ces dispositifs sont grandement utilisés dans les systèmes de télécommunication.

## **Référence chapitre II**

- [1] P. Sanchis, P. Bienstman, B. Luyssaert, R. Baets, J. Marti, « Analysis of Butt Coupling in Photonic Crystals », IEEE Journal of Quantum Electronics, vol.40, N°5, pp.541-550, 2004.
- [2] A. Benmerkhi, « Influence des paramètres géométriques sur la cavité à cristaux Photoniques bidimensionnels », thèse de doctorat, univ Constantine, 2008.
- [3] T. Baba, N. Fukaya et J. Yonekura, « Observation of light propagation in photonic crystal Optical waveguides with bends», Electronics Letters, vol.35, pp.654, 1999.
- [4] M. Zelsmann, « Nano-structures à base de cristaux photoniques en silicium sur isolant pour les circuits intégrés photoniques et l'émission de lumière », thèse de doctorat, univ Joseph Fourier Grenoble 1, 2003.
- [5] BOUGRIOU, FAIDA, « Etude des guides d'ondes à cristaux photonique bidimensionnel », Thèse de magister, univ Constantine 1, 2008.
- [6] BOUGRIOU, FAIDA, « Etude théorique matériaux à bandes interdites photonique bidimensionnels : applications dans le domaine du guidage optique et la détection », thèse de doctorat, univ. Constantine 1, 2013.
- [7] T. Fukazawa, A. Sakai, et T. Baba, « H-tree-type optical clock signal distribution circuit using a Si photonic wire waveguide », Japanese journal of applied physics, Vol. 41, N°12B, pp.1461–1463, 2002.
- [8] L. B. Soldano et E. C. Pennings, «Optical multi-mode interference devices based on selfimaging: principles and applications », Journal of lightwave technology, Vol. 13, N°4, pp. 615-627, 1995.
- [9] A. Ghaffari, F. Monifi, M. Djavid and M. S. Abrishamian, « Analysis of Photonic Crystal Power Splitters with Different Configurations » Journal of Applied Sciences, vol. 8, N°8, pp. 1416-1425, 2008.
- [10] Hadjira, Abri Badaoui, Mehadji, Abri, « Optimized 1×8 compact splitter based on photonic crystal using the two-dimensional finite-difference time-domain technique», Optical Engineering, Vol.54, N°067104, June 2015.

# **Chapitre III :**

## **Résultats et interprétations**

### III.1 Introduction

La modélisation électromagnétique des propriétés des cristaux photoniques nécessite en général un gros investissement en programmation et en analyse numérique, et constitue une activité exigeante en compétence et en temps. Le développement des méthodes de modélisation optiques précises et rapides reste donc primordial pour l'étude de ces structures. De plus plusieurs simulateurs ont été conçus pour faciliter cette tâche, parmi eux se trouve le simulateur Fullwave qui sera largement utilisé dans les simulations réalisées dans ce chapitre.

Nous nous intéresserons dans ce chapitre à la conception de deux types de diviseurs de puissance  $1 \times 2$  et  $1 \times 4$  créés à base de guides d'ondes à cristaux photoniques. Nous montrerons que ces composants présentent beaucoup de pertes, notamment les pertes au niveau des virages, et que l'utilisation d'une technique d'optimisation est indispensable afin d'améliorer l'efficacité de transmission dans ces composants.

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

RSoft est un logiciel de simulation basé sur les méthodes numériques de modélisation telle que : la méthode de différences finies dans le domaine temporel (FDTD) et la méthode des ondes planes (PWE). Dans RSoft, il existe plusieurs modules intégrés, chaque module assure une fonction bien précise, parmi ces modules on trouve : BeamPROP, FullWAVE, BandSOLVE, GratingMOD et Diffract MOD. Dans notre travail, nous utiliserons les deux modules : BandSOLVE et FullWave.

La figure (III.1) représente la fenêtre principale du logiciel RSoft CAD. Elle comporte une barre de menus située en haut de la fenêtre, une barre d'outils qui comporte plusieurs icônes, et une barre d'état située en bas de la fenêtre.

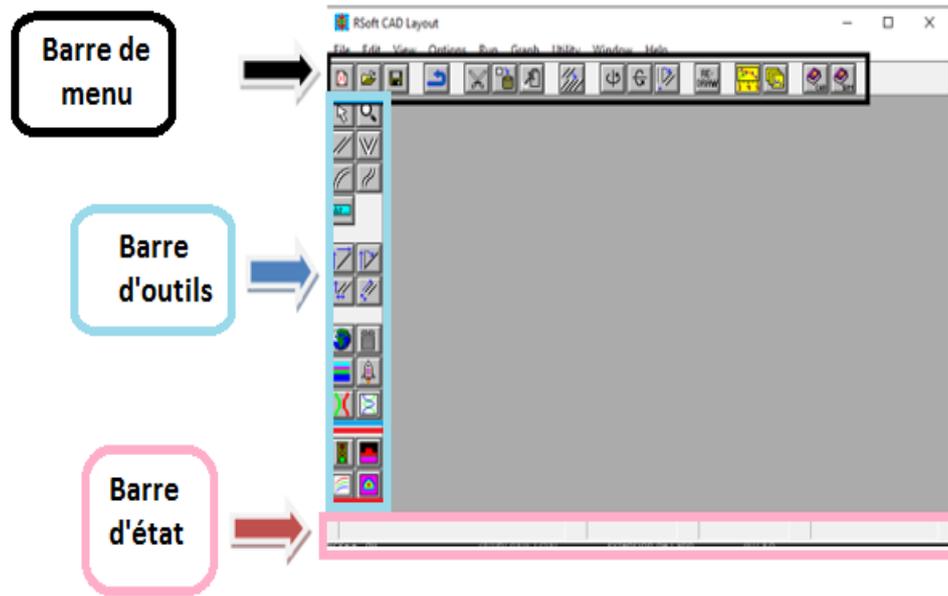


Figure III.1: Fenêtre principale de Rsoft CAD.

### III.2.1 Simulateur FullWAVE

L'outil de simulation FullWAVE fait partie de RSoft photonique, il est basé sur la technique FDTD. Il calcule le champ électromagnétique en fonction du temps et de l'espace dans une structure d'indice de réfraction donnée en réponse à une excitation électromagnétique. C'est un outil idéal pour étudier la propagation de la lumière dans une grande variété de structures photoniques. Il permet à l'utilisateur de définir les propriétés du matériau et la géométrie d'un dispositif photonique. La figure (III.2) montre la fenêtre principale des paramètres de simulation de FullWAVE.

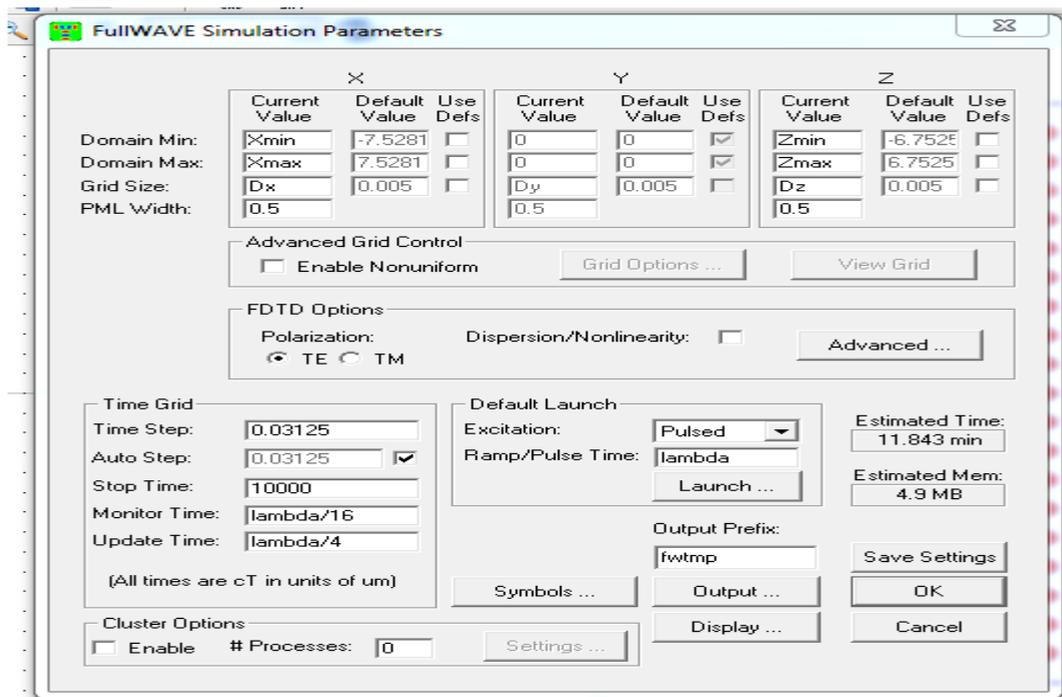


Figure III. 2: Fenêtre principale des paramètres de simulation de FullWAVE.

### III.2.2 Simulateur BandSOLVE

BandSOLVE est un outil de simulation, intégré dans RSoft, développé afin d'analyser des structures à BIP. Ce module de simulation utilise la méthode des ondes planes pour calculer les bandes interdites de structures périodiques. BandSOLVE est idéal pour produire des structures de bandes pour les structures photoniques à BIP, telles que les structures 2D et 3D avec ou sans défauts. La figure (III.3) montre la fenêtre principale des paramètres de simulation de BandSOLVE.



Figure III. 3: Fenêtre principale des paramètres de simulation de BandSOLVE.

### III.3 Diviseur de puissance à base de guides d'onde

#### III.3.1 Structure d'étude sans défauts

La structure du cristal photonique considérée est formée par des trous d'air de section circulaire de rayon  $R = 0,167 \mu\text{m}$ . Les trous sont répartis selon un réseau triangulaire bidimensionnel de période  $a = 0,48 \mu\text{m}$  ( $a$  est la distance entre le centre de deux motifs adjacents) et entourés par un matériau diélectrique d'indice de réfraction  $n = 3,24$ . Le schéma de la structure est reporté sur la figure (III.4).

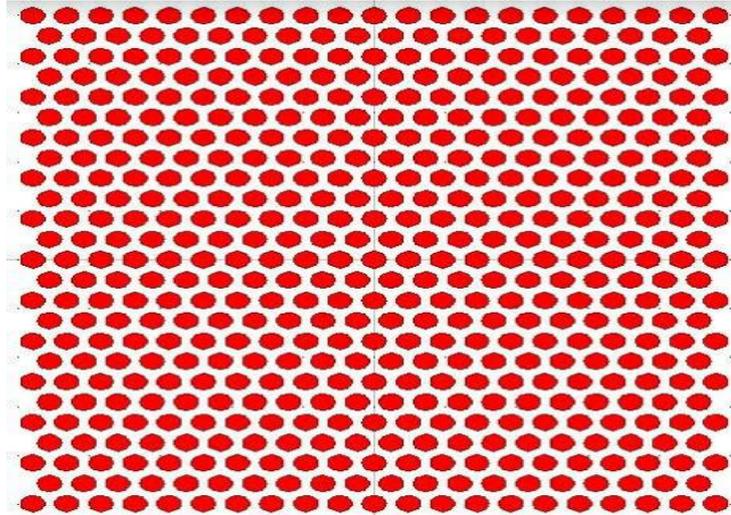


Figure III.4 : Structure sans défauts.

Le diagramme de dispersion du cristal photonique sans défauts est calculé en utilisant le simulateur BandSolve basé sur la méthode des ondes planes. La figure (III.5) montre que la structure possède deux bandes interdites en polarisation TE, dont l'une est large et qui s'ouvre pour des fréquences normalisées entre  $0.235 < a/\lambda < 0.34$ , correspondant aux longueurs d'onde  $1.41 \mu\text{m} < \lambda < 2.04 \mu\text{m}$ . Dans notre étude, nous nous intéresserons à la plus large bande interdite TE qui permet d'interdire la propagation des ondes électromagnétiques dans la gamme des télécommunications optiques.

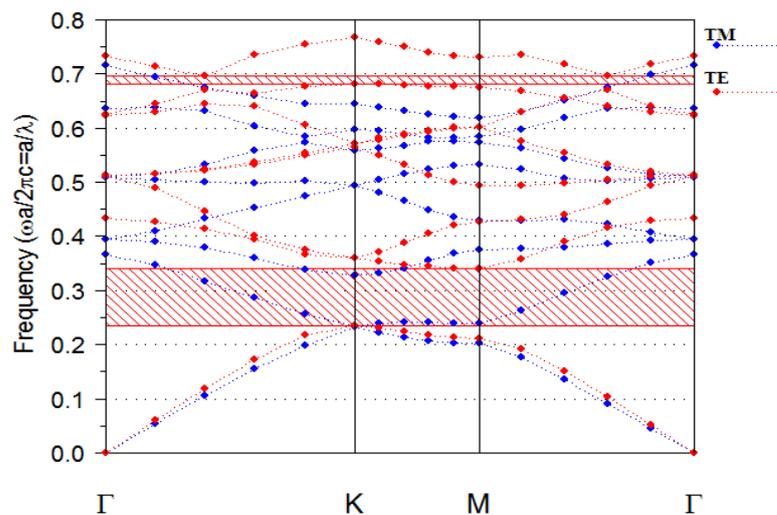


Figure III.5 : Diagramme de bandes de la structure d'étude.

### III.3.2 Diviseur 1x2

#### III.3.2.1 Structure non optimisée

Nous entamons notre étude par la conception d'un diviseur 1x2, réalisé par l'association de trois guides d'onde : un guide d'onde droit et deux guides courbés. La zone de couplage entre les trois guides est en forme de Y, Elle est appelée jonction Y. La figure (III.6) montre la structure schématique de notre diviseur.

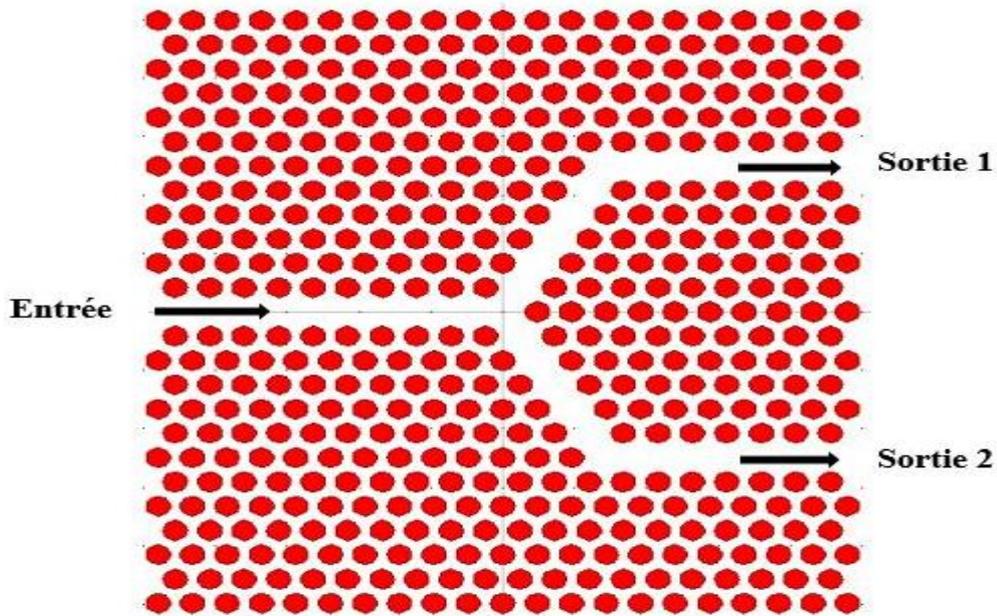


Figure III.6 : Structure schématique du diviseur 1x2 non optimisé

En utilisant le simulateur Fullwave basé sur la méthode des différences finies, nous avons calculé le spectre de transmission de notre dispositif. Selon les résultats présentés sur la figure (III.7), il est clair que la transmission est très faible sur toute la gamme de longueur dans les deux ports de sortie. Ceci peut être expliqué à cause des pertes présentes au niveau des virages. Cependant, au passage de l'onde, le mode du guide droit va se coupler avec celui du guide courbé, ce qui provoque un désaccord modal au niveau de la jonction et de la courbure.

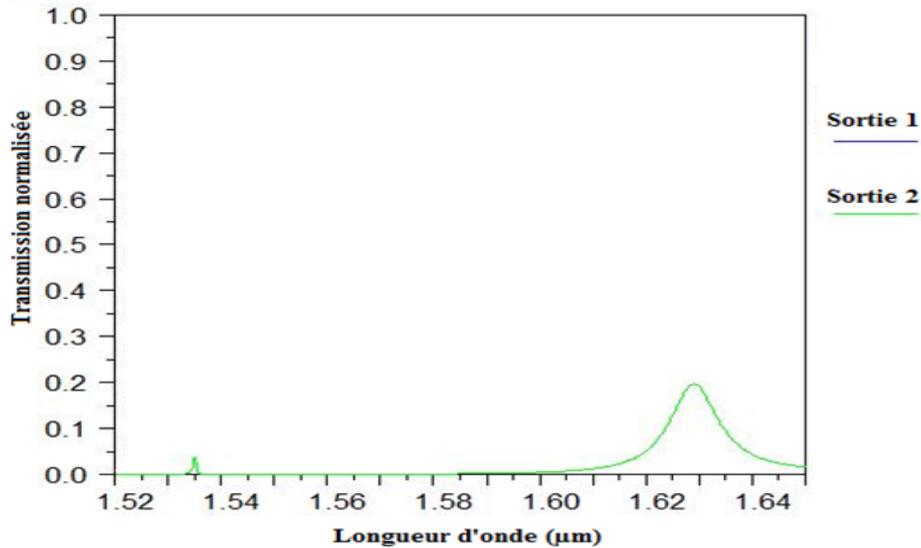


Figure III.7 : Spectre de transmission d'un diviseur 1x2 non optimisée

L'étude suivante porte sur l'optimisation de notre composant afin d'obtenir une meilleure transmission sur une large gamme de longueurs d'onde tout en réduisant les pertes dues à la jonction et aux guides virages.

### III.3.2.2 Diviseur 1x2 optimisé

Dans cette section, nous allons nous concentrer sur l'optimisation de la topologie du dispositif proposé, afin d'améliorer la transmission sur une large gamme de longueurs d'onde. La technique d'optimisation de ce dispositif est répartie en deux étapes :

- La première consiste à améliorer la jonction Y, en faisant varier le rayon du trou  $R_1$  positionné au milieu de la jonction.
- La deuxième étape est basée sur la modification de la géométrie des guides d'onde virages, en introduisant un seul trou  $R_2$  au niveau de la zone de courbure dans chaque guide.

a) Optimisation de la jonction Y

L'optimisation de la jonction Y consiste à faire varier le rayon  $R_1$  du trou situé à la sortie du guide d'entrée, en maintenant le reste de la structure inchangé, comme il est montré sur la figure (III.8)

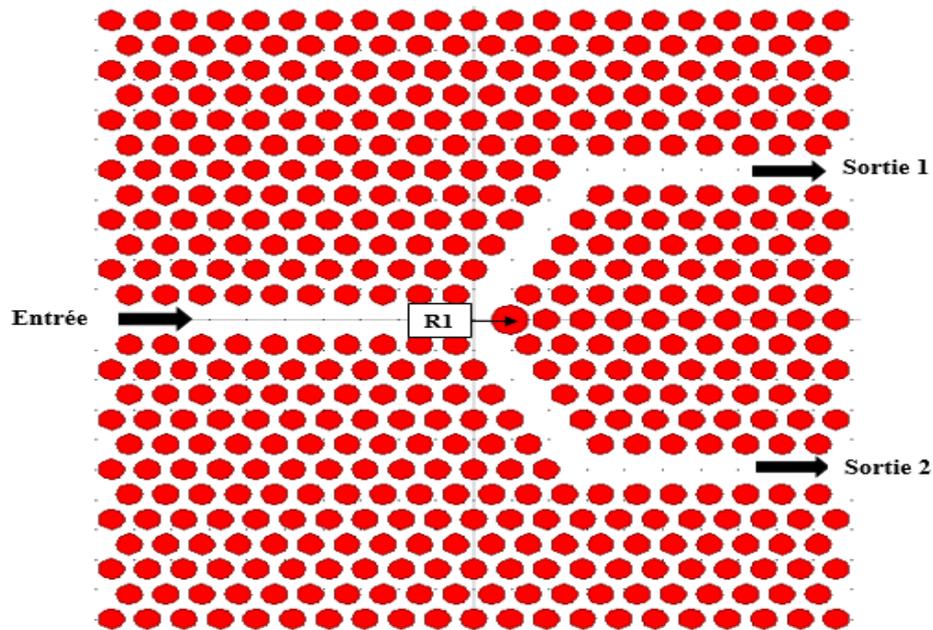
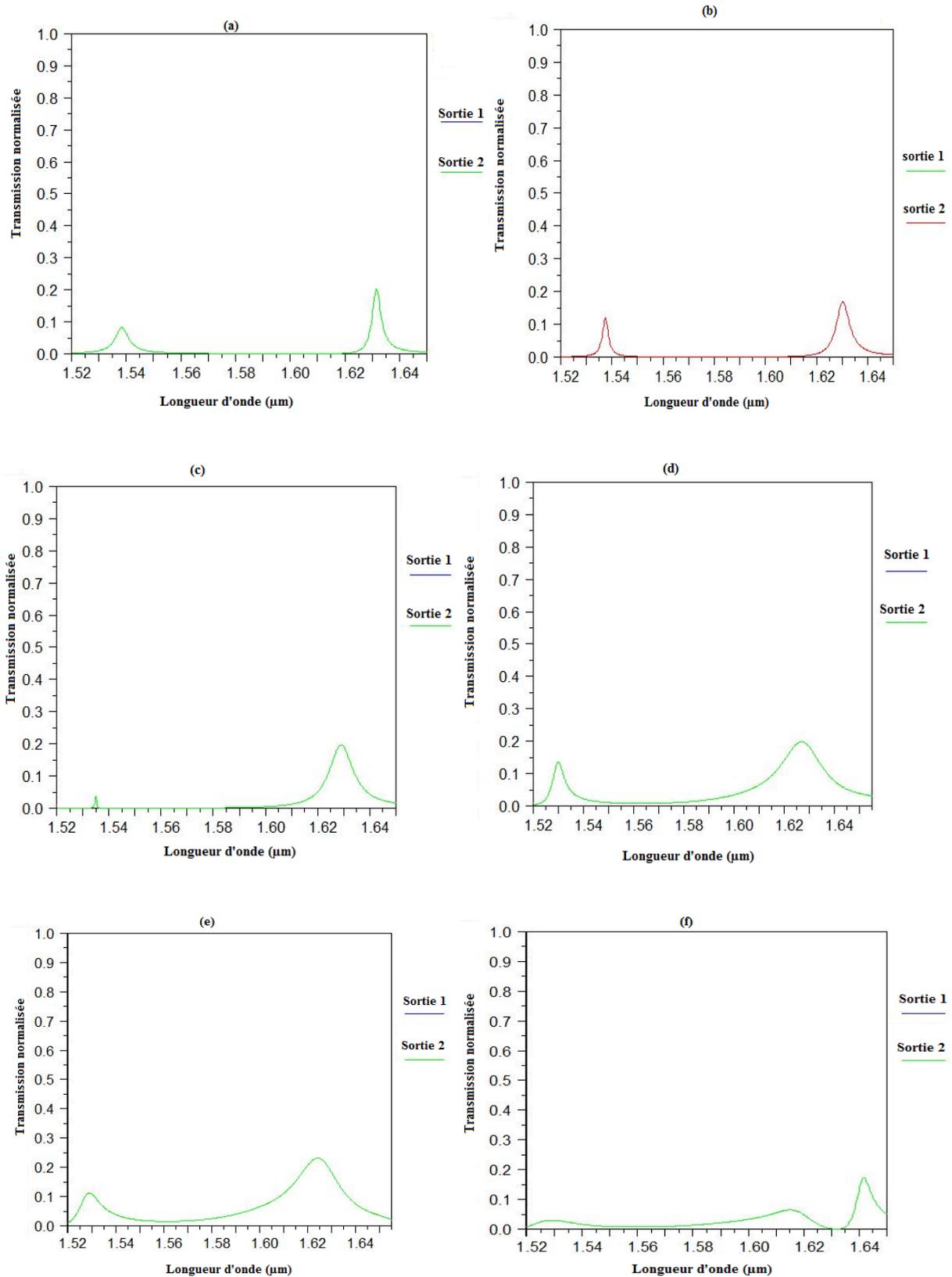


Figure III.8 : Structure schématique optimisée de la jonction Y.

Après avoir simulé cette structure en utilisant le logiciel Fullwave, nous avons reporté sur la figure (III.9) les résultats obtenus pour différentes valeurs du rayon  $R_1$ . Selon cette figure, nous observons une légère amélioration de l'efficacité de transmission par rapport au cas de la structure non optimisée (figure (III.7)). On note que la meilleure transmission est obtenue pour  $R_1=0,24\mu\text{m}$ .



**Figure III.9 :** Spectre de transmission du diviseur 1x2 en fonction de différentes valeurs du rayon  $R_1$  : (a)  $R_1=0.12 \mu\text{m}$ , (b)  $R_1=0.14 \mu\text{m}$ , (c)  $R_1 = R =0.167 \mu\text{m}$ , (d)  $R_1=0.22 \mu\text{m}$ , (e)  $R_1=0.24 \mu\text{m}$ , (f)  $R_1=0.26\mu\text{m}$ .

b) Optimisation des guides courbés

Les pertes dus aux guides virages peuvent être minimisées, en ajoutant un miroir réfléchissant au niveau de la zone de courbure pour chaque guide virage. Dans notre cas, l'ajout d'un trou  $R_2$  figure (III.10) permet l'amélioration de la transmission de manière significative dans les deux ports de sortie.

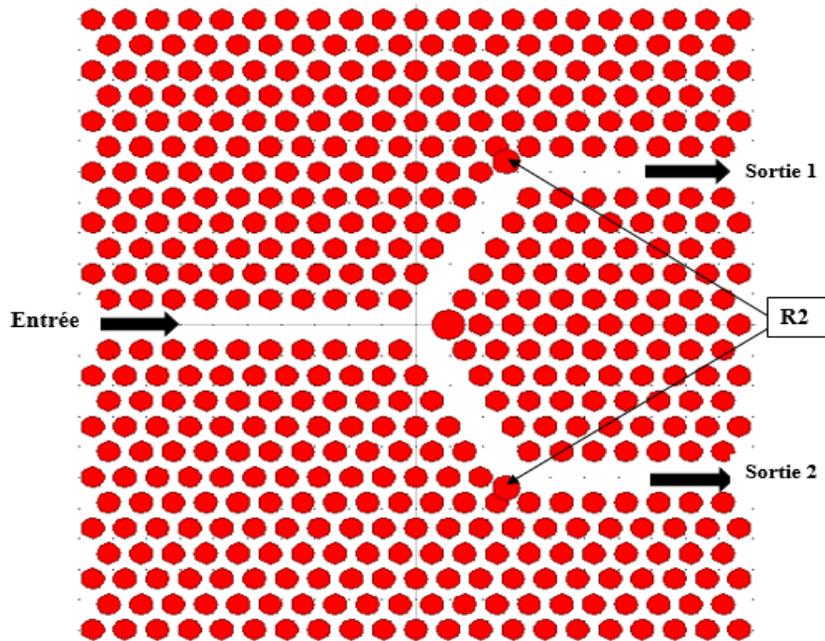
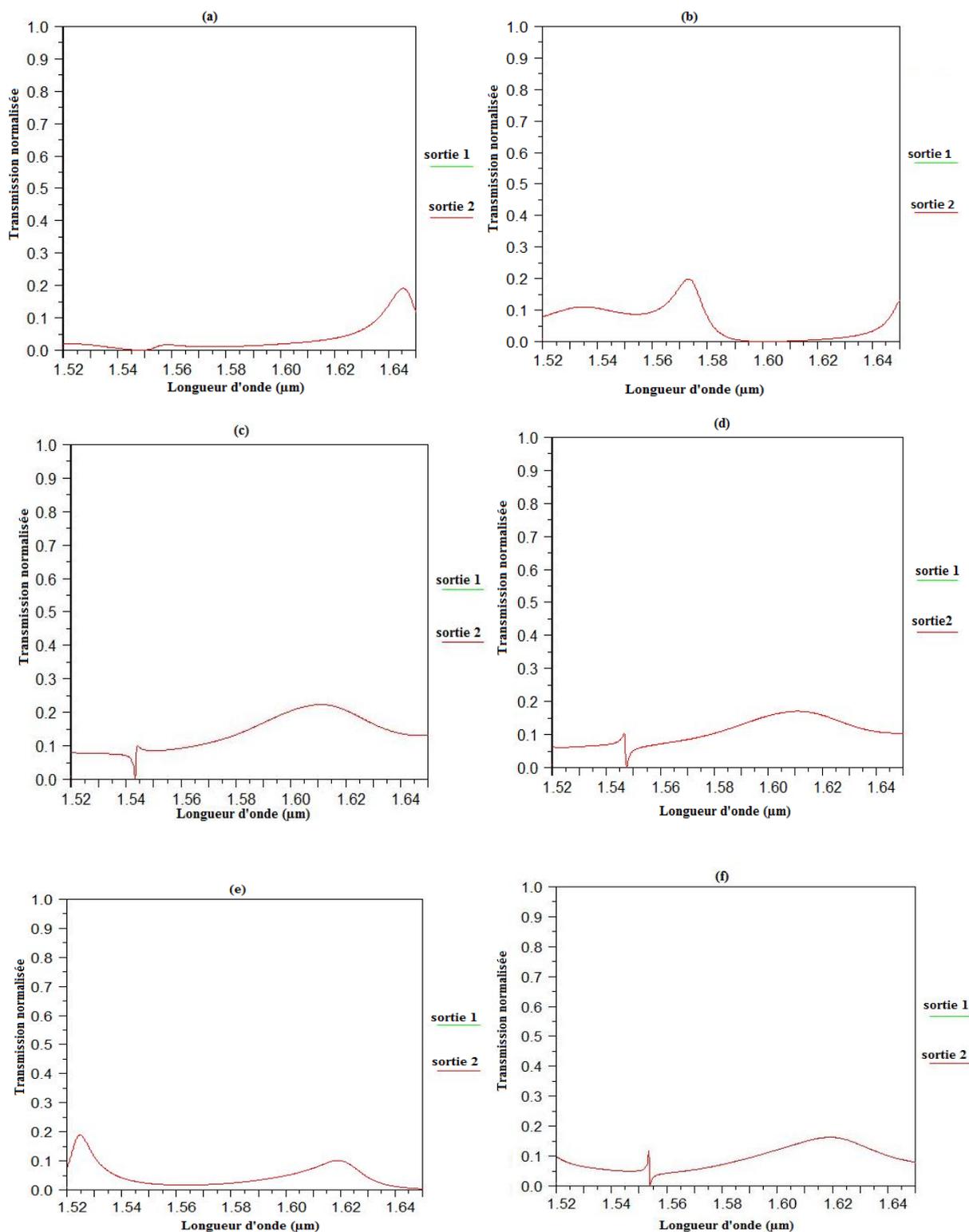


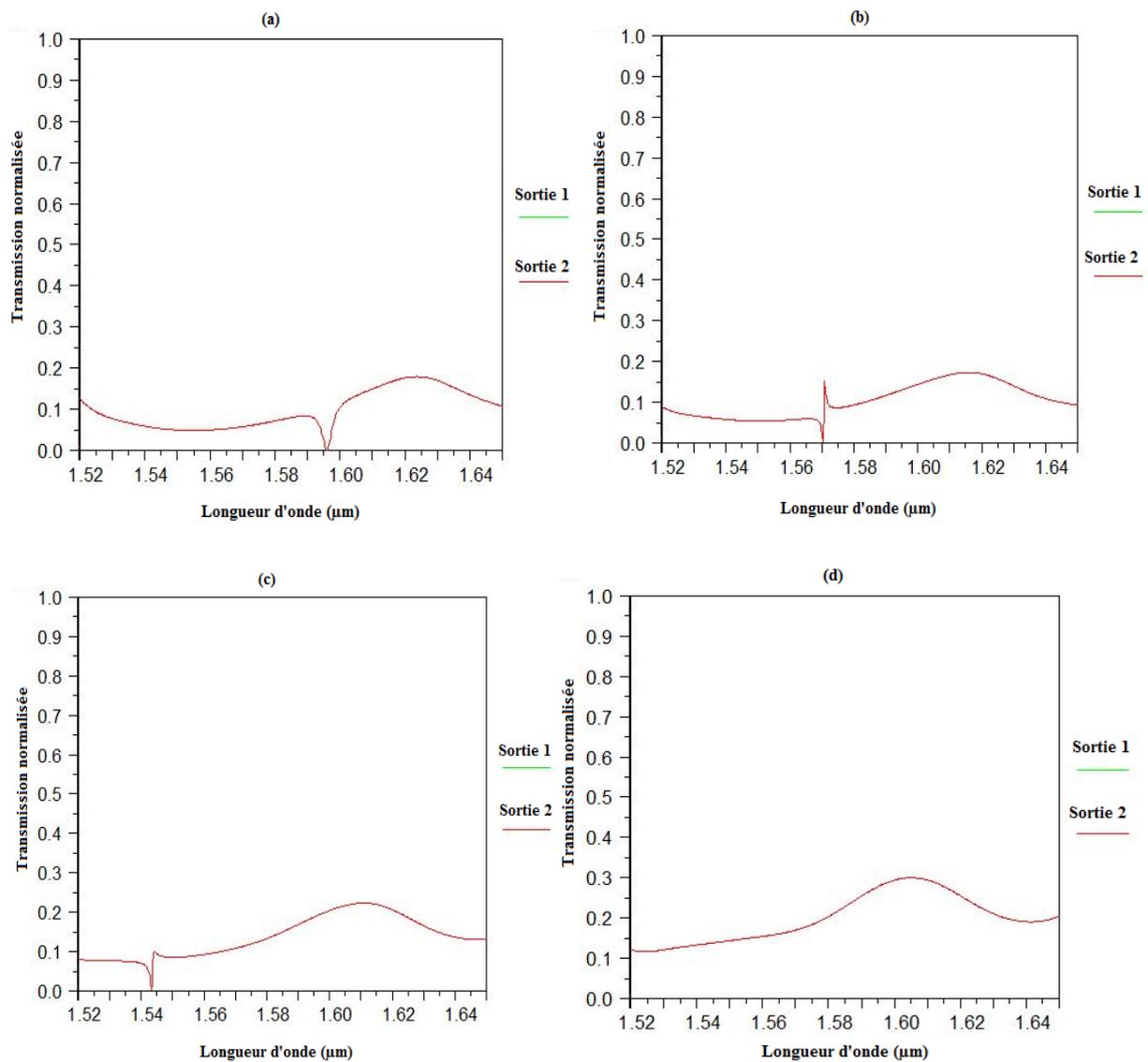
Figure III.10 : Structure optimisée du guide courbé.

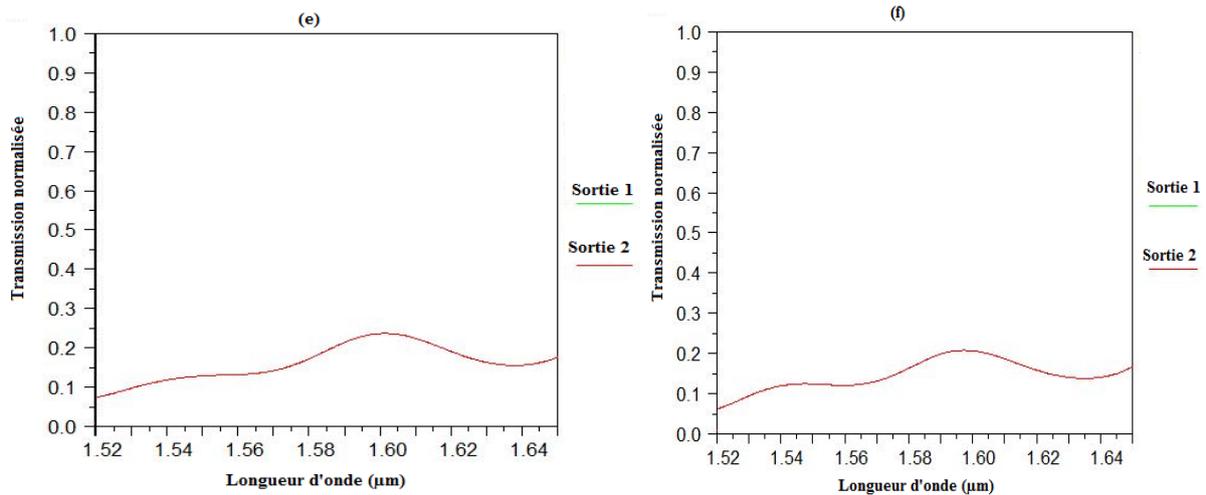
Dans un premier temps on calcule la transmission en fonction de la position du défaut  $R_2 = R$  placé dans les deux zones de courbure. La figure (III.11) montre les résultats obtenus pour différentes valeurs de la position (P) de  $R_2$ . On remarque une transmission notable sur une large gamme de longueurs d'onde. On retient la position  $P = \{x=a/4 ; z=a/2\}$  comme résultat optimal.



**Figure III.11** : Spectre de transmission du diviseur 1x2 en fonction de différentes positions du trous  $R_2$  : (a)  $\{x= 3a/8 ; z= 3a/4\}$  ; (b)  $\{x=2a/5 \text{ et } z=2a/3\}$  ; (c)  $\{x=a/4 \text{ et } z=a/2\}$  ; (d)  $\{x=a/3 \text{ et } z=3a/6\}$  ; (e)  $\{x=a/16 \text{ et } z=a/8\}$  ; (f)  $\{x=3a/8 \text{ et } z=a/4\}$ .

L'étape suivante consiste à optimiser le rayon du défaut en considérant dans nos calculs la valeur optimale de la position obtenue précédemment. Sur la figure (III.12) on reporte la transmission en fonction de différentes valeurs du rayon  $R_2$ . Sur cette figure, on remarque que les propriétés de transmission de notre dispositif sont clairement améliorées. On peut dire donc qu'avec cette nouvelle configuration, le mode propagé n'est plus affecté par la présence de la zone de courbure. Le taux de transmission maximal est de 30%, il est obtenu pour  $R_2 = 0.20\mu\text{m}$ .

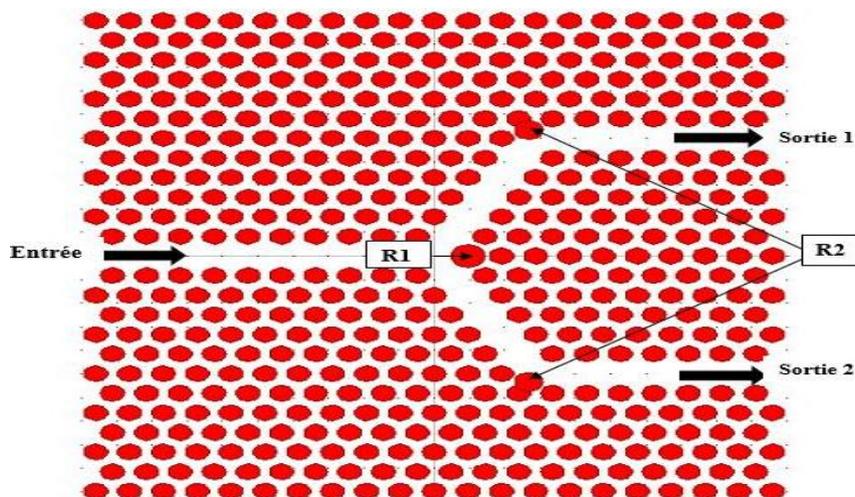




**Figure III.12** : Spectre de transmission du diviseur 1x2 en fonction de différentes valeurs du rayon  $R_2$  : (a)  $R_2=0.12 \mu\text{m}$ , (b)  $R_2=0.14 \mu\text{m}$ , (c)  $R_2 = R =0.167 \mu\text{m}$ , (d)  $R_2=0.20 \mu\text{m}$ , (e)  $R_2=0.22 \mu\text{m}$ , (f)  $R_2=0.24\mu\text{m}$ .

### III.3.2.3 Structure finale

En se basant sur les résultats obtenus précédemment, nous avons conçu la structure finale du diviseur 1x2, qui est illustré sur la figure (III.13). A partir des simulations 2D-FDTD reportées sur la figure (III.14), on note un taux de transmission de 30%. Il est nettement amélioré par rapport au cas du diviseur non optimisé, où la transmission était presque nulle (figure III.7).



**Figure III.13** : Structure finale du diviseur 1x2

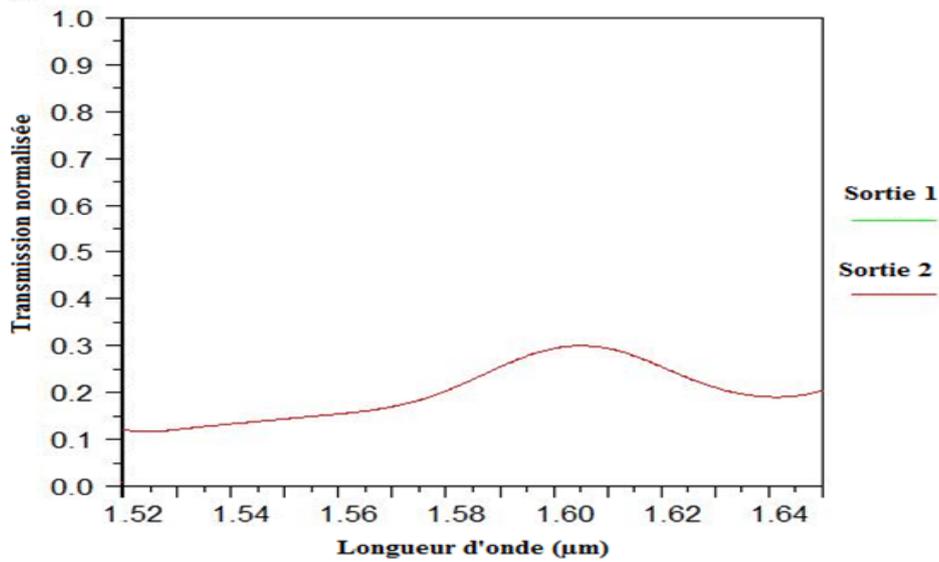


Figure III.14 : Spectre de transmission de la structure final du diviseur 1x2

### III.3.3 Diviseur 1x4

#### III.3.3.1 Structure non optimisée

Dans la section précédente, nous avons montré que l'efficacité de transmission d'un diviseur 1x2 non optimisé est faible. Nous pouvons donc imaginer que lorsque le nombre de ports de sortie augmente, l'efficacité de transmission se dégrade. Pour vérifier cette hypothèse, on considère la structure schématique du diviseur de puissance 1x4 illustrée sur la figure (III.15).

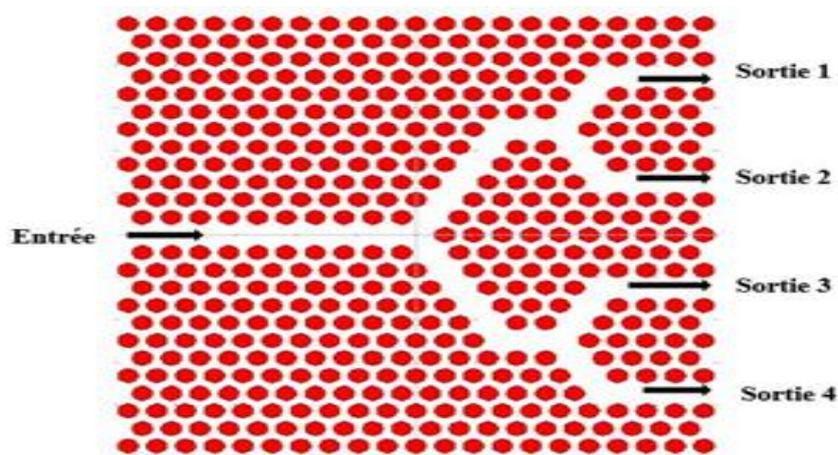


Figure III.15 : Structure schématique du diviseur 1x4 non optimisé

Selon les résultats présentés sur la figure (III.16), il est clair que la transmission est très faible sur toute la gamme de longueurs d'onde. Afin d'améliorer ce résultat, la technique d'optimisation utilisée précédemment peut être aussi appliquée dans ce cas.

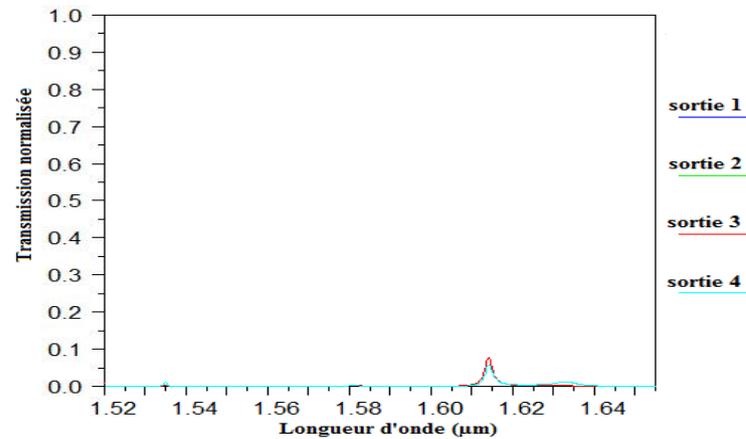


Figure III.16 : Spectre de transmission d'un diviseur 1x4 non optimisé

### III.3.3.2 Structure optimisée

La technique d'optimisation utilisée précédemment est entreprise dans cette étude. Elle est basée sur la modification de la structure du diviseur au niveau de la jonction et les zones de courbure. Nous obtenons finalement la structure optimisée présentée sur la figure (III.17)

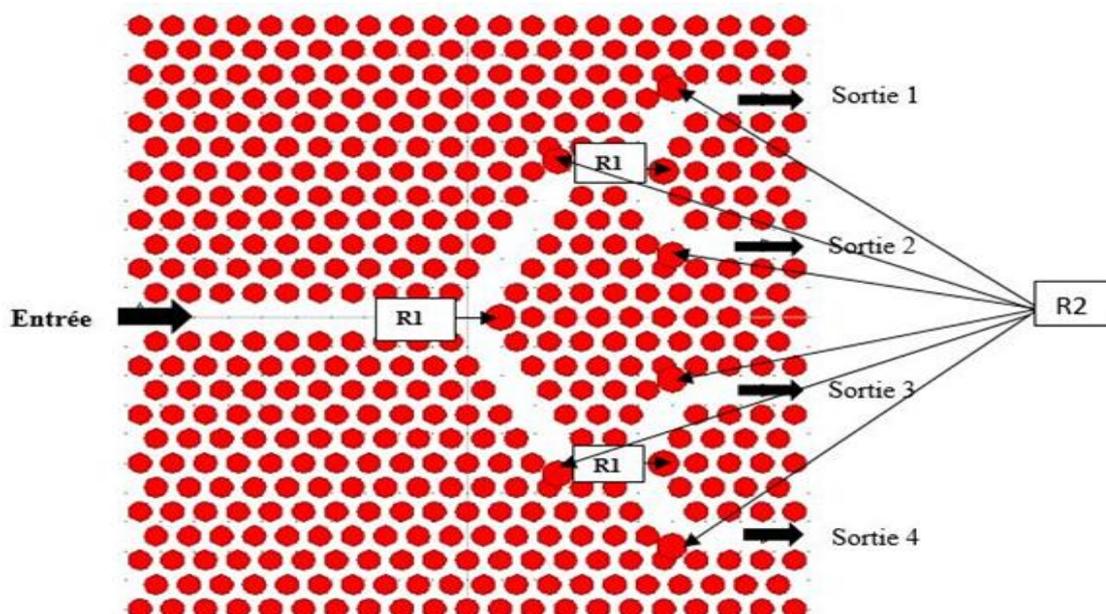
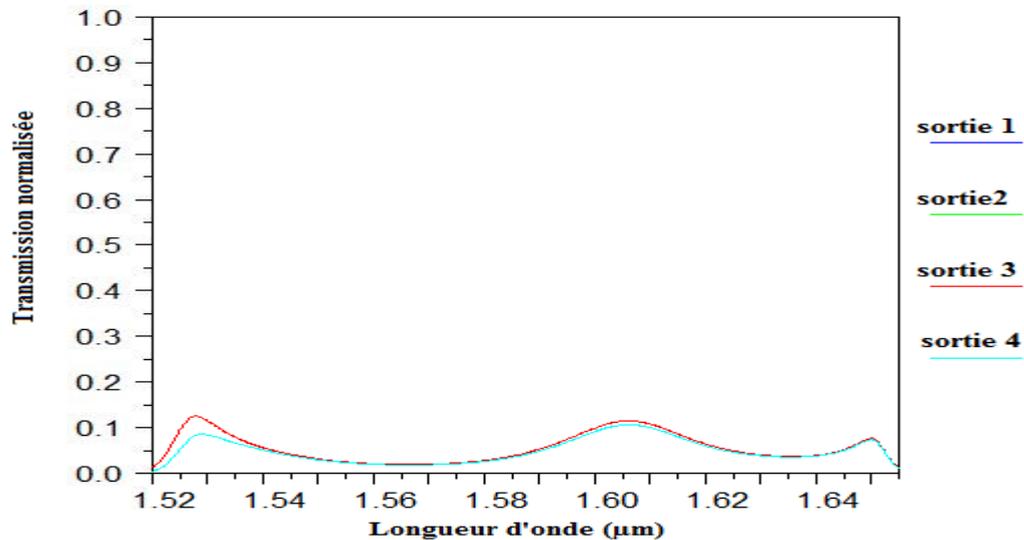


Figure III.17 : Structure schématique du diviseur 1x4 optimisé

La figure (III.18) représente le résultat prélevé à la sortie des différents ports du diviseur 1x4 optimisé. Suite à cette technique d'optimisation, on remarque une amélioration notable de l'efficacité de transmission sur toute la gamme de longueur d'onde.



**Figure III.18 :** Spectre de transmission du diviseur 1x4 optimisé

### Conclusion

La problématique de ce chapitre concerne l'étude des diviseurs de puissance 1x2 et 1x4 à base de cristaux photoniques bidimensionnels. Cette étude est basée sur l'utilisation d'une technique d'optimisation qui consiste à modifier la zone de la jonction et les zones de courbure. Cette optimisation a pour rôle d'améliorer la qualité de la transmission et d'avoir une puissance équitable à la sortie de tous les ports.

## **Conclusion générale**

Cette étude souligne l'intérêt d'utiliser les cristaux photoniques dans les systèmes de télécommunication. Ces matériaux, dont la permittivité change périodiquement sur l'échelle des longueurs d'onde, se caractérisent par la présence d'une bande interdite photonique qui empêche la propagation de la lumière à l'intérieur de la structure. L'utilisation de cet effet de bande interdite ouvre la voie à la réalisation de nombreuses fonctions optiques. Les applications potentielles des cristaux photoniques sont multiples et variées : réalisation de guides d'ondes, diviseur de puissance, cavités résonantes, filtres sélectifs, démultiplexeurs, et fibres optiques....

L'ensemble des travaux présentés dans ce mémoire ont été consacrés pour la conception de diviseurs de puissance, en utilisant une jonction Y à base de cristaux photoniques bidimensionnels. Dans ce contexte, nous avons débuté par l'étude d'un diviseur 1x2 basé sur le couplage entre guides d'onde, créés par la suppression d'une seule rangée de motifs. Pour effectuer la modélisation d'un tel dispositif, nous avons utilisé le simulateur Fullwave.

Afin d'obtenir une meilleure efficacité de transmission sur une large gamme de longueurs d'onde, nous avons tout d'abord optimisé la jonction Y en variant le rayon du trou  $R_1$ , situé au centre de la jonction. Par la suite, nous avons modifié la zone de courbure dans les guides virage, en insérant un trou de rayon  $R_2$  au niveau de la courbure, ce qui a permis d'améliorer de manière significative la transmission de notre dispositif. La même technique d'optimisation a été utilisée dans le cas d'un diviseur 1x4, afin d'améliorer ses caractéristiques de transmission.

## 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. Ces structures présentent une propriété optique unique qui est la bande interdite photonique (BIP), dans laquelle aucun mode électromagnétique ne peut se propager.

Dans ce travail, nous nous sommes focalisés sur l'étude des guides d'ondes courbés qui sont élaborés afin de réaliser des diviseurs de puissances (1x2) et (1x4) en utilisant la jonction Y. L'amélioration de la transmission de ces composants repose sur la modification de la jonction Y et de la zone de courbure.

**Mots clés :** cristaux photoniques, bande interdite photonique, guide d'onde, diviseur de puissance.

## Abstract

Photonic crystals (PCs) are defined as artificial structures that exhibit periodic modulation of their refractive indices in one or more directions in space. These structures exhibit a unique optical property, which is the photonic band gap (BIP) in which no electromagnetic mode can propagate.

In this work, we focused on the study of curved waveguides which are developed in order to achieve power dividers (1x2) and (1x4) using the Y junction. The improvement of the transmission of these components relies on the modification of the Y junction and the curved region.

**Keywords:** Photonic crystals, Photonic band gap, waveguide, power divider.