



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID - TLEMCCEN

MEMOIRE

Présenté à :

FACULTE DES SCIENCES – DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

Pour l'obtention du diplôme de :

MASTER EN PHYSIQUE

Spécialité : Physique Computationnelle

Par :

KOULLAL Amina

Sur le thème

Contribution à la résolution numérique des équations de Maxwell dans le domaine temporel-application à la propagation des ondes électromagnétiques dans les fibres à cristaux photoniques.

Soutenue publiquement le 27 /06/2021 devant le jury composé de :

M ^{me} Ines MEDJAHDI	MCB à l'Université de Tlemcen	Présidente
Mr Abdelhak CHIKHAOUI	Professeur à l'Université de Tlemcen	Encadreur
M ^{elle} Farah LALLAM	MCB à l'Université de Tlemcen	Examinatrice

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



Dédicaces

Ce modeste le travail est dédié : A mon cher papa qui est ma source
d'inspiration et à ma chère maman qui est ma fierté, ceux qui m'ont soutenue
dans les joies et les peines, en témoignage de ma reconnaissance envers le
soutien, les sacrifices et tous les efforts qu'ils ont fait pour mon éducation ainsi
que ma formation ;

À Mes frères Ahmed, Mohamed

À tous mes proches de la famille KOULLAL ; Sans oublier la famille

BOUSMAHA, BELOUDNINE;

À mes meilleurs amies : Banaoum Samia, Banaoum Lamia, Bekkouche Sabrine

; À tous mes chers amis et mes collègues de l'Université de TLEMCEN;

Remerciements

Ce travail de mémoire a été réalisé au sein de l'équipe Approximation et Stabilité des Systèmes Non Linéaire du laboratoire d'Automatique de L'université Abou-Bekr-Belkaid-Tlemcen sous la direction de Monsieur le professeur Abdelhak CHIKHAOUI.

J'adresse mes profonds remerciements à mon encadreur Monsieur Abdelhak CHIKHAOUI qui a toujours montré de l'enthousiasme pour mon travail et je suis très reconnaissant pour la confiance qu'elle m'a accordée, ses conseils judicieux, sa disponibilité et le soutien constant qu'il a prodigué au cours de l'élaboration de ce travail.

Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements aux membres du jury :

M^{ME} MEDJAHDI Maître de Conférences « B » à l'Université de Tlemcen, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant la présidence du jury.

M^{elle} Farah ALLAM, Maître de Conférences « B » à l'Université de Tlemcen, pour avoir accepté de juger ce travail.

Amina.k

SOMMAIRE

LISTES DES FIGURES.....	i
LISTE DES ABREVIATION.....	a
INTRODUCTION GENERALE.....	1
1- NOTE HISTORIQUE.....	2
2- PROBLEMATIQUE	3
REFERENCE	6
CHAP I- GENERALITES SUR LES CRISTAUX PHOTONIQUES	8
I- DEFINITION DES CRISTAUX PHOTONIQUES.....	9
II -CONCEPT DES BANDES INERDITES PHOTONIQUES	9
III- L'ANALOGIE PHOTON-ELECTRON.....	10
a. Étude électromagnétique	10
b. Etude électrique	11
IV-LES CARACTERISTIQUE DES CRISTAUX PHOTONIQUE	12
V- CLASSE DES CRISTAUX PHOTONIQUES	12
V-1 Cristal photonique à une dimension 1D.....	12
V-2 Cristal photonique à deux dimensions 2D.....	12
V-3 Cristal photonique à trois dimensions 3D	13
VI- DIAGRAMME DE BANDES	14
VI-1 Le réseau direct	13
VI-2 Le réseau réciproque	14
VI-3 La zone de Brillouin irréductible.....	15
VI-4 Diagrammes de bandes des cristaux photonique1D.....	17
VI-5 DIAGRAMME DES BANDES A CRISTAUX PHOTONIQUES 2D.....	18

Sommaire

VII- INDICE DE PHASE ET INDICE DE GROUPE	19
VIII- MATERIAUX BIP A DEFAULT.....	19
a. Les défauts ponctuel	19
b. Défauts linéaires et guide d'ondes.....	20
IIX-1 Fibres optiques.....	21
IIX-2Nouvelles fibres optiques : les fibres à cristaux photoniques.....	22
IIX-3 Concept des fibres à cristaux photoniques	22
IIX-4 Classification des fibres à cristaux photoniques.....	22
CONCLUSION	23
RÉFÉRENCE	24
CHAP II- METHODES ET OUTILS NUMERIQUES.....	28
II- METHODE NUMERIQUES DE CALCUL	28
II-1 la méthode des matrices de transfert (TMM).....	28
II-2 la méthode des réseaux de diffraction	28
II-3 la méthode d'élément fini (FEM).....	29
II-4 la méthode des ondes planes.....	29
II-5 Modélisation de la différence finie dans le domaine temporelle	
(FDTD	30
II-5-1 Principe.....	30
II-5-2 les équations de Maxwell dans l'espace cartésien	31
II-5-3 Réduction à deux dimensions.....	32
a. Polarisation TM.....	33
b. Polarisation TE.....	34
II-5-4 Algorithme de Yee.....	35
II-5-4-1 Les équations de Maxwell aux différences centrées.....	37
a. Cas bidimensionnel de FDTD.....	37
b. Cas tridimensionnel de FDTD.....	39

Sommaire

II-5-5 Conditions de la Couche parfaitement adaptée (PML).....	41
CONCLUSION	42
REFERENCE	43
CHAP III- SIMULATION ET INTERPRETATION.....	46
1- Simulation.....	47
a. Méthode de simulation.....	47
b. Caractéristiques des matériaux simulés.....	47
2- Description du logiciel.....	48
<i>I-Etude du choix du matériau.....</i>	49
II-Etude de la propagation d'une onde EM dans une fibre à cristaux Photoniques.....	52
a. Pour différentes valeurs du rayon.....	52
b. Pour différentes valeurs du Pitch.....	55
III- Etude de la propagation d'une onde EM dans une fibre à cristaux photoniques pour un agrandissement du cœur.....	58
REFERENCE.....	64
CONCLUSION GENERALE.....	66

Listes des figures

Figure I-1 : *Dessin schématique des cristaux photoniques 1D, 2D, 3D.*

Figure I-2 *Figure d'un cristal photonique une dimension.*

Figure I-3 : *Un cristal photonique deux dimension 2D.*

Figure I-4 : *représente un cristal de E.Yablonovite 3D .*

Figure I-5 : *Réseau direct.*

Figure I-6 : *Exemple d'un Cristal photonique bidimensionnel dans du silicium macroporeux avec un défaut unidimensionnel.*

Figure I-7 : *Cristaux photoniques à deux dimensions à symétries (1) carrée, (2) rectangulaire et (3) triangulaire avec leurs zones de Brillouin irréductibles correspondantes (en trait vert).*

Figure I -8 : *Le Diagrammes de bandes d'un cristal photonique à une dimension.*

Figure I-9 : *Représentation des polarisations TE et TM dans un BIP 2D*

Figure I-10: *Diagrammes de bandes du réseau carré de tiges diélectrique ($\epsilon=9$) dans l'air ($n=1$) le rayon de tiges est $r=0,2a$.*

Figure I-11 : *Défauts ponctuels : (a) Défaut lacunaire, (b) et (c) Défauts de substitutions.*

Figure I-12 : *Défauts linéaires :a) Guide d'onde, b) Guide d'onde à courbure.*

Figure I-13 : *Schéma d'une fibre optique à saut d'indice.*

Figure I-14 : *Fibre optique classique.*

Figure I-15 : *Coupe transversale d'une PCF avec ses paramètres.*

Figure I-16: *Classification des fibres à cristaux photoniques suivant le principe de guidage.*

Figure II-1 : *Figure à trois dimensions schémas de Yee.*

Figure II-2: *Maille bidimensionnelle FDTD pour le cas de polarisation magnétique transversale montrant l'échelonnement des champs H_y , E_x et E_z .*

Listes Des Figure

Figure II-3: Espace de l'algorithme de Yee pour un exemple de propagation d'onde. Unidimensionnelle, les conditions initiales pour les champs électriques et magnétiques sont nulles partout dans la grille.

Figure II-4 : Une maille représente une discrétisation spéciale de FDTD.

Figure II-5: Une maille représente une discrétisation spéciale de FDTD

Figure III-1 : Dessine organigramme de simulation de FDTD de développement OPTIFDTD

Figure III-2 : Profil de distribution de l'indice de réfraction du silicium $n=1.45$

Figure III-3 : La variation de l'amplitude de E_y dans le plan horizontal a) de la silice b) et du germanium.

Figure III-4 : La variation de l'amplitude de H_x dans le plan horizontal de c) la silice et d) du germanium.

Figure III-5 : La variation de l'amplitude de H_z dans le plan horizontal. e) de la silice et f) du germanium.

Figure III- 6: Représente la distribution de champ électrique E_y pour des différents valeurs des rayons. g) pour un rayon égal à $1 \mu\text{m}$, h) pour un rayon égal à $0.8 \mu\text{m}$, i) pour un rayon égal à $0.2 \mu\text{m}$.

Figure III-7 : Représente la distribution de champ magnétique H_x pour des différents valeurs des rayons. k) pour un rayon égal à $1 \mu\text{m}$, l) pour un rayon égal à $0.8 \mu\text{m}$, m) pour un rayon égal à $0.2 \mu\text{m}$.

Figure III-8 : Représente la distribution de champ magnétique H_z pour des différents valeurs des rayons. n) pour un rayon égal à $1 \mu\text{m}$, o) pour un rayon égal à $0.8 \mu\text{m}$, p) pour un rayon égal à $0.2 \mu\text{m}$.

Figure III-9 : Représente la distribution du champ électrique E_y pour une valeur $r=0.2 \mu\text{m}$ et variation du pitch avec Q) pour $a=1.5 \mu\text{m}$, R) pour $a=1.8 \mu\text{m}$, S) pour $a=2.3 \mu\text{m}$.

Figure III-10: Représente le Profil de distribution de l'indice de réfraction du silicium. I) Représente 7 cellules, II) Représente 18 cellules, III) Représente 37 cellules

Figure III-11 : Représente la distribution du champ électrique E_y par agrandissement du cœur. 1) pour un cœur égal à 7, 2) pour un cœur égal à 19, 3) pour un cœur égal à 37.

Listes Des Figure

FigureIII-12 : Représente la distribution du champ magnétique H_x par agrandissement du cœur .4) pour un cœur égal à 7, 5) pour un cœur égal à 19 ,6) pour un cœur égal à 37.

FigureIII-13: Représente la distribution du champ magnétique H_z par agrandissement du cœur. 7) pour un cœur égal à 7, 8) pour un cœur égal à 19 ,9) pour un cœur égal à 37.

Listes Des Abréviations

CP : Cristaux Photoniques.

BIP : Bande Interdite Photonique.

EM : ElectroMagnetique.

1D : Unidimensionnel.

2D : Bidimensionnel.

3D : Tridimensionnel.

μ_0 : Perméabilité dans le vide.

$\mu(\vec{r})$: Perméabilité relative.

$\epsilon(\vec{r})$: Permittivité diélectrique.

n : L'indice de réfraction.

c : Célérité dans le vide.

V(r) : Le potentiel électrique.

h : La constante de Planck.

m : La masse de l'électron.

E : L'énergie de l'électron.

ψ : Fonction d'onde d'un électron dans un potentiel.

H : Hamiltonien.

BZ : Zone de Brillouin.

IBZ : Zone de Brillouin Irréductible.

TE : Transversal Electrique.

Listes Des Abréviations

TM : Transversal Magnétique.

FDTD : Finite Difference Time Domain Method (Méthode de Différence Finie dans le Domaine Temporelle).

FEM : Méthode des Eléments Finie.

TMM : Méthode des Matrices de Transfert.

FCP : Photonic Crystal Fiber.

PML: Perfectly matched layer.

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

1-Notion historique

Le concept des cristaux photoniques a été proposée pour la première fois en 1987 [1-2]. Le premier cristal photonique a été réalisé en 1991 par Yablonovitch. 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'ils existent pour les électrons des bandes d'énergie permises et des bandes interdites, ils existent des bandes photoniques d'états permises et des bandes photoniques interdites. Une bande photonique (BIP) correspond à un intervalle d'énergie où la propagation de la lumière est interdite dans certaines directions de ce cristal. Les cristaux photoniques offrent la possibilité de la propagation de la lumière et ceci, sur des dimensions 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 [3-4]. L'adaptation des cristaux photoniques à l'optoélectronique permet d'envisager de nouvelles perspectives telles que la réalisation de composants d'optique intégrée aux dimensions réduites et l'intégration de nombreuses fonctions sur un même substrat.

En 1922, *Bragg* a développé le miroir de Bragg. Ce miroir est une succession de surfaces planes transparentes d'indices de réfraction différents. Il permet de réfléchir la lumière, grâce aux phénomènes d'interférences constructives. Comme le montre dans la figure1. [5]

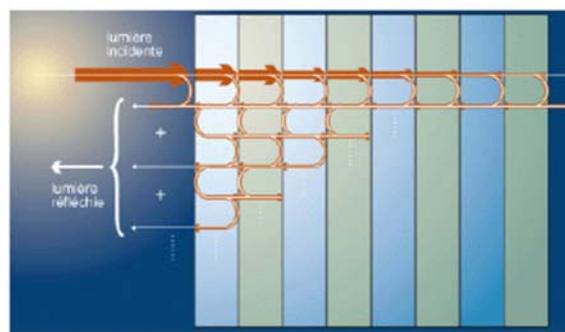


Figure1:

Represent un miroir de Bragg [6]

INTRODUCTION GENERALE

En 1991 *E.Yablonovitch* avait démontré le premier trou de bande photonique tridimensionnel dans le régime des micro-ondes.

En 1996, *Thomas Krauss* a fait la première démonstration d'un cristal photonique bidimensionnel aux longueurs d'onde optiques [7].

un regain d'intérêt dans ce domaine est apparu avec la démonstration de nouvelles structures de fibres de nouvelle génération communément dénommées ‘‘Fibres à Cristaux Photoniques, Photonic Crystal Fibers (PCF)’’. Ces fibres sont constituées d'un cœur de silice pure, entouré d'un arrangement régulier ou non de canaux d'air de dimensions micrométriques disposés parallèlement à l'axe de propagation. En effet, l'ajustement des paramètres géométriques des PCF a ouvert un vaste champ dans l'optimisation et la maîtrise des propriétés de la fibre notamment celles de dispersion décalée dans des plages qui ne peuvent être atteintes par les fibres standard ou de fortes non linéarités obtenues dans des PCF de dimensions très réduites[8].

En 1995, *Birks T. A.* et al. [9] ont démontré d'un point de vue théorique que des structures périodiques diélectriques à deux dimensions pouvaient présenter des bandes interdites photoniques dépendant de la périodicité du cristal.(chapitre1) .

En 1996, *Knight J. C.* et al. [10] ont fabriqué la première fibre dans le but d'obtenir un guidage par effet BIP (bande Interdite Photonique).

En 2009, *A. Labbani* et al. [11] ont présenté les modifications des bandes interdites des cristaux photoniques à base de nanoparticules de semi-conducteur.

2-Problématique :

Le travail de ce mémoire est basé sur la modélisation et la simulation de la propagation d'ondes électromagnétiques dans un cristal photonique bidimensionnel à structure hexagonale. Nous allons étudier le modèle des équations de Maxwell et réduire sa résolution en à deux équations, appelées équations de propagation, qui sont dérivée de l'équation de Maxwell Ampère et Maxwell Faraday, données comme suit :

INTRODUCTION GENERALE

$$\nabla \cdot \nabla \cdot \vec{E}(\vec{r}) - \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon(\vec{r}) \vec{E}(\vec{r}) = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \nabla \cdot \vec{H}(\vec{r}) - \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon(\vec{r}) \vec{H}(\vec{r}) = 0 \quad (2)$$

Or il n'est pas possible de résoudre ces équations analytiquement, il devient donc nécessaire de faire appel à des méthodes numériques[8]. Dans ces méthodes, nous utiliserons FDTD pour obtenir les solutions temporelles et spatiales des équations différentielles de Maxwell, qui reproduisent numériquement la propagation des ondes électromagnétiques dans les cristaux photoniques.. Et la méthode des ondes planes qui est bien adapté pour étudier les diagrammes de bandes[12].

Ce mémoire s'organise en trois chapitres :

Dans le premier chapitre : nous présentons les bases des cristaux photoniques. Nous verrons Premièrement, l'analogie entre les électrons et les photons. Nous présenterons les caractéristiques principales des cristaux photoniques et ces différents types de (1D,2D,3D) puis les diagrammes de bandes à une dimension . Ensuite un rappel sur les fibres optiques à base de cristaux photoniques est présenté [8].

Le deuxième chapitre : dans le cas des cristaux, nous rappelons les différentes méthodes numériques qui permettent la simulation des propriétés de ces cristaux et nous verrons la méthode FDTD qui est une approche numérique de résolution des équations différentielles dans le domaine temporel. En outre, nous présentons le principe d'algorithme de Yee (1966).

Dans le troisième chapitre : nous présentons les simulations et l'interprétation des résultats de la propagation d'une onde en mode TE (transverse électrique) dans une fibre à base d'un cristal photonique en deux dimensions de la structure hexagonale [12]. On s'intéresse à l'étude des cas suivants :

- I. Une comparaison entre deux matériaux diélectriques, dont l'objectif est d'étudier l'influence du choix du matériaux sur la propagation de l'onde électromagnétique dans la fibre à cristaux photoniques.

INTRODUCTION GENERALE

- II. Etude de la propagation d'une onde EM dans une fibre à cristaux photoniques pour des différent valeurs du diamètre pour la polarisation (TE).
- III. Etude de la propagation d'une onde EM dans une fibre à cristaux photoniques par la création d'une cavité par création de défauts par élimination des cellules :7 cells,19 cells,37 cells [12].

INTRODUCTION GENERALE

Référence

- [1] **Zengerle, R.**, « Light Propagation in Singly and Doubly Periodic Planar Waveguides». *Journal of Modern Optics*, 1987. 34(12): p. 1589-1617.
- [2] **John, S.**, Strong localization of photons in certain disordered dielectric super lattices. *Physical Review Letters*, 1987. 58(23): p. 2486-2489.
- [3] **Yablonovitch, E.**, Photonic band-gap crystals. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 1993. 5(16): p. 2443-2460.
- [4] **H. Badaoui, M. Feham, and M. Abri**, "Double bends and y-shaped splitter design for integrated optics," *Progress In Electromagnetics Research Letters*, Vol. 28, 129-138, 2012.
- [5] **MASSÉ Pascal**. Cristaux photoniques colloïdaux d'architecture contrôlée. Thèse de doctorat. Université Sciences et Technologies-Bordeaux I, (2007).
- [6] **JOANNOPOULOS John D., JOHNSON Steven G., WINN Joshua N., et al.** Photonic crystals: molding the flow of light. Princeton university press, second édition, (2008)
- [8] **Benaissa Fatima** .Etude et Simulation de la Propagation des Ondes Electromagnétiques dans les guides à Cristaux Photoniques-Application aux Fibres Optiques. Magister en physique 2013
- [9] **T. A. Birks, P. J. Roberts, P. St. J. Russell, D. M. Atkin, and T. J. Shepherd**, "Full 2-D photonic bandgaps in silica/air structures," *Electron. Lett.*, vol. 31, pp. 1941-1943, 1995]
- [10] **Knight J. C., Birks T. A., Cregan R. F., Russell P. S. J. et de Sandro J.-P.** Large mode area photonic crystal fiber. *Electronics Letters*, vol. 34, pp. 1347–1348, June 1998],
- [11] **A. Labbani**, «Matériaux bip a base de nanoparticules métalliques et semi-conductrices étude des propriétés optiques par FDTD» Thèse de doctorat, *Laboratoire Hyperfréquences et Semi-conducteurs, Université de Constantine, Algérie(2009).
- [12] **Melle BENMANSOUR Amel**.Modélisation et simulation de la propagation d'une onde Électromagnétique (EM) dans les cristaux photoniques

RÉFÉRENCES WEB

- [7] http://www.phys.ubbcluj.ro/~emil.vinteler/nanofotonica/TTM/Modul1_TTM, (2021)

CHAPITRE I
GENERALITES SUR
LES CRISTAUX PHOTONIQUES

Chapitre I

GENERALITE SUR LES CRISTAUX PHOTONIQUES

les cristaux photoniques (CP) ont fait le concept d'études extrêmes car ils offrent la possibilité de constater la propagation de la lumière [1], les cristaux photoniques sont des matériaux diélectriques de l'ordre de la longueur d'onde λ de la lumière, ces matériaux peuvent moduler strictement la lumière et avec une géométrie adaptée et un contraste diélectrique, peuvent présenter une bande photonique interdite (*BIP*). Les CPs sont naturellement classés par la dimensionnalité de leur périodicité et pour prévenir uniquement la propagation des fréquences *BIP* dans toutes les directions[2]. Dans ce chapitre, nous exposerons l'évidence des cristaux photoniques. Ces aperçus fournissent une étude pas à pas des différents types de structures permettant d'obtenir la bande interdite photonique. Nous introduirons également le concept de bande interdite photonique et l'analogie entre les photons et les électrons. Distinguer les analogies entre l'équation de Maxwell et l'équation de Schrödinger, et introduire des diagrammes de bandes unidimensionnels et bidimensionnels.

I-Définition des cristaux photoniques :

Les cristaux photoniques sont des matériaux structurés à périodicité diélectrique constante, qui peuvent créer une série de fréquences nommées bandes photonique interdites [3].

Le concept de cristaux photoniques a été proposé pour Il est apparu pour la première fois en 1987 Le premier cristal photonique a été fabriqué en 1991. Cristaux photoniques C'est une structure dans laquelle l'indice de réfraction change périodiquement en une, deux ou trois dimensions. Ce milieu périodique produit un effet similaire au potentiel électrique périodique des électrons du cristal sur la lumière se propageant dans le cristal photonique. Tout comme les électrons ont des bandes d'énergie autorisées et des bandes interdites, il existe également des bandes d'énergie électronique. L'État a autorisé la photonique et les bandes photoniques interdites. La bande de photons (BIP) correspond à un intervalle d'énergie dans lequel la propagation de la lumière dans certaines directions du cristal est interdite. Les cristaux photoniques offrent la possibilité de contrôler la propagation de la lumière de l'ordre de la longueur d'onde dans le matériau [4].

II -Concept des bandes interdites photoniques

Les cristaux à bande interdite photonique (BIP) une structure qui peut modifier la propagation des ondes électromagnétiques. Il existe 3 formes qui sont caractérisées par le nombre de directions périodiques de l'indice optique :

Cristal photonique une dimension ou miroir de Bragg, trois dimensions, trois dimensions.

La figure (I-1) montre que les différentes couleurs de cristaux photoniques 1D, 2D et 3D correspondent à une différence d'indice de réfraction [5].

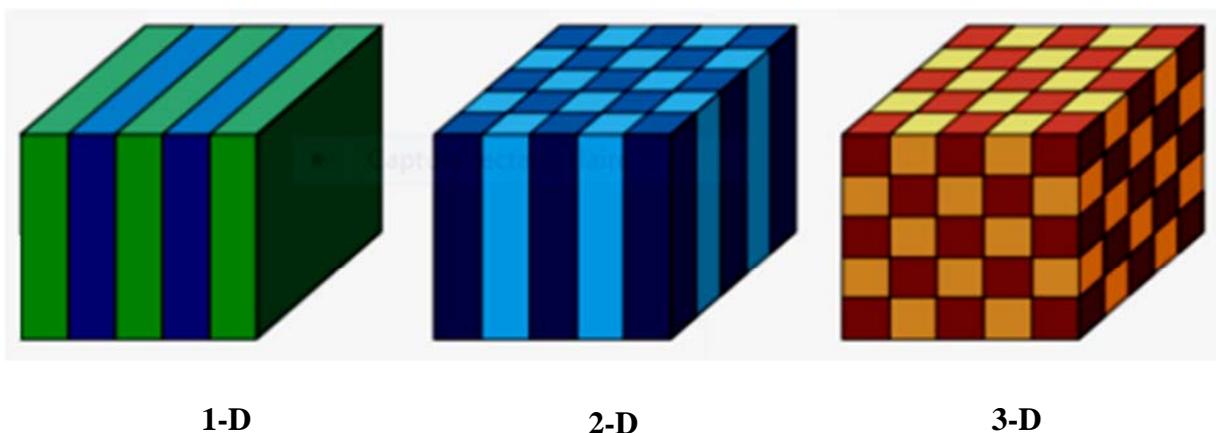


Figure I-1 :

Dessin schématique des cristaux photoniques 1D, 2D, 3D

La fabrication de cristaux photoniques 1D et 2D est de nos jours bien maîtrisée et des composants à base de ces structures commencent à voir le jour. Par contre la fabrication de cristaux photoniques à 3D continue de poser plusieurs difficultés expérimentales. Dans ce sens, l'une des solutions envisagées consiste à combiner des cristaux photoniques 2D avec des guides d'onde "classiques" afin d'assurer le confinement dans la troisième dimension.

[6] .

III- l'analogie Photon-Electron

Nous allons présenter l'analogie qui existe entre la détermination de l'équation de Schrödinger pour une particule dans un puits de potentiel périodique et le calcul des modes de propagation électromagnétique dans un matériau périodique [7].

a. Étude électromagnétique :

Les équations de Maxwell, aussi nommées équations de Maxwell-Lorentz, sont des lois fondamentales pour la physique. Elles composent les principes de base de l'électromagnétisme, avec la formule de la force électromagnétique de Lorentz [8]., les quatre équations de maxwell sont :

$$\begin{cases} \operatorname{div} \vec{H} = 0 & \text{Gauss magnétique} \\ \operatorname{div} \vec{D} = \rho & \text{Maxwell Gauss électrique} \\ \overrightarrow{\operatorname{rot}} \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 & \text{Maxwell Faraday} \\ \overrightarrow{\operatorname{rot}} \vec{H} - J - \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = 0 & \text{Maxwell Ampère} \end{cases} \quad (\text{I-1})$$

Les symboles utilisés ainsi que leurs unités dans le système international sont :

H : vecteur excitation magnétique (ampères/mètre),

D : vecteur déplacement électrique (coulombs/ *mètre*²),

ρ : densité de charges électriques (coulombs/mètre (1D), coulombs/*mètre*²(2D)

J : vecteur densité de courant (ampères/*mètre*²) [9], on définit \vec{D} et \vec{B} comme suite :

$$\begin{cases} D(\vec{r}) = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon(\vec{r}) \cdot E(\vec{r}) \\ B(\vec{r}) = \mu_0 \cdot \mu(\vec{r}) \cdot H(\vec{r}) \end{cases} \quad (\text{I-2})$$

Avec : $n = \sqrt{\varepsilon \cdot \mu}$ et $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$

On remplace (I-2) dans (I-1) et on sait que le milieu est vide c'est-à-dire pas de charge et pas de courants, les équations de Maxwell devient :

$$\begin{cases} \operatorname{div} \vec{H} = 0 & \overrightarrow{\operatorname{rot}} \vec{E} + \mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = 0 \\ \operatorname{div} \vec{E} = 0 & \overrightarrow{\operatorname{rot}} \vec{H} - \varepsilon_0 \varepsilon_r(\vec{r}) \frac{\partial E(\vec{r}, t)}{\partial t} = 0 \end{cases} \quad (\text{I-3})$$

l' équations de propagation du champ électrique et induction magnétique qui sont :

$$\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{E}(\vec{r})) = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \varepsilon(\vec{r}) \vec{E}(\vec{r}) \quad (\text{I-4})$$

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

Avec

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \times \mu_0}} \text{ est la célérité de la lumière dans le vide} \quad (\text{I-6})$$

b- Etude électronique

Considérons un système quelconque : d'après la théorie quantique, les états propres de ce système peuvent être décrits par les états des différents électrons du système. En régime stationnaire ces états sont donnés par les solutions de l'équation aux valeurs propres de Schrödinger [9] .

$$H\Psi = E\Psi \quad (\text{I-7})$$

avec:

$$H = \frac{\hbar^2 \nabla^2}{2m} + V(r) \quad (\text{I-8})$$

$$E = \frac{p^2}{2m} + V(r) \quad (\text{I-9})$$

En remplace équations (I-7) et (I-8) dans (I-9) on obtient l'équation suivante :

$$\Delta\Psi(r) + \frac{2m(E-V(r))}{\hbar^2} \Psi(r) = 0 \quad (\text{I-10})$$

Avec :

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} \quad (\text{I-11})$$

IV -Les caractéristiques des cristaux photoniques [10]

Les caractéristiques des cristaux photonique sont :

- *La dimensionnalité* (la périodicité de l'indice de réfraction détermine la dimensionnalité).
- *La symétrie* (elle est déterminée par la position des éléments d'un cristal photonique).
- *Paramètre du réseau* (il se produit en raison de la distance de base associée entre deux éléments constitutifs).

V -Classe des cristaux photoniques :

Les cristaux photoniques se composent de trois types différents et sont :

V-1 Cristal photonique à une dimension 1D :

La structure la plus simple de cristaux photoniques est une structure périodique unidimensionnelle composée de plusieurs couches (ϵ_1, ϵ_2) également appelées « miroirs de Bragg ». La raison pour laquelle il est comparé à un cristal photonique unidimensionnel est que les caractéristiques uniques des cristaux photoniques n'existent que dans une seule dimension [11], le terme une dimension est utilisé car la fonction diélectrique $\epsilon(z)$ ne change que selon une direction (z) et les deux autres directions sont uniformes [12].

Comme la montre dans la figure (I-2) :



Figure I-2 :

Figure d'un cristal photonique à une dimension.[13]

V-2 Cristal photonique à deux dimensions 2D :

Le cristal photonique bidimensionnel est principalement une plaque plane, c'est-à-dire que son épaisseur est la même que la période cristallographique du cristal photonique. La périodicité de ces plaques est couramment conçue par « gravure » de la structure des trous dans une plaque

de matériau à indice de réfraction grand. L'équation de Maxwell découvrit que meilleur l'indice de réfraction est élevé, plus la bande interdite est grande [11]

Avec :

(r) c'est un rayon et (a) la constant de réseau

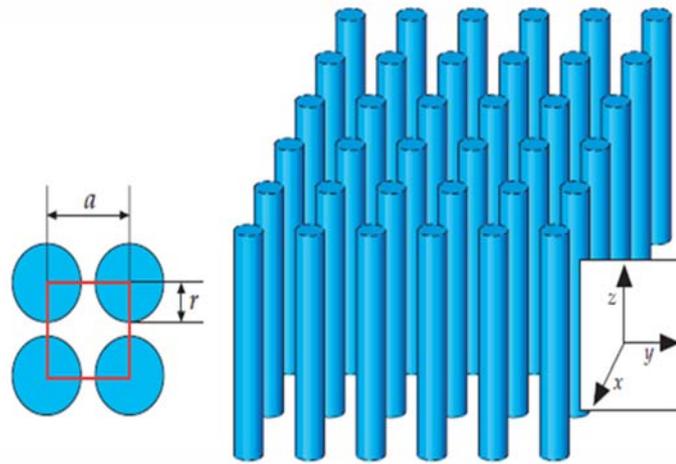


Figure I-3 :

Un cristal photonique à deux dimension 2D[12].

V-3 Cristaux photoniques à trois dimensions 3D

Il existe un grand nombre de structures possibles. Le premier cristal photonique a trois dimensions a été réalisé par S. Y. Lin et al. Il était formé de sphères de silicium arrangées selon une composition diamant. En 1993, E. Yablonovitch fabriquait un cristal photonique 3D en perçant chaque trou dans un bloc de plexiglas selon trois angles séparés de 120° (figure I.4) [13]. Ce cristal photonique s'appelle d'après son inventeur "la Yablonovite", avec ce cristal photonique [13].

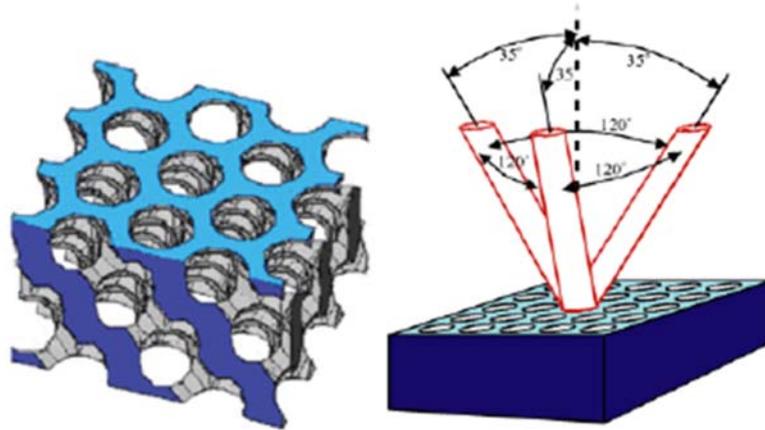


Figure I-4 :

représente un cristal de E.Yablonovite .

VII-Diagramme des bandes :

Le diagramme de bande intègre le diagramme de dispersion $\omega(k)$ du cristal photonique, il peut être calculé par la méthode des ondes planes. A priori, si l'on voulait être exhaustif, il faudrait considérer pour chaque cristal toutes les directions de propagation possibles. Également en physique du solide. Les résultats montrent que pour une certaine symétrie cristalline, on peut limiter l'étude au vecteur k dans une zone restreinte appelée zone de Brillouin irréductible [14]. Le vecteur k varie le long des directions des symétries élevées de cette zone qui fait partie du réseau réciproque [15].

VII-1 Le réseau direct :

Un réseau de Bravais est un ensemble infini de points discrets avec un arrangement et une orientation qui apparaît exactement la même lorsqu'il est vu d'un point quelconque. Les points sont appelés « nœuds » ou « sites » [16].

VII-2 Le réseau réciproque :

Le réseau réciproque est déterminé immédiatement à partir du vecteur de base du réseau direct, c'est l'explication la plus courante des vecteurs de base du réseau réciproque [17].

$$\begin{cases} \mathbf{A}^* = \frac{\mathbf{b} \wedge \mathbf{c}}{V} \\ \mathbf{B}^* = \frac{\mathbf{c} \wedge \mathbf{a}}{V} \\ \mathbf{C}^* = \frac{\mathbf{a} \wedge \mathbf{b}}{V} \end{cases} \quad (\text{I-12})$$

Etant V le volume de la maille, avec le produit scalaire suivant :

$$A^* \cdot a = B^* \cdot b = C^* \cdot c = 1 \quad (\text{I-13})$$

Par définition a, b, c sont des vecteurs primitifs du réseau direct et A^*, B^*, C^* sont des vecteurs primitifs du réseau réciproque. Le réseau mutuel également défini par :

$$a_i \cdot A^*_j = 2\pi\delta_{ij} \quad (\text{I-14})$$

δ_{ij} est le symbole de Kronecker.

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{si } i \neq j \\ 1 & \text{si } i = j \end{cases} \quad (\text{I-15})$$

la figure(I-5) représente une structure périodique a deux dimension qui est basée sur neuf mailles élémentaires ,ces mailles provoquent un réseaux direct [18].

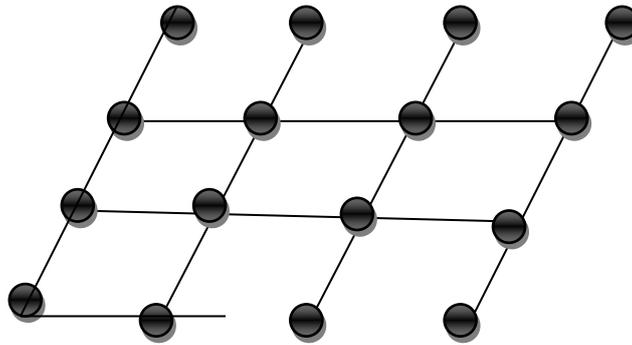


Figure I-5 :

Réseau direct.

VII-3 La zone de Brillouin irréductible :

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 (Figure I.6) [19], voire à BIP 3D. Notre choix s'oriente vers des matériaux à BIP bidimensionnelles qui ne sont pas aussi performantes que leurs analogues tridimensionnels. [19]:

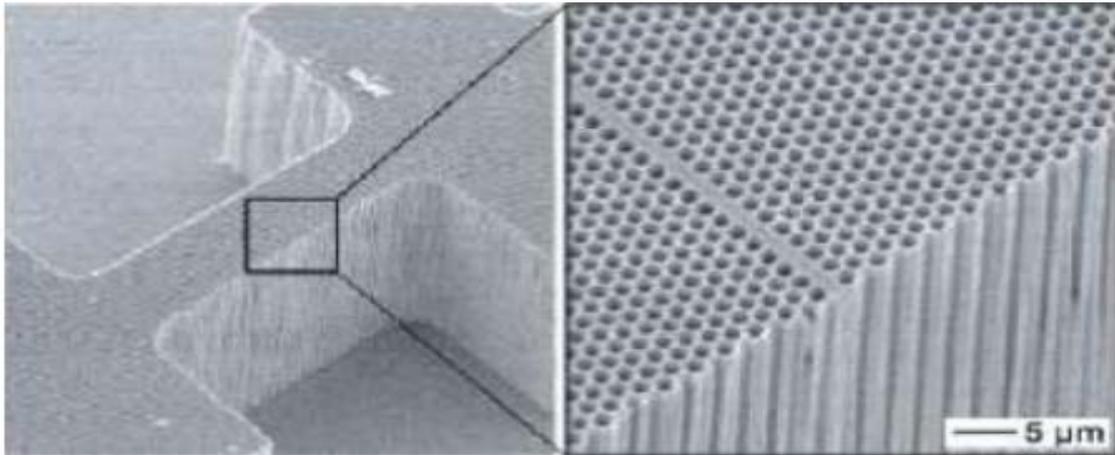


Figure I-6 :

Exemple d'un Cristal photonique bidimensionnel dans du silicium macroporeux avec un défaut unidimensionnel.

On détermine aussi La zone de Brillouin (BZ) c'est la symétrie complète du réseau dans un milieu réciproque.

On appelle aussi La zone de Brillouin irréductible (IBZ) est la plus courte région au sein de la BZ pour les caractéristiques de dispersion du réseau ne sont pas liées par symétrie [20].

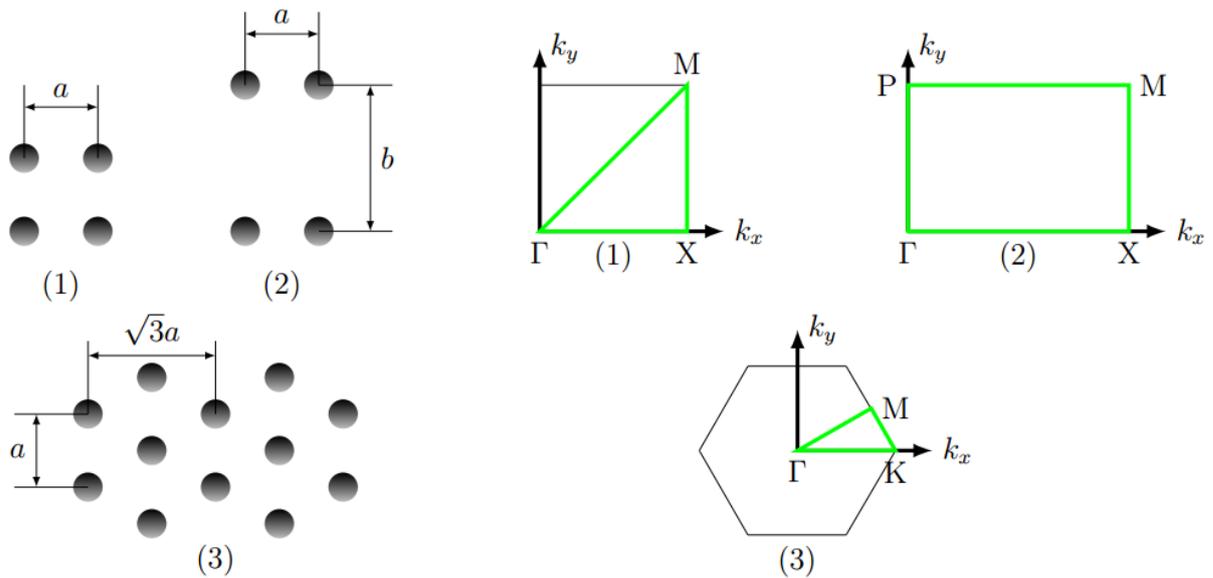


Figure I-7:

Cristaux photoniques à deux dimension à symétries (1) carrée, (2) rectangulaire et (3) triangulaire avec leurs zones de Brillouin irréductibles correspondantes (en trait vert) [21].

VII-4 Diagrammes de bandes des cristaux photoniques 1D

Une bande de réflectivité d'un miroir de Bragg est une bande interdite photonique. Pour illustrer cette affirmation, considérons un milieu diélectrique homogène, isotrope, infini, avec une périodicité fictive a selon une direction [22]

La figure (I-8) représente les diagrammes de bandes d'un cristal 1D obtenu par une modulation sinusoïdale de la permittivité diélectrique.

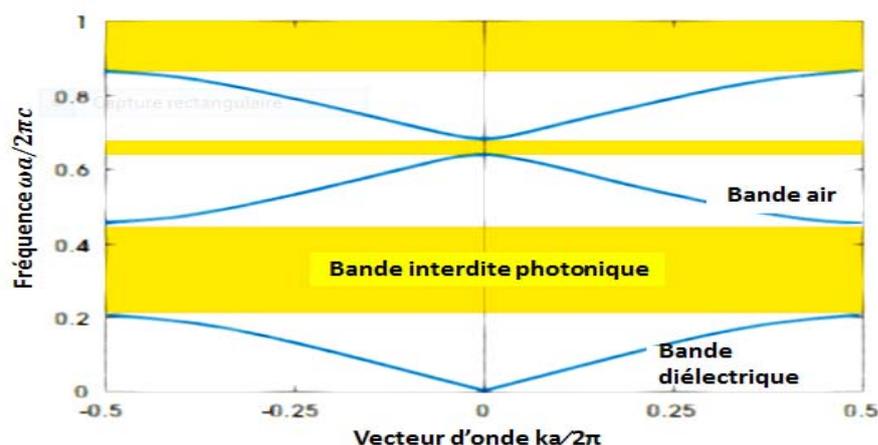


Figure I-8 :

Le Diagrammes de bandes d'un cristal photonique à une dimension[12].

VII-5 Diagrammes de bandes des cristaux photoniques bidimensionnels

Pour étudier le comportement d'une onde électromagnétique incidente sur une telle structure deux polarisations sont possibles :

La polarisation électrique TE correspond au cas où le champ électrique H est parallèle aux cylindres infinis. Alors que celle magnétique TM correspond au cas où E leur est perpendiculaire (figure I.9).

Dans les cristaux 2D, les ondes électromagnétiques se propagent dans le plan perpendiculaire aux tiges et peuvent être séparées en deux polarisations TE ou TM. Les bandes interdites qui apparaissent dans chaque cas doivent se superposer pour former une bande interdite totale[23].

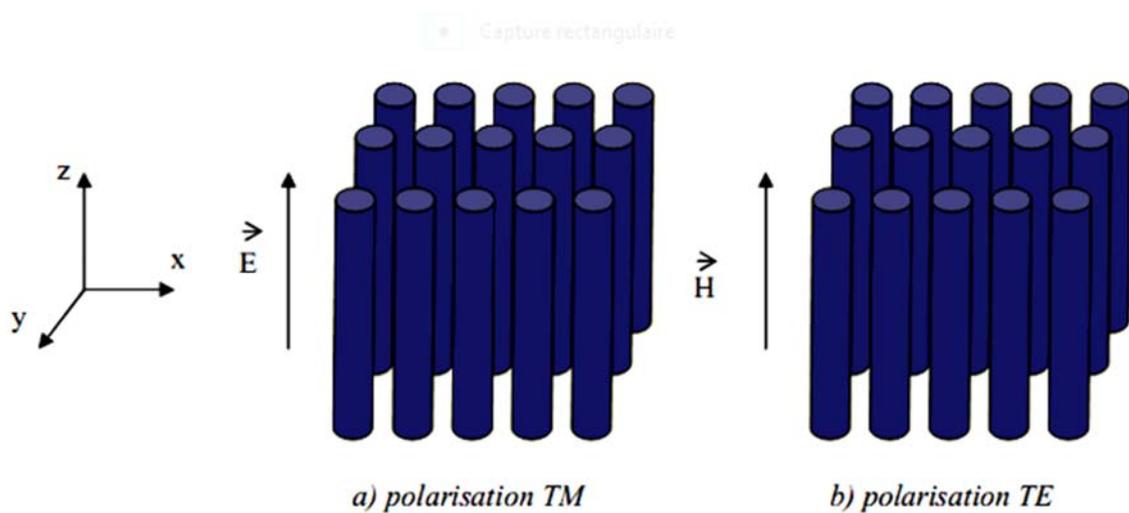


Figure I-9:

Représentation des polarisations TE et TM dans un BIP 2D.[24]

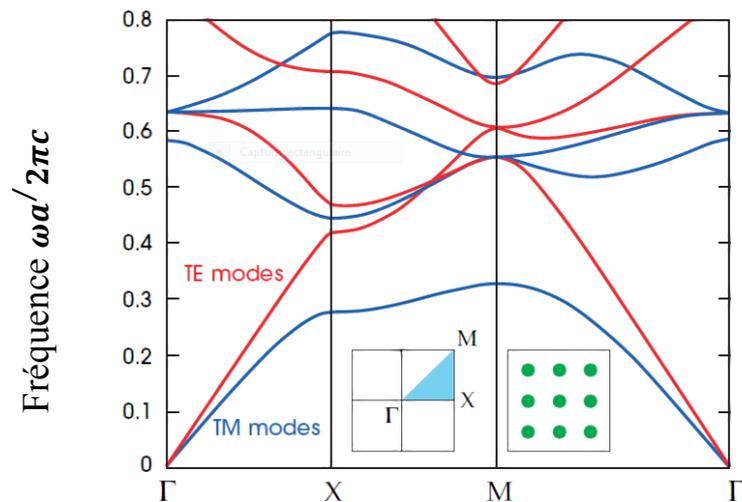


Figure I-10:

*Diagrammes de bandes du réseau carré de tiges diélectrique ($\epsilon=9$) dans l'air ($n=1$)
le rayon de tiges est $r=0,2a$ [25].*

VIII-Indice de phase et indice de groupe

Les indices de réfraction de phase et de groupe se déduisent respectivement des vitesses de phase et de groupe par des relations suivantes [14] :

$$n_{\phi} = \frac{c}{v_{\phi}} \quad (\text{I-16})$$

$$n_g = \frac{c}{v_g} \approx n_{\phi} = -\lambda \frac{\partial n_{\phi}}{\partial \lambda} \quad (\text{I-17})$$

Avec c est la vitesse de célérité

IX-Matériaux BIP à défaut :

Les défauts dans les cristaux photoniques sont créés par la rupture de la périodicité diélectrique ϵ

a. Les Défauts ponctuels

Ces défauts se comportent comme des micro-résonateurs. Les défauts ponctuels sont obtenus 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 microcavité à l'intérieur du cristal photonique. Pour les cristaux photoniques constitués de

trous dans un matériau diélectrique, ces trous peuvent être modifiés géométriquement [26].

Par suite, on distingue deux types de défauts, lacunaires et de substitution (figure I.15)

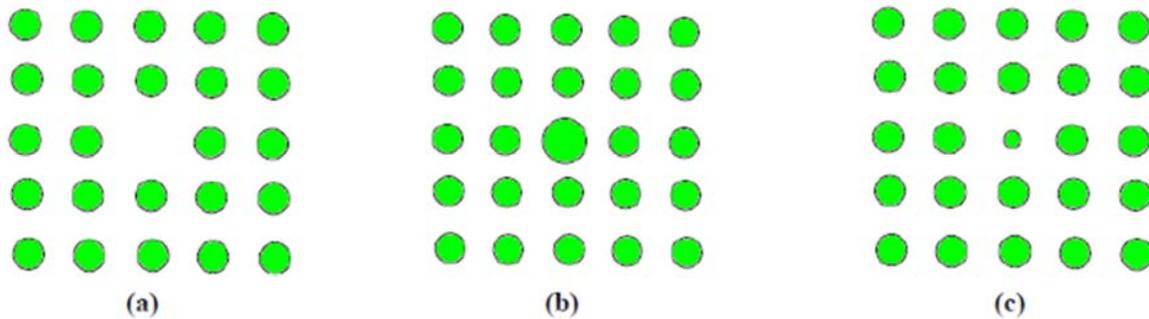


Figure I-11 :

Défauts ponctuels : (a) Défaut lacunaire, (b) et (c) Défauts de substitutions [27].

b. Défauts linéaires et guide d'ondes

Ces défauts permettent de réaliser un guidage diffractif des ondes appelés aussi défauts étendus, de dimension 1, 2 ou 3, ne peuvent évidemment être obtenus que dans les cristaux de dimension au moins équivalente. Parmi ces défauts, les défauts 1D (W1) (Figure I.16), 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. On peut d'ailleurs imaginer des défauts 2D (W2) ou 3D (W3) constitués d'une suite de guides W1, mis bout à bout et orientés dans les directions différentes, de façon à véhiculer la lumière sur tous les chemins possibles à l'intérieur du cristal. L'exemple de base est celui du guide d'onde linéaire W1 dans un cristal photonique 2D. Une façon de réaliser un tel guide consiste à placer des défauts ponctuels, couplés et régulièrement espacés, dans une direction du cristal 2D. Le couplage entre une infinité de résonateurs conduit à une bande de propagation permise dans la direction de l'alignement. Ce type de guide à résonateurs couplés a été proposé en 1999 [28].

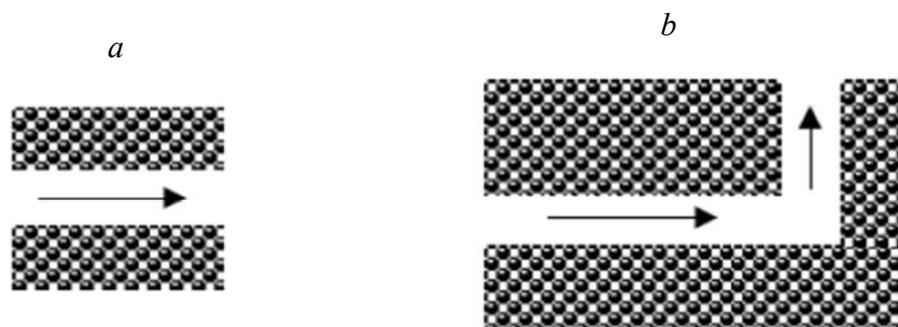


Figure I-12 :

les défauts linéaires : a) Guide d'onde, b) Guide d'onde courbure

IIX-1 Fibres optiques :

La fibre optique est une symétrie circulaire d'un guide d'ondes diélectrique. Une fibre classique est constituée d'un cœur d'indice entouré d'une gaine optique d'indice (figure 1). L'indice est inférieur à l'indice garantissant la condition de réflexion totale sur la gaine d'un rayon se propageant dans le cœur [29].

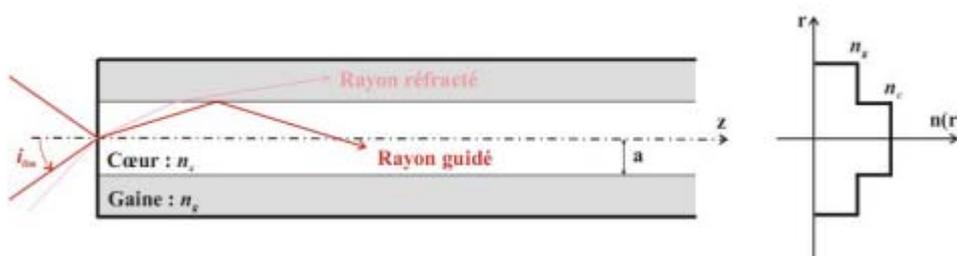


Figure I-13 :

Schéma d'une fibre optique à saut d'indice

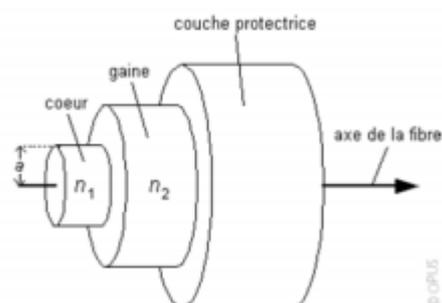


Figure I-14 :

Fibre optique classique

Inversement aux fibres classiques dans lesquelles la lumière est piégée dans le cœur par réfraction interne totale, les fibres PCF piègent la lumière dans le cœur suivant : la lumière incidente à l'interface cœur-gaine est fortement diffusée par les trous d'air. Pour certaines longueurs d'onde et certains angles d'incidence, ce phénomène de diffusion multiple peut engendrer des interférences constructives de tous les rayons revenant vers le cœur. Cet effet, basé sur le principe physique de bande interdite photonique, permet de fabriquer des fibres composées d'un noyau d'air et d'un matériau quelconque pour la gaine, ce qui est impossible conventionnellement puisqu'il n'existe aucun matériau ayant un indice de réfraction inférieur à celui du vide. Les caractéristiques de la bande interdite photonique ne permettent qu'à certaines longueurs d'onde d'être transmises. Si on introduisait de la lumière blanche dans une telle fibre, seule une partie des longueurs d'onde serait transmise. Aussi on observerait en sortie une lumière colorée correspondant aux seules longueurs d'onde transmises se trouvant dans des bandes permises [30].

IIX-2 Nouvelles fibres optiques : les fibres à cristaux photoniques :

La fibre à cristal photonique, (Photonic-crystal fiber PCF) est un type de fibre optique, basée sur les propriétés des cristaux photoniques. Possèdent un cœur creux qui lui permet de confiner la lumière plus efficacement qu'avec une fibre classique. Les PCF trouvent leurs applications dans les communications par fibre optique, les dispositifs non linéaires, la transmission à haute puissance, ou les détecteurs à haute sensibilité [31].

IIX-3 Concept des fibres à cristaux photoniques :

Les fibres à cristaux photoniques connues aussi sous le nom de fibres microstructures ou fibres à cavités sont composées d'un arrangement régulier ou non de canaux d'air de dimensions microniques disposés simultanément à l'axe de propagation. Les paramètres qui caractérisent cet arrangement et ajustent les propriétés optiques des fibres, sont la distance entre les centres de deux trous adjacents noté Λ (pas ou pitch) et le diamètre des trous d [24].

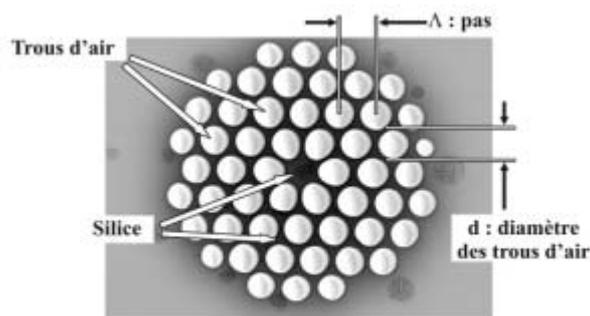
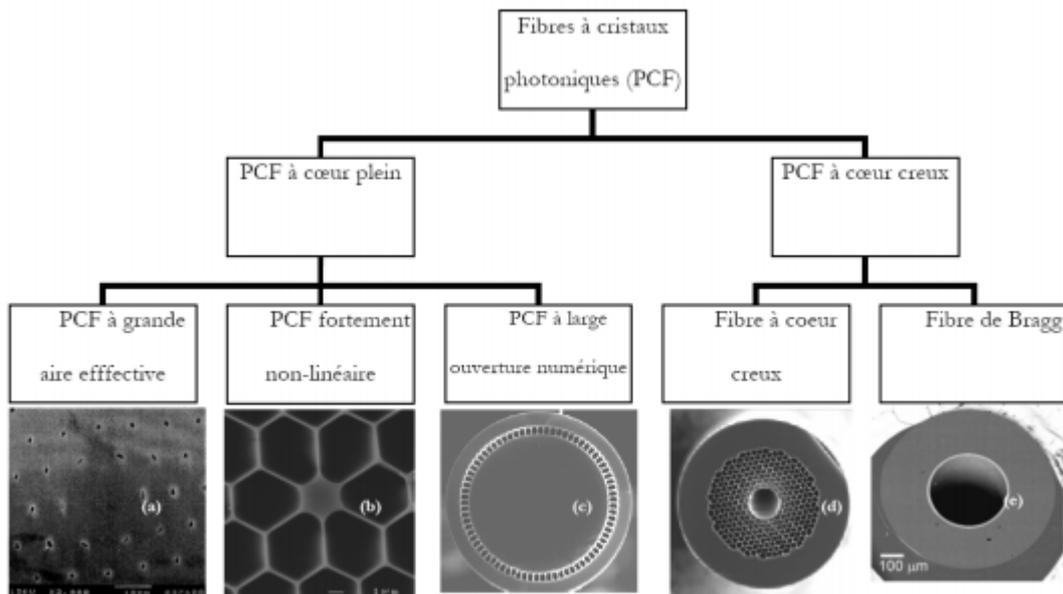


Figure I-15 :

Coupe transversale d'une PCF avec ses paramètres

IIX-4 Classification des fibres à cristaux photoniques :

Selon la géométrie particulière des fibres à cristaux photoniques, le guidage de la lumière peut s'effectuer de deux façons différentes suivant que l'indice du cœur est supérieur ou inférieur à celui de la gaine [32].

**Figure I-16:**

Classification des fibres à cristaux photoniques suivant le principe de guidage.

- (a) première fibre à grande aire effective réalisée à l'université de Bath $d=1 \mu\text{m}$, $\Lambda=11 \mu\text{m}$,
- (b) fibre non-linéaire $d=1.5 \mu\text{m}$, $\Lambda=2 \mu\text{m}$,
- (c) fibre à large ouverture numérique $d_{\text{cœur}}=200 \mu\text{m}$,
- (d) fibre à cœur creux $d=9.7 \mu\text{m}$, $d_{\text{microstructure}}=50 \mu\text{m}$,
- (e) fibre de Bragg $d=350 \mu\text{m}$ [<http://www.crystal-fibre.com>]

Conclusion

Par conséquent, le cristal photonique est un matériau diélectrique artificiellement structuré ou un matériau métallique, et sa constante diélectrique a des changements périodiques dans plusieurs directions dans l'espace sur l'échelle de longueur d'onde, et a un contraste d'indice de réfraction suffisamment élevée. Pour mieux comprendre le fonctionnement de ce matériau, il y'a est une analogie peut être faite avec la bande interdite aux électrons qui caractérise le réseau cristallin atomique : Par conséquent, la structure photonique a une (ou plusieurs) bandes

interdites pour Indépendamment de la polarisation et de la direction de propagation des ondes électromagnétiques ; les ondes électromagnétiques ne peuvent pas se propager. Cette caractéristique intéressante offre la possibilité de contrôler les cristaux photoniques.

Reference

- [1] REYES-AVENDAÑO, J. A., ALGREDO-BADILLO, U., HALEVI, P., et al *From photonic crystals to metamaterials: the bianisotropic response. New Journal of Physics*, vol. 13, no 7, p. 073041, (2011).
- [2] BRAUN, Paul V., RINNE, Stephanie A., et GARCÍA-SANTAMARÍA, Florencio. *Introducing defects in 3D photonic crystals: state of the art. Advanced Materials*”, vol. 18, no 20, p. 2665-2678, (2006).
- [3] JOANNOPOULOS, John D., VILLENEUVE, Pierre R., et FAN, Shanhui. *Photonic crystals: putting a new twist on light. Nature*, vol. 386, no 6621, p. 143, (1997).
- [4] H.ABRI BADAOUI ,M.ABRI et M.FEHAM *contribution à la conception d'un Nouveau filtre sélectif à bas des CP-2D par la Méthode FDTD. In conférence national sur les Technologies de l'information et des Télécommunication CNTIT(Vol.13,pp.10-11).*
- [5] EI ABDELLAOUI, YOUSRA et MEUNIER, THOMAS . *Fabrication de cristaux photoniques 3d: « bande interdite ». Rapport de Projet Tuteuré, (2014).*
- [6] Mahmoud Riad BEGHOU. *Contribution a la réalisation de fonctions optoélectroniques a bas de cristaux photoniques pour les télécommunications. Thèse de doctorant. Université Mentouri -Constantine(2008).*
- [7] Melle Boukerzaza loubna *Influence des paramètres physiques sur la bande interdite Photonique d'un cristal photonique bidimensionnel à réseau hexagonal. Mémoire. Université Mentouri -Constantine(2007-2008).*
- [8] <http://www.techno-science.net/definition /3314.html>
- [9] Soumia Massaoudi. *Etude théorique et expérimentale des matériaux à bandes interdites photoniques bidimensionnels en micro-onde : application à l'ultra réfraction. Physique [physics]. Université Paris Sud - Paris XI, 2005. Français. fftel-00178075*
- [10] BENACHOUR, Yassine. *Optimisation de cristaux photoniques pour l'optique non linéaire. 2008. Thèse de doctorat. Université Paris Sud-Paris XI.*
- [11] https://fr.wikipedia.org/wiki/Cristal_photonique
- [12] JOANNOPOULOS, John D., JOHNSON, Steven G., WINN, Joshua N., et al. *Photonic crystals: molding the flow of light. Princeton university press, second édition, (2008).*

- [13] **M.GRILLET** ,*cristaux photonique et intégration photonique. Thèse de doctorant. Université de lyon (2003).*
- [13] <http://physique.unice.fr/sem62013-2014/Pages/WebPTCristauxCaracteristiques.htm>
- [14] **LOURTIOZ, Jean-Michel et BENISTY, Henri.** *Les cristaux photoniques ou la lumière en cage. Hermes-Science, 2003*
- [15] **LABBANI, Amel.** *Matériaux BIP à base de nanoparticules métalliques et semi conductrices: étude des propriétés optiques par FDTD. Thèse de doctorat. Saint-Etienne. (2009)*
- [16] **9ALAMI .** *les reseaux direct et reciproque. La physique des materiaux.1.chapitre 1.Pr.A.Belayachi.université Mohammed V-Agdal (2015).*
- [17] **LEFAUCHEUX, Françoise. Cécile Malgrange, Christian Ricolleau,** *Symétrie et propriétés physiques des cristaux, (2011).*
- [18] **LABBANI, Amel.** *Matériaux BIP à base de nanoparticules métalliques et semi conductrices: étude des propriétés optiques par FDTD. Thèse de doctorat. Saint-Etienne. 2009.*
- [19] **DESIE RESYOHAN .** *conception et etudes de composants micro-photoniques sur matériaux III-V a bas de structures a bande interdite de photon .these de doctorant ,l'institut national des sciences appliques de Lyon (2001)*
- [20] **WAGHMARE, Madhavi H. et REDDY, K. T. V.** *Analysis of Photonic bandgap structure in 2-D hexagonal and square lattice structure of photonic crystal. In :Advances in Communication and Computing Technologies (ICACACT),International Conference on. IEEE, 2014. p. 1-4, (2014).*
- [21] **GAUFILLET, Fabian.** *Cristaux photoniques à gradient: dispositifs et applications. Thèse de doctorat. Université Paris Sud. (2014).*
- [22] **Marc Zelsmann.** *Cristaux photoniques en silicium sur isolant pour le guidage, le filtrage, l'émission et l'extraction de lumière. Physique Atomique [physics.atom-ph]. Université Joseph-Fourier – Grenoble I, 2003. Français. fftel-00003731f.*
- [23] **MALACHE HDJER,MAHIAMEL.** *Nouvelles structures des démultiplexeurs en cristaux P-2D pour les systèmes très haut débit (2018)*

- [24] **BENAISSA, Fatima.** *Etude et Simulation des Ondes Electromagnétiques dans les guides d'Ondes à Cristaux Photoniques-Application aux Fibres Optiques.. Mémoire de magister. Université de Abou-BakrBelkaid-Tlemcen, (2013).*
- [25] **RENVERSEZ, Gilles, KUHLMHEY, Boris, FELBACQ, Didier,**et al. *Foundations of Photonic Crystal Fibres.* World Scientific Publishing Co Inc, (2012).
- [26] **YASSINE BENACHOUR.** *Optimisation de cristaux photonique pour l'optique nonlinéaire .Université sz Paris Sud (2008)*
- [27] **OTMANI, Hamza.** *Etude théorique des propriétés magnéto-optiques de cristaux magnéto photoniques à structure ferrite grenat de bismuth (big), Thèse de doctorat, université Constantine 1, (2014).*
- [28] **J.m.Lourion,d.mayster,h.benisty,v.berger,j.m.grerad,a.Techelnkov.** des cristaux photonique ou la lumière en cage. GET et lavoisier, Paris (2003).μ
- [29] **Jean-Michel LOURTIOZ,** *Cristaux photoniques et « gap » de photons –Aspects fondamentaux » Technique de l'Ingénieur, AF 3 710, 07/2004.*
- [30] <http://physique.unice.fr/sem6/2013-2014/PagesWeb/PT/Cristaux/Applications.htm>
- [31] https://fr.wikipedia.org/wiki/Fibre_%C3%A0_cristal_photonique
- [32] **J. Broeng, S. E. Barkou, T. Sondergaard, and A. Bjarklev ,** “*Analysis of air-guiding photonic bandgap fibers*”, *Opt. Lett.*, vol. 25, pp. 96-98, 2000.

CHAPITRE II

**METHODES
ET OUTILS
NUMERIQUES**

Méthodes et outils numériques

Dans ce chapitre on va traiter le développement des équations de Maxwell dans un milieu homogène et isotrope. On étudie les différentes méthodes numériques pour analyser les problèmes électromagnétiques, l'objectif est d'étudier la propagation des champs dans les cristaux photoniques et les fibres à base des cristaux photoniques. Parmi ces méthodes on a la méthode des matrices de transfert (TMM) utilisée pour détermination des coefficients de transmission et de réflexion des ondes EM. Ainsi, la méthode d'élément fini (FEM) qui permet de traiter une grande classe d'équations différentielles partielles, modélisant des problèmes non linéaires, ensuite la méthode des ondes planes est une onde monochromatique adaptée à l'étude du diagramme des bandes d'un BIP infini. Enfin la méthode FDTD. Largement utilisée, que nous comptons l'utilisée dans notre travail pour la simulation électromagnétique en particulier la résolution des équations de Maxwell [1].

II Méthodes numériques de calcul

II-1 la méthode des matrices de transfert (TMM)

Elle est souvent utilisée pour déterminer les coefficients de réflexion et de transmission des empilements unidimensionnels [2], mais a été adaptée au cas bidimensionnel par Pendry [3,4]. La structure est divisée en une succession de couches et une matrice de transfert permettant de relier les champs dans une couche à ceux de la couche précédente [5]. La fréquence est ici une variable, et non plus une inconnue comme dans le cas des ondes planes. Ainsi, il est aussi possible, par cette méthode, de remonter à la structure de bande puisque l'on calcule les éventuels vecteurs d'onde de propagation en fonction de la fréquence. De plus, l'éventuelle dépendance en fréquence du constant diélectrique sera plus facilement prise en compte.

II-2 la méthode des réseaux de diffraction

Un réseau de diffraction est un composant optique obtenu en structurant périodiquement une interface séparant deux matériaux. Cette structuration entraîne une modulation de l'indice de réfraction suivant une ou deux directions du plan de l'interface [6], cette méthode est basée sur une description du cristal photonique comme un ensemble de réseaux de diffraction successifs, les champs sont décomposés dans chaque région séparant ces réseaux, la théorie des réseaux est appliquée pour relier les

coefficients de cette décomposition d'une région à l'autre, l'intérêt de cette méthode est qu'elle donne non seulement les modes guidés et les résonances (ce sont les pôles de la matrice de diffusion), mais aussi les pertes intrinsèques de ceux-ci [7].

II-3 la méthode d'élément fini (FEM)

La méthode des éléments finis est une méthode numérique pour résoudre les équations de Maxwell, dans diverses formulations ou d'autres équations aux dérivées partielles, les avantages principaux des méthodes à éléments finis, sont la représentation exacte des caractéristiques géométriques complexes présentes dans les applications réelles, les très bonnes propriétés de convergence qui permettent des résultats très précis en temps de calcul relativement court et la stabilité, l'applicabilité générale de la méthode aux différents paramètres de simulation [6], *FEM* utilise un maillage non structuré pour représenter le domaine, qui se décompose en nombreux éléments de forme simple, de taille et d'orientation différentes, les équations de Maxwell sont exprimées en un ensemble d'équations linéaires qui se rapprochent du champ sur un élément: une fonction d'interpolation est choisie et ses coefficients sont calculés pour chaque élément et stockés sous forme de matrices élémentaires; Ces matrices sont ensuite assemblées en matrices globales qui forment un problème de valeur propre dont la dimension dépend du nombre d'éléments [2], la méthode des éléments finis a été publiée par *Turner* en 1959, la méthode étant confinée à la communauté de la mécanique des structures et à l'industrie aérospatiale, par définition, cette méthode pourrait indiquer qu'il s'agit simplement d'une technique numérique pour obtenir des solutions approximatives aux équations différentielles particulières [7].

II-4 la méthode des ondes plan

La méthode des ondes planes (Plane 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. Les équations de Maxwell sont représentées dans le domaine fréquentiel et transformées en un problème aux valeurs propres. En résolvant ce problème aux valeurs propres, les champs électromagnétiques et les fréquences correspondant à chaque onde plane sont obtenus.

La méthode des ondes planes est la plus couramment utilisée pour calculer les bandes de fréquences autorisées (ou interdites) des ondes électromagnétiques susceptibles de

se propager dans le matériau considéré comme milieu propageant non borné et ceci pour n'importe quelle direction. Un autre outil de modélisation est susceptible de fournir ce genre d'information : la FDTD [8].

II-5 Modélisation par la méthode des différences finies dans le domaine temporelle (FDTD)

La méthode FDTD a été proposée à l'origine par *Kane S. Yee* en 1966. *Yee* dérive une formulation tridimensionnelle complète, et il a validé la méthode avec des problèmes bidimensionnels. La méthode de *Yee* a été principalement non-remarquée pendant près d'une décennie. Enfin, en 1975, *Taflov* et *Brodwin* ont appliqué la méthode de *Yee* pour simuler la diffusion par des cylindres diélectriques [9].

La méthode FDTD (Finite Difference Time Domain) est particulièrement intéressante pour connaître la réponse spectrale d'un système non nécessairement périodique et pour calculer les distributions de champ dans des structures de dimensions finies. Elle ne nécessite aucune hypothèse de départ sur la forme possible des solutions ou des ondes se propageant dans la structure, ce qui la rend indépendante de la géométrie du système à modéliser. Elle est basée sur la discrétisation temporelle et spatiale des équations de Maxwell en remplaçant les dérivées partielles par leur développement de Taylor à l'ordre 2, c'est-à-dire par des différences finies. Le principal inconvénient de la FDTD, qui tend cependant à s'estomper avec les évolutions des capacités informatiques, est qu'elle est très lente et demande des ressources informatiques importantes [10].

II-5-1 Principe

La méthode *FDTD* est une méthode basée sur le volume nécessitant de diviser l'espace de la solution en un maillage uniforme composé de cellules. Sur chaque cellule, les composantes des champs \vec{E} et \vec{H} seront définies. Cet aspect de la méthode *FDTD* est identique au *FEM*. Cependant, dans le *FEM*, une équation matricielle est développée, qui peut alors être résolue de diverses manières. Dans la méthode *FDTD* aucune solution matricielle n'est nécessaire. En d'autres termes, à mesure que le temps évolue, la solution pour chaque composante de champ est déterminée pour cet instant particulier dans le temps puis stockée en mémoire, le développement de la *FDTD* ici sera basé sur la cellule *Yee*. La particularité de la cellule *Yee* est que les composantes des champs \vec{E}

et \vec{H} sont décalées d'une demi-cellule spatiale, ce qui facilite les schémas de différenciation qui sont suffisamment précis [11].

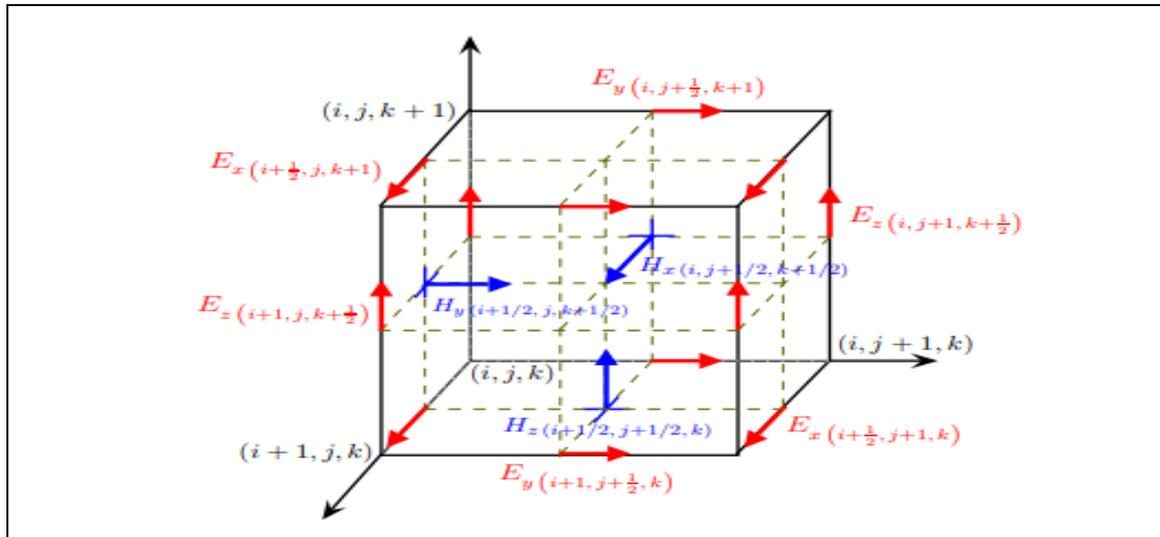


Figure II-1 :

Figure à trois dimensions schémas de Yee

II-5-2 Les équations de Maxwell dans l'espace cartésien

La méthode FDTD est basée sur la résolution numérique des équations de Maxwell. Ces dernières s'écrivent de la manière suivante :

$$\overrightarrow{\text{rot}}\vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (\text{II-18})$$

$$\overrightarrow{\text{rot}}\vec{H} = \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (\text{II-19})$$

Ces équations sont complétées par les deux relations caractérisant les milieux diélectriques et magnétiques où ε et μ désignent respectivement la permittivité diélectrique et la perméabilité magnétique du milieu. La méthode FDTD est basée essentiellement sur la discrétisation aux différences centrées des équations différentielles de Maxwell (II-16) et (II-17). Notons que les lois de Gauss pour les

inductions électrique et magnétique sont implicites dans l'algorithme de la FDTD. Rappelons que dans un espace cartésien de repère (O, x, y, z) , les équations différentielles de Maxwell (Faraday et Ampère respectivement) s'écrivent [12]

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} \right) \\ \frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \right) \\ \frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \\ \frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) \end{array} \right. \quad (\text{II-20})$$

Le système de six équations différentielles partielles couplées forme la base de l'algorithme numérique FDTD pour les interactions d'ondes électromagnétiques [13].

II-5-3 Réduction à deux dimensions

La réduction des équations de Maxwell à l'espace bidimensionnel est utile pour obtenir les solutions de nombreux problèmes. Dans ce cas, la propagation se fait dans le plan et la variation des champs s'annule suivant la troisième direction. Le système d'équations (II-20) se simplifie et se subdivise en deux sous-systèmes donnant naissance aux deux polarisations transverse électrique TE et transverse magnétique TM. Pour illustrer ce cas, supposons que le cristal est périodique suivant les directions x et z et est infini suivant y . Les dérivées par rapport à y s'annulent. Les équations 1.18 impliquent [12] :

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_y}{\partial z} \right) \quad (\text{II-21} a)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} \right) \quad (\text{II-21} b)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(-\frac{\partial E_y}{\partial x} \right) \quad (\text{II-21}) c$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(-\frac{\partial H_y}{\partial z} \right) \quad (\text{II-22}) a$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \quad (\text{II-22}) b$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} \right) \quad (\text{II-22}) c$$

Il y a deux ensembles de polarisations qui sont différents, le premier ensemble est le mode transversal magnétique (TM) ses composantes des champs E_x , E_z et H_y sont non nulles et le second ensemble est le mode transversal électrique (TE) avec les composantes sont H_x , H_z et E_y [14].

a- Polarisation TM

Nous considérons le regroupement (II-19) et (II-20) en fonction des composantes des champs électriques et magnétiques.

Le mode TM est défini par [15] :

$$\begin{cases} H_x = H_z = E_y = 0 \\ E_x, E_z, H_y \neq 0 \end{cases} \quad (\text{II-22})$$

Donc à partir de cette définition on peut définir le premier système de transverse Magnétique :

$$\begin{cases} \frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(-\frac{\partial H_y}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} \right) \\ \frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} \right) \end{cases} \quad (\text{II-23})$$

b- Polarisation TE

Le mode TE de deux dimensions est défini à partir de système (II-19) et (II-20) et ce mode est caractérisé par:

$$\begin{cases} E_x = E_z = H_y = 0 \\ H_x, H_z, E_y \neq 0 \end{cases} \quad (\text{II-24})$$

Et donc les équations de Maxwell dans le transverse électrique se réduisent à :

$$\begin{cases} \frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_y}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(-\frac{\partial E_y}{\partial x} \right) \\ \frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \end{cases} \quad (\text{II-25})$$

Les modes TM et TE Constituent les deux manières possibles d'établir des problèmes bidimensionnels d'interception d'ondes électromagnétiques pour le cas de dérivées partielles nulles dans la direction y . Les phénomènes physiques associés à ces deux modes peuvent être différents, ceci est dû à l'orientation des lignes des champs \vec{E} et \vec{H} par rapport à la surface de la structure en cours de modélisation [16].

Chapitre III

Simulations et Interprétations

Simulations et Interprétations

Ce chapitre est consacré à la simulation de la propagation d'une onde électromagnétique dans une fibre à cristaux photonique formé d'un réseau hexagonal de trous d'air est gravé dans un diélectrique. Nous allons utiliser la méthode de différence finie dans le domaine temporelle (FDTD). Les paramètres choisis comme suit :

n: indice de réfraction, **a** : la constant de réseau, **r** : le rayon des trous, **f** :facteur de remplissage

1- Simulation

a. Méthode de simulation :

Pour la simulation, nous avons utilisé la méthode FDTD (Méthode des différences finies dans le domaine temporelle), qui existe dans la base de données Optiwave (OptiFDTD). On s'intéresse à l'étude des cas suivants :

- I. Une comparaison entre deux matériaux diélectriques, dont l'objectif est d'étudier l'influence du choix du matériau sur la propagation de l'onde électromagnétique dans la fibre à cristaux photoniques.
- II. Etude de la propagation d'une onde EM dans une fibre à cristaux photoniques pour des différentes valeurs du diamètre pour la polarisation (TE).
- III. Etude de la propagation d'une onde EM dans une fibre à cristaux photoniques pour un agrandissement du cœur : 7cellules ,19cellules,37cellules.

b. Caractéristiques des matériaux simulés :

Dans le cadre de la simulation des cas précédents (I, II, III), nous avons choisis les paramètres suivants :

- I. Deux fibres optiques de cristaux photoniques, un à base de silicium dont l'indice de réfraction est $n=1.45$, le deuxième est à base de phosphore de galium *GaP* d'indice $n=3.1$, avec les mêmes paramètres : $a=2.3 \mu\text{m}$, et le rayon des trous : $r=0.6 \mu\text{m}$ et la longueur d'onde d'excitation est $\lambda=1.55 \mu\text{m}$.
- II. Dans ce cas nous avons choisis un seul matériau, il s'agit du silicium dont l'indice de réfraction est $n=1.45$, avec les paramètres suivants : $a=2.3 \mu\text{m}$, et différents valeurs du rayon des trous : $r_1=1 \mu\text{m}$, $r_2=0.8 \mu\text{m}$, $r_3=0.2 \mu\text{m}$, et la longueur d'onde d'excitation est $\lambda=1.55 \mu\text{m}$.

2-Description du logiciel

Optiwave est un logiciel de conception pour photonique, OptiFDTD est un logiciel puissant hautement intégré basé sur la méthode de FDTD, ce logiciel est établi pour la simulation des dispositifs optiques intégrés, une séquence de conception de simulation FDTD typique peut être définie comme suit : définir les matériaux et les profils à utiliser dans la simulation puis créer les objets, les sources de la lumière enfin analyser les résultats [1].

La structure de logiciel globale est définie dans l'organigramme suivant

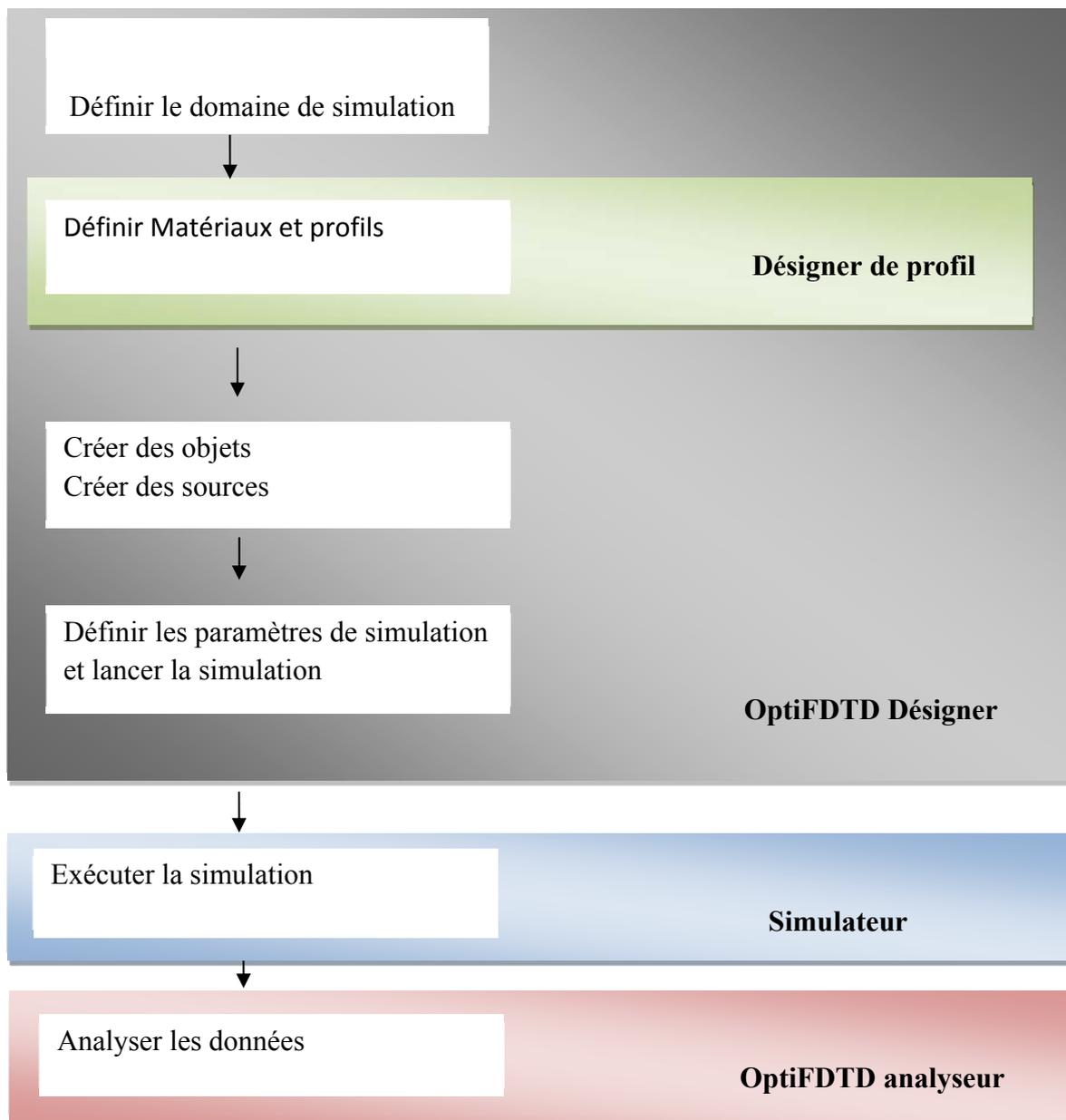


Figure III-1
organigramme de simulation de FDTD de développement OPTIFDTD

I- Etude du choix du matériau : comparaison entre une fibre à cristaux photoniques à base de silice et une autre à base de Phosphure de gallium :

Pour la comparaison, nous avons créé deux structures de rayon *de trous d'air* = $0,6 \mu\text{m}$ et un paramètre de maille = $2,3 \mu\text{m}$, *une fibre à cristaux photoniques à base de silice d'indice $n=1.45$ et une autre à base de Phosphure de gallium d'indice $n=3.1$* , la longueur d'onde d'excitation est $\lambda=1.55 \mu\text{m}$. Nous avons utilisé le logiciel OPTI FDTD pour créer la fibre à cristal photonique de structure hexagonale pour les deux matériaux.

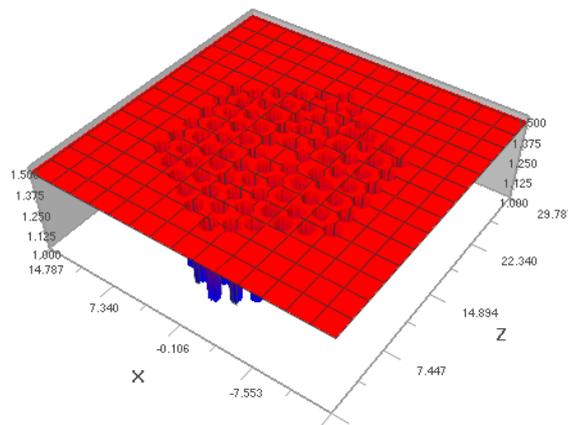


Figure III-2

Profil de distribution de l'indice de réfraction du silicium $n=1.45$,

Les Figures (III.3, III-4, III-5) représentent respectivement, la variation des composantes du champs électrique et magnétique E_y , H_z et H_x du mode (TE) le long de la direction horizontale du PCF. La propagation se fait selon la direction Z, la direction Y est supposée infinie.

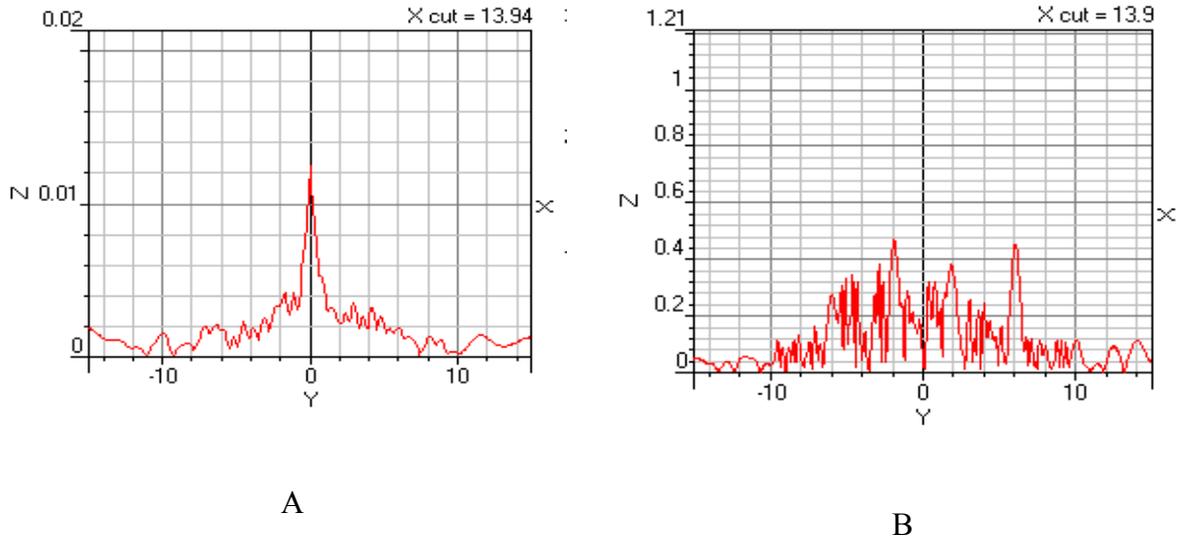


Figure III-3 :

La variation de l'amplitude de E_y dans le plan horizontal A) de la silice B) phosphore du galium.

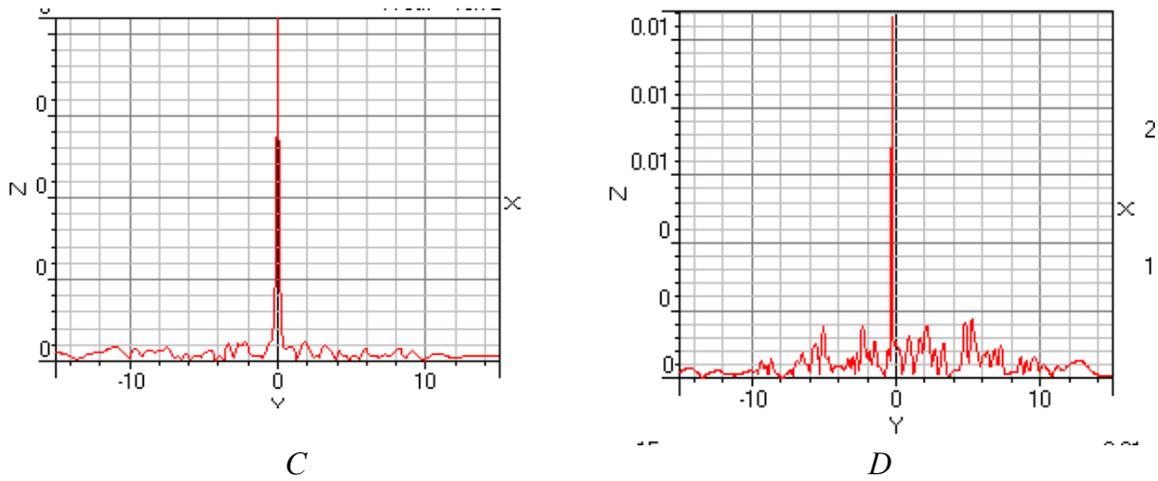


Figure III-4 :

La variation de l'amplitude de H_x dans le plan horizontal de C) la silice et D) phosphore du galium.

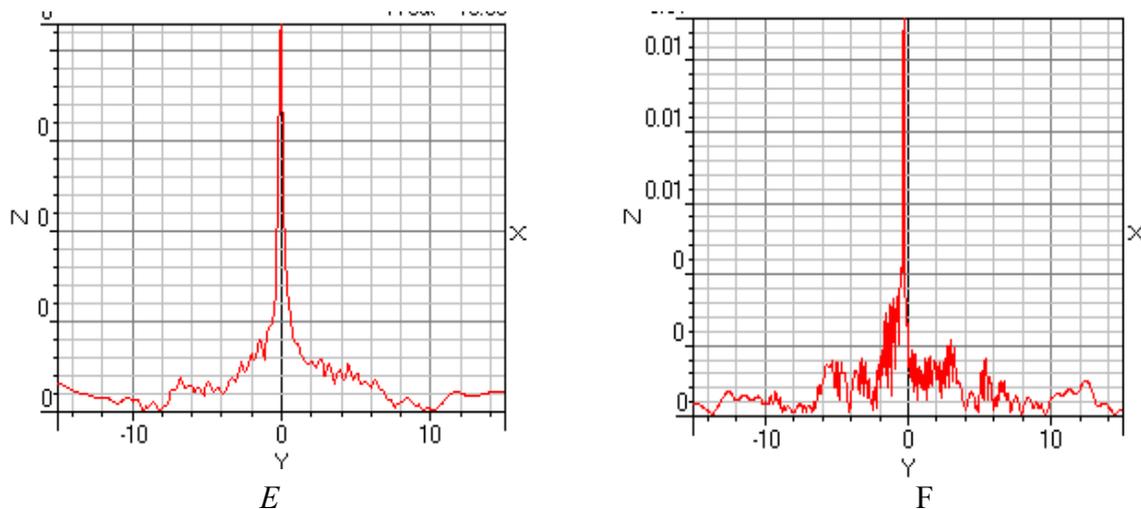


Figure III-5 :

La variation de l'amplitude de H_z dans le plan horizontal. E) de la silice et F) phosphore du gallium.

Ces résultats montrent la variation des composantes des ondes pour les deux structures de fibres optiques PCF conçues, ces figures indiquent comment les composantes du champ électrique et magnétique varient selon le plan horizontal. Nous observons que l'amplitude est plus élevée au début et diminue dès que l'onde tombe sur la première couche horizontale. Après cela, des variations mineures sont présentes lorsque l'onde passe à travers les couches alternées d'air et de matériau défini. La silice donne de meilleurs résultats que le phosphore de gallium car un grand nombre de fréquences indésirables sont présentes dans le GaP, Comme la silice présente une bande interdite étroite qui est utilisée pour des applications de capteurs à base de cristaux photoniques. Il a été observé qu'il y a un pique au centre de l'axe de la fibre (Fig III-3-a, III-4, III-5). Ceci est présent en raison du fait que les champs ont tendance à avoir de plus grandes concentrations dans les régions de plus grande réfraction [2].

Les fibres optiques à cristaux photoniques à cœur solide sont nommées ainsi « PCF à guidage d'indice », Ces avantages sont liés à des propriétés particulières de la gaine du cristal photonique qui sont dues au grand contraste d'indice de réfraction ce qui a rendu la possibilité de la propagation de la lumière dans le cœur et à la nature bidimensionnelle de sa structure. Ce qui affecte la biréfringence, la dispersion, le nombre de modes guidés.

En réduisant légèrement l'indice de réfraction, il est possible de désactiver complètement le guidage de la lumière pour les longueurs d'onde inférieures à une certaine valeur seuil.

Ainsi, la différence d'indice entre le cœur et la gaine optique est une fonction de la longueur d'onde. Plus précisément cette différence d'indice décroît lorsque la longueur d'onde diminue.

La structure des fibres à cristaux photoniques est plus complexe et la définition d'indice de réfraction pour la gaine est moins aisée car la gaine optique est un milieu hétérogène composé de canaux d'air dans une matrice en silice. L'arrangement des trous modifie l'indice de réfraction du milieu structuré. L'indice de réfraction modifié est appelé l'indice de réfraction effectif défini par le rapport de la vitesse de la lumière dans le vide à la vitesse de phase d'un mode guidé, l'indice de réfraction effectif ou équivalent est déterminé par les dimensions du guide d'onde et le profil d'indice de réfraction du guide d'onde, incluant le milieu entourant le cœur du guide d'onde et la longueur d'onde. Chaque mode de propagation est caractérisé par son indice de réfraction, qui peut être assimilé à l'indice de réfraction « vu » par la lumière se propageant selon ce mode et qui varie entre l'indice du cœur et l'indice de la gaine.

II- Etude de la propagation d'une onde EM dans une fibre à cristaux photoniques

a) Pour différentes valeurs du rayon.

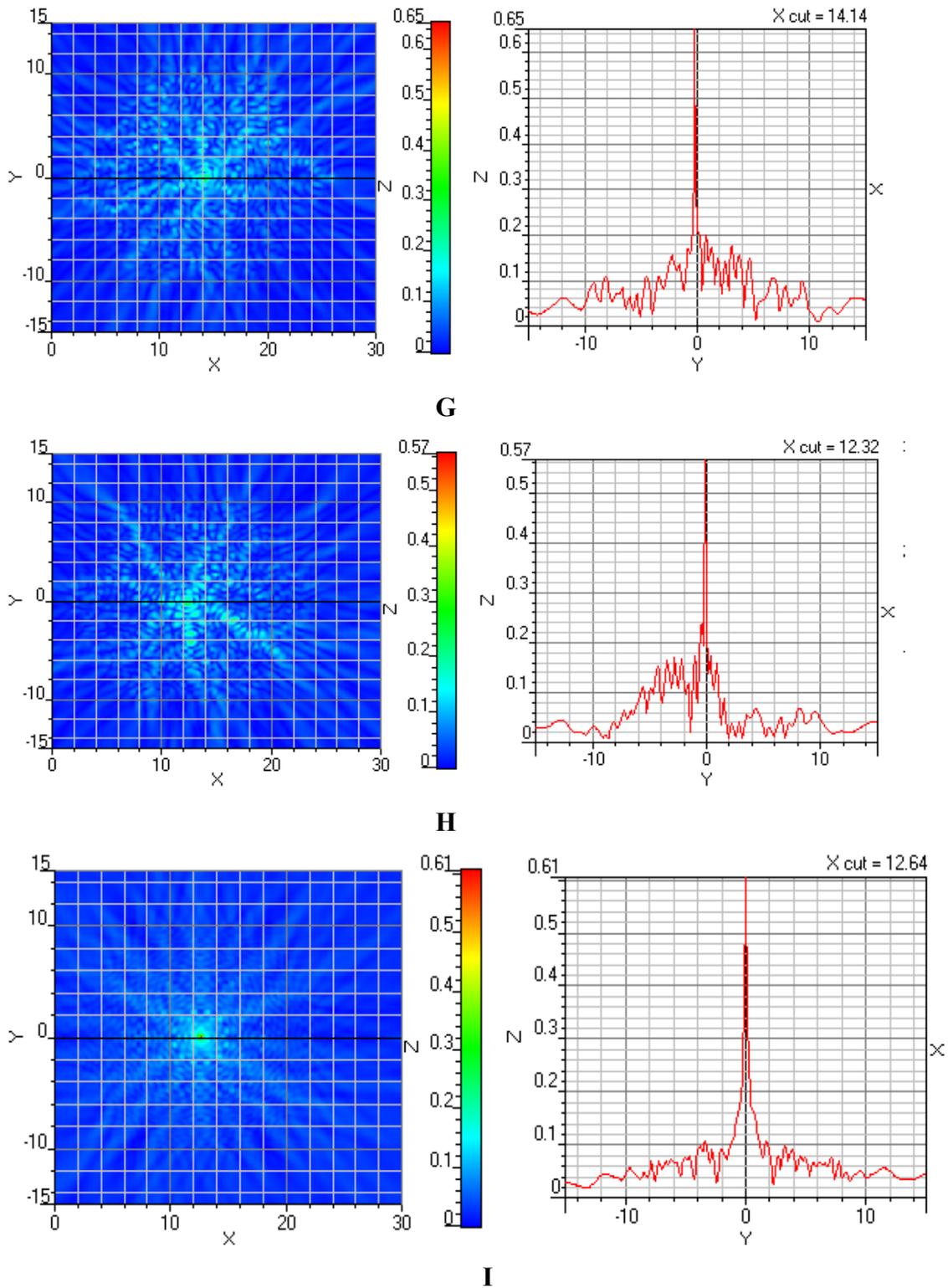


Figure III- 6:

la distribution de champ électrique E_y pour des différents valeurs des rayons. G) pour un rayon égal à $1 \mu\text{m}$, H) pour un rayon égal à $0.8 \mu\text{m}$, I) pour un rayon égal à $0.2 \mu\text{m}$

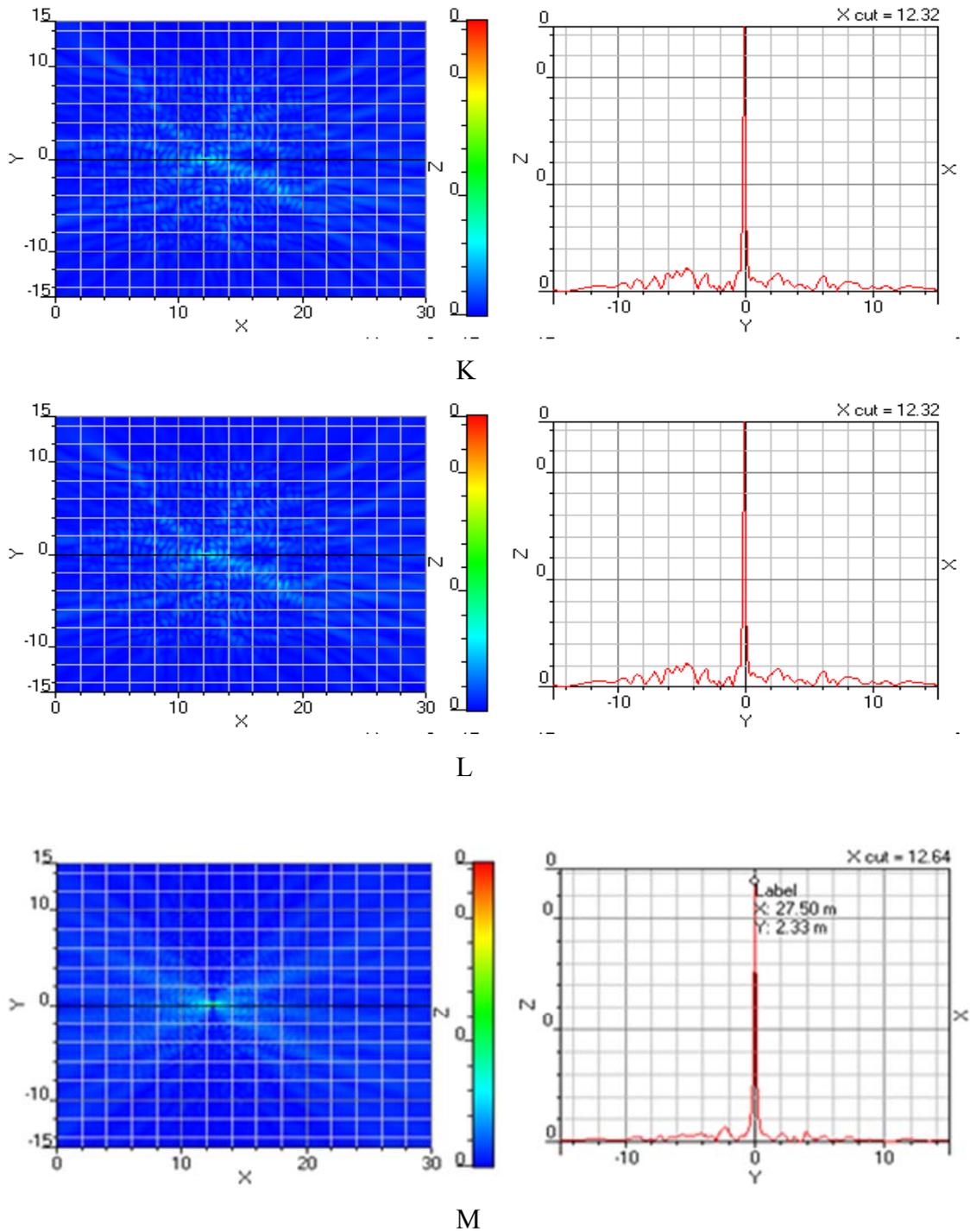


Figure III-7 :

Représente la distribution de champ magnétique H_x pour des différentes valeurs de rayons.

K) pour un rayon égal à $1 \mu\text{m}$, L) pour un rayon égal à $0.8 \mu\text{m}$, M) pour un rayon égal à $0.2 \mu\text{m}$.

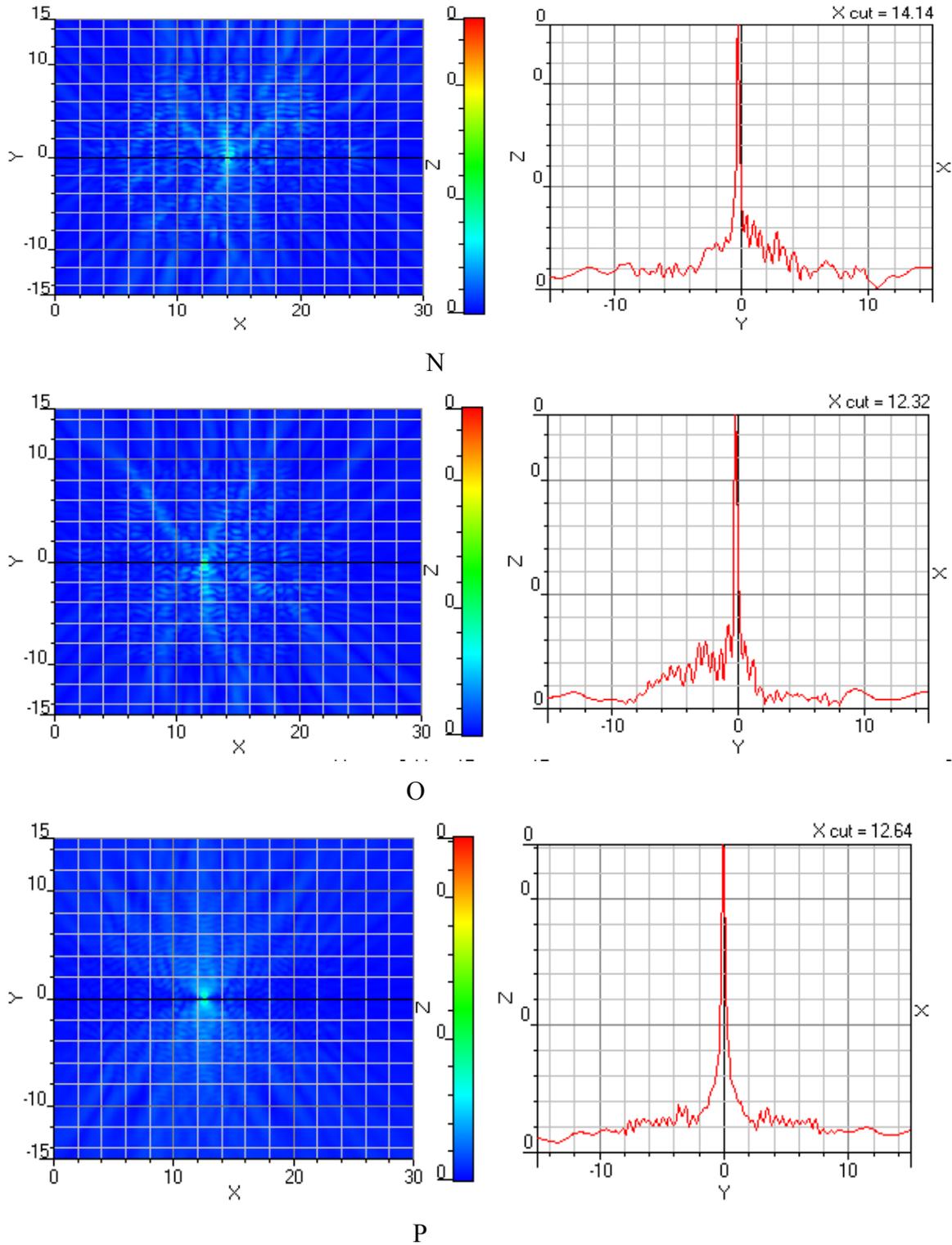
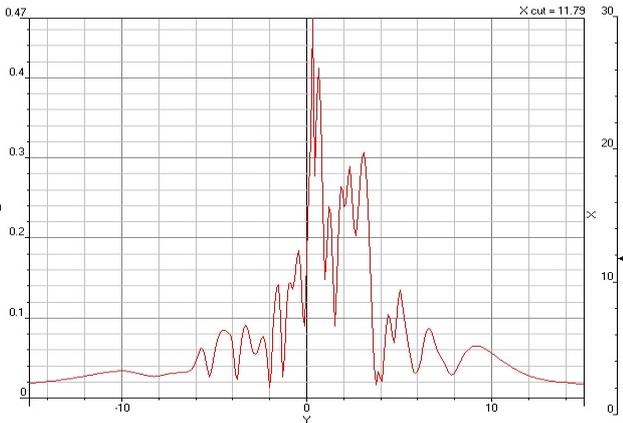
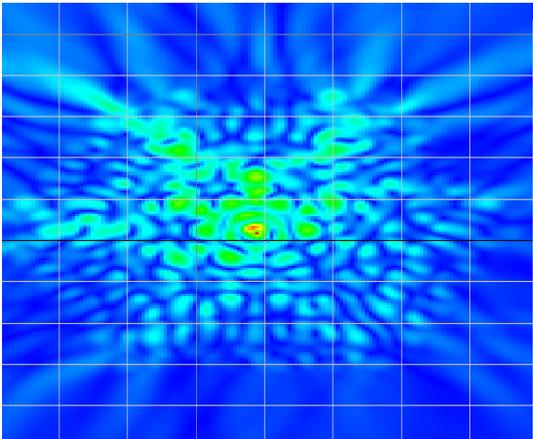


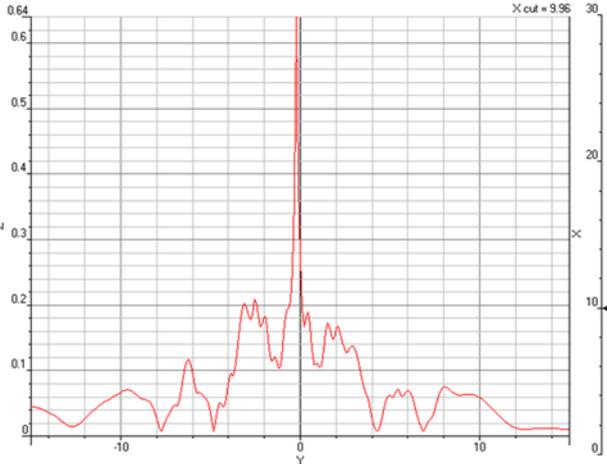
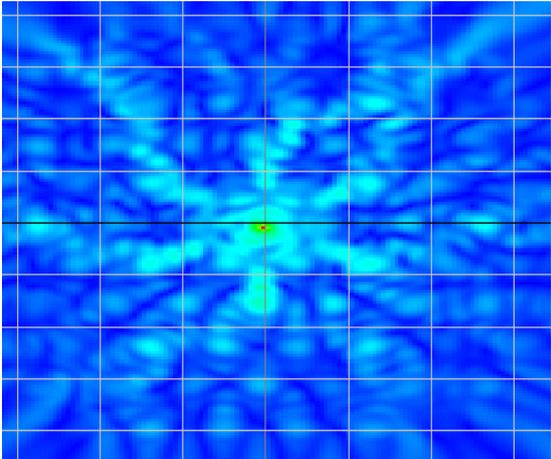
Figure III-8 :

Représente la distribution de champ magnétique H_z pour différentes valeurs de rayons.. N) pour un rayon égal à $1 \mu\text{m}$, O) pour un rayon égal à $0.8 \mu\text{m}$, P) pour un rayon égal à $0.2 \mu\text{m}$

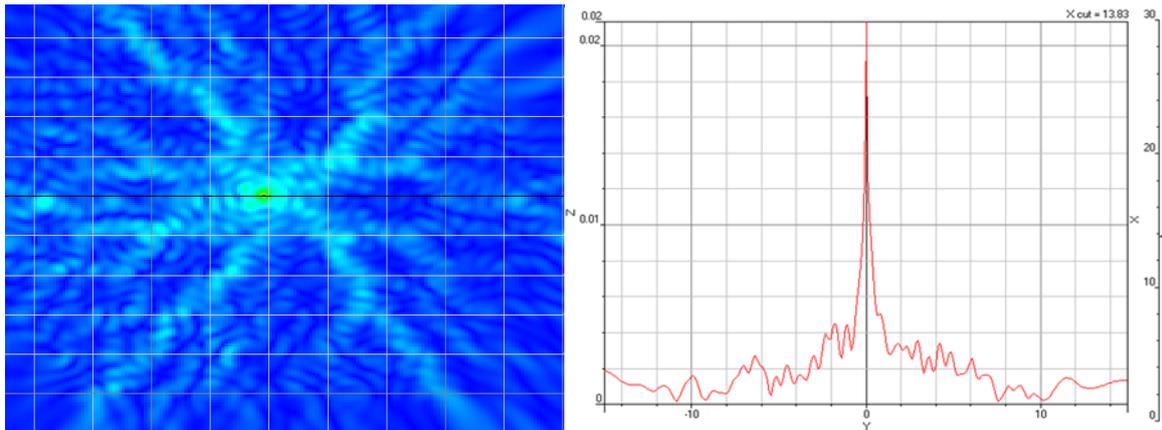
Pour différentes valeurs du Pitch :



Q



R



S

Figure III-9 :

Représente la distribution du champs électrique E_y pour une valeur $r=0.2\mu\text{m}$ et variation du pitch avec Q) pour $a=1.5 \mu\text{m}$, R) pour $a=1.8 \mu\text{m}$,S) pour $a=2.3 \mu\text{m}$.

Il est connu que la fibre PCF peut être monomode si facteur de remplissage d'air $f = d/ < 0,4$ [3].

La figure (III.9-Q)) montre que Le champ guidé dans la fibre est donc très étalé présentant une perte de confinement, ainsi que sa répartition d'énergie est très irrégulière. En variant le pitch, on constate que lorsque le rapport d/a , qui est la fraction de remplissage d'air de la gaine du cristal photonique, augmente, des modes successifs d'ordre supérieur sont piégés.

Les figures (III-9) montrent que, les pertes diminuent lorsqu'on augmente a le pitch tout en maintenant. Il est à noter que les pertes décroissent très fortement lorsque le rapport (d/a) augmente. On constate aussi que pour des valeurs relativement grandes ($a=1.8$, $a=2.3$), les variations des pertes tendent à s'annule au fur et à mesure que le rapport (d/a) diminue.

Lorsque le rapport d/a , qui est le facteur de remplissage d'air de la gaine du cristal photonique, augmente $d/a = (0.8*2)/2.3= 0.67$, $d/a=(1*2)/2.3 = 0.86$, les modes successifs d'ordre supérieur sont piégés (confinés) voir figure (III-6-7-8).

En plus la fibre optique devient monomode pour des valeurs de $d/a= (0.2*2) /2.3=0.18 < 0.4$ (voir figure III.6 (I) etIII.8 (P)), où la représentation de la répartition du champs Electric

montre l'existence d'un seul mode fondamental confiné au centre du cœur de la fibre, tandis que, pour les valeurs $d/a > 0.4$, les figures (III.6 - G, H, III.7- K, L, III.8 N, O) montrent l'apparition de modes d'ordres supérieures élevés. On constate que les modes d'ordre élevé ont une perte de confinement plus importante que le mode fondamental.

En plus on remarque que l'augmentation du diamètre des trous d'air (0.2 μm , 0.8 μm , 1 μm) a un effet significatif sur la réduction du pitch pour obtenir ceci qui permet d'obtenir une faible perte de confinement expression de la perte de confinement

$$\alpha_L = \frac{20}{\ln(10)} \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}(n_{\text{eff}}) \cdot 10^9$$

Comme on peut enregistrer une variation de l'indice de réfraction effective suite aux variations du diamètres des trous et le pitch. Ce dernier varie principalement d'une manière remarquable physiquement en fonction de la longueur d'onde excitatrice et le pitch ce qui peut être justifié par la relation suivante qui donne la fréquence normalisée est une caractéristique qui nous permettre de connaître le comportement modal de la fibre par analogie avec celui des fibres à saut d'indice. La fréquence normalisée de la fibre à saut équivalente est [3]:

$$V_{\text{eff}} = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_{\text{co}}^2 - n_{\text{eff}}^2}$$

Il y a lieu de noter que ce type de fibres à cristaux photoniques à cœur creux sont caractérisés par un faible indice de réfraction effectif.

III- Etude de la propagation d'une onde EM dans une fibre à cristaux photoniques pour un agrandissement du cœur.

En introduisant des défauts dans la structure d'un cristal photonique, de nombreuses applications peuvent être réalisées telles que : le contrôle de l'émission spontanée dans les dispositifs, les guides d'ondes rectilignes et à forte rayon de courbure, les filtres, les microcavités à grand facteur de qualité et fibre optique.

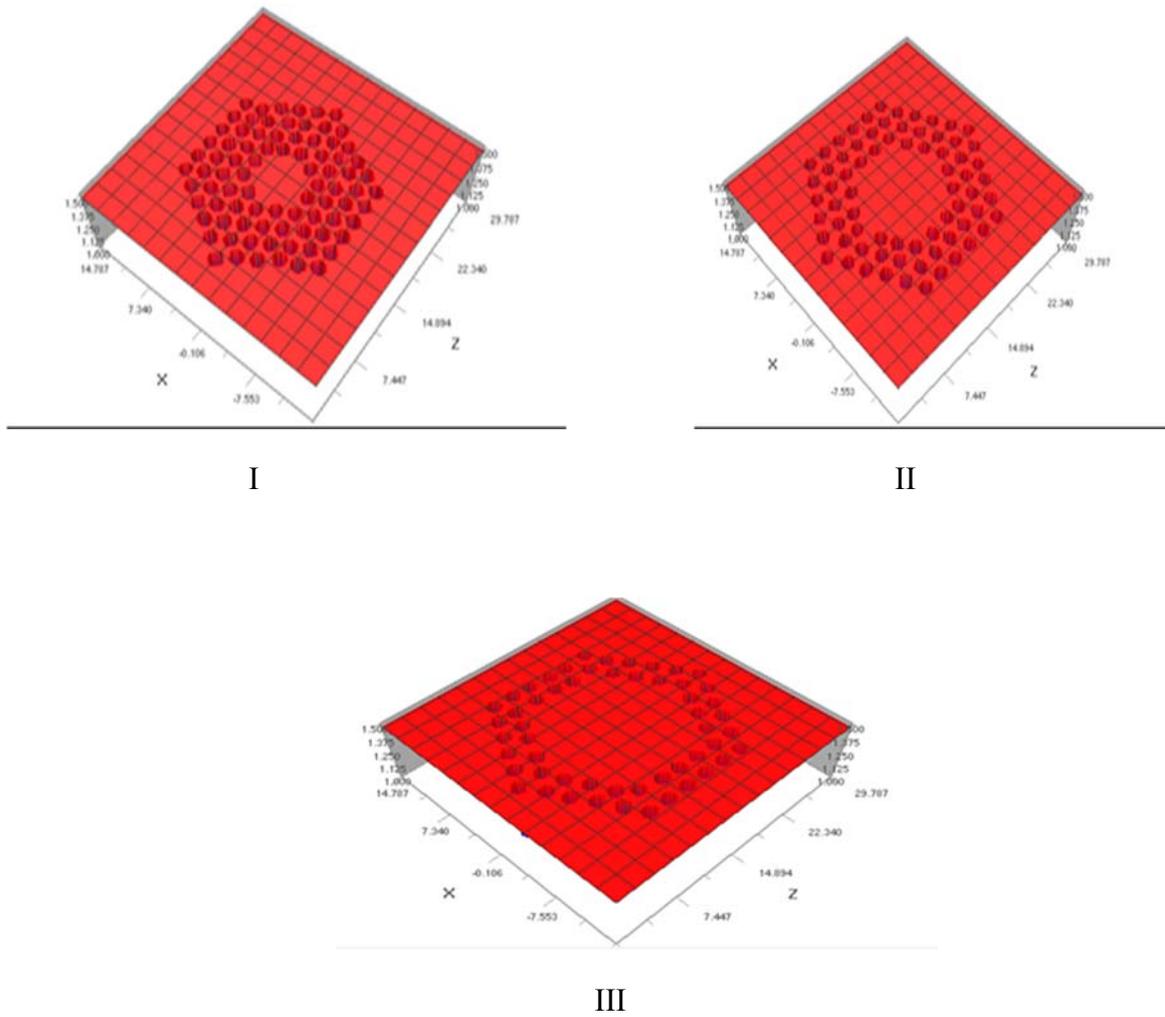
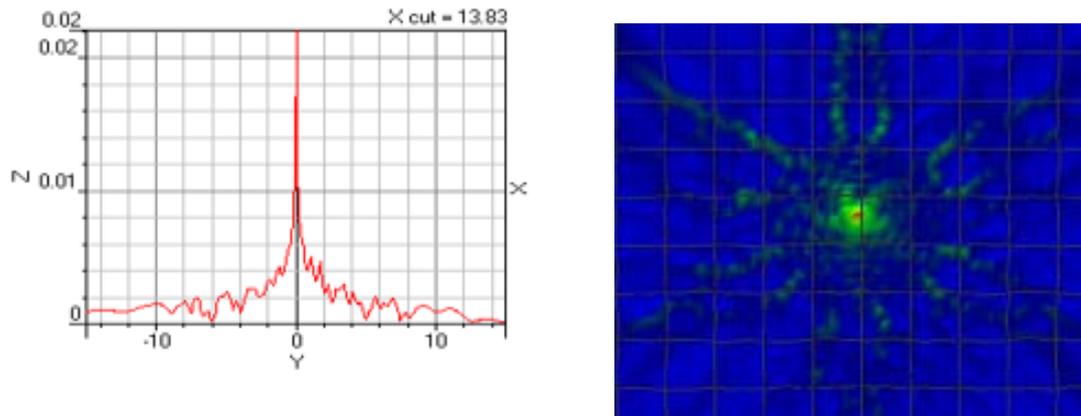


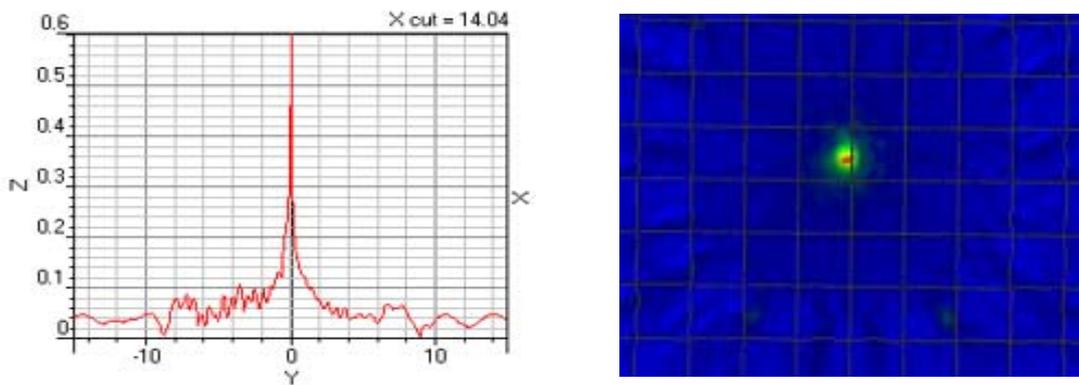
Figure III-10 :

Représente le Profil de distribution de l'indice de réfraction du silicium.

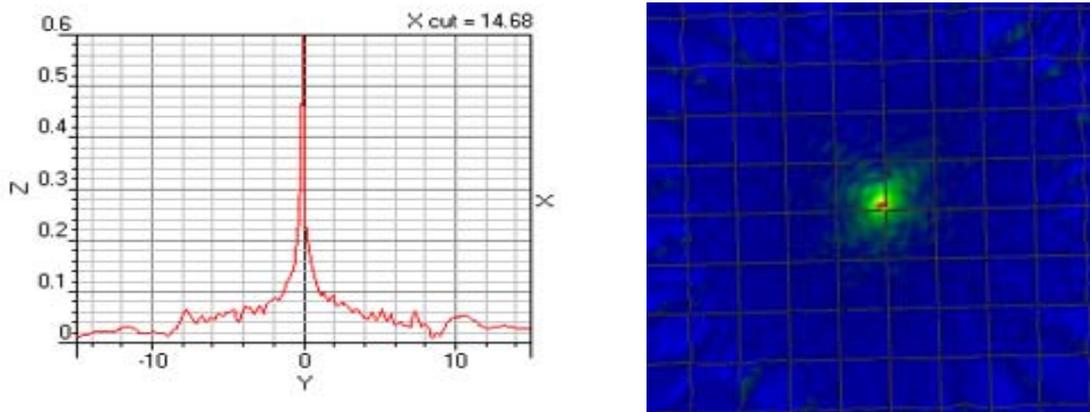
I) Représente 7 cellules, II) Représente 18 cellules, III) Représente 37 cellules



A



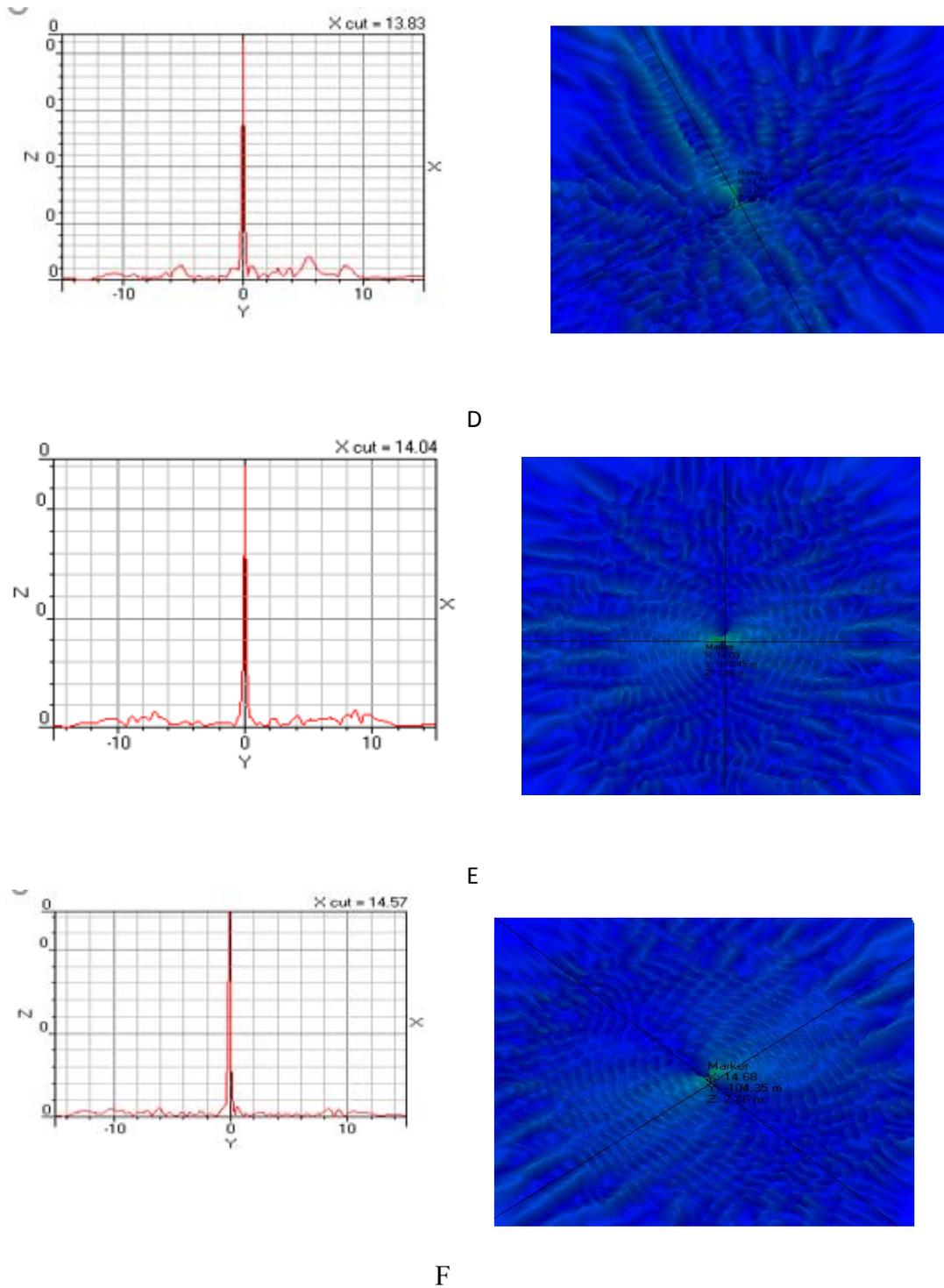
B



C

Figure III-11 :

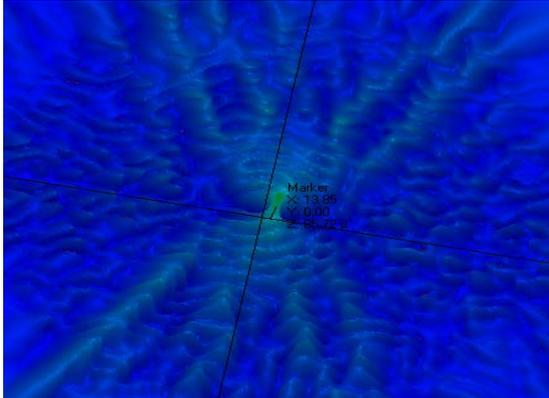
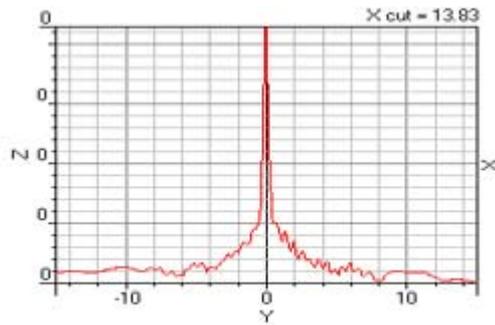
Représente la distribution du champ électrique E_y par agrandissement du cœur. a) pour un cœur égal à 7 cellules, b) pour un cœur égal à 19 cellules c) pour un cœur égal à 37 cellules.



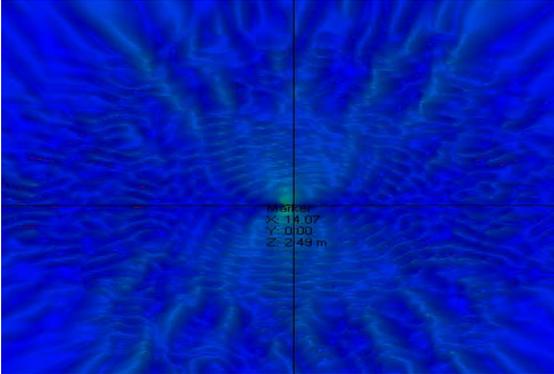
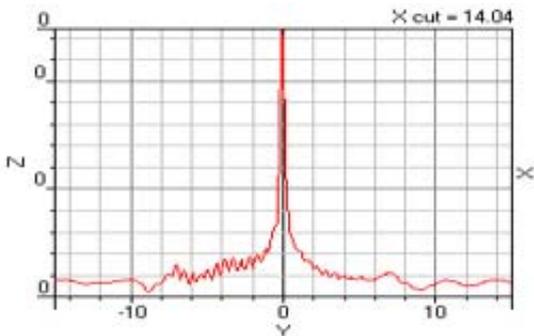
F

Figure III-12 :

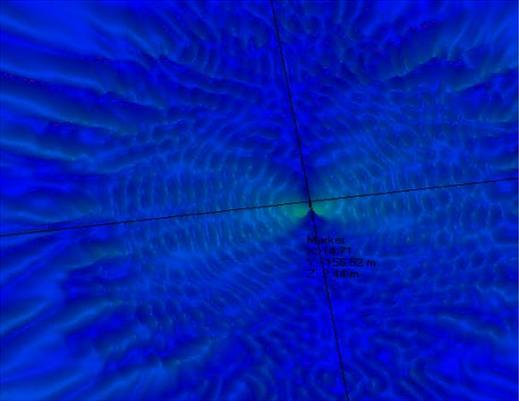
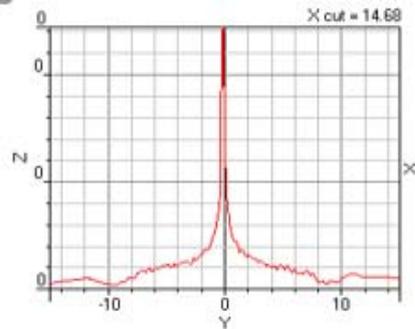
Représente la distribution du champ magnétique H_x par agrandissement du cœur D) pour un cœur égal à 7 cellules, E) pour un cœur égal à 19 cellules, F) pour un cœur égal à 37 cellules.



G



H



I

Figure III-13 :

Représente la distribution du champ magnétique H_z par agrandissement du cœur. G) pour un cœur égal à 7 cellules, H) pour un cœur égal à 19 cellules, I) pour un cœur égal à 37 cellules.

En modifiant la disposition des trous ou la forme du cœur de la fibre à travers la création de défauts ponctuels en éliminant des trous d'air (cellules entourant le cœur : 7 cellules, 18 cellules, 37 cellules) (voir Figure III-6), la forme du mode, la non-linéarité, la dispersion et la biréfringence peuvent être modifiées.

Ainsi, la possibilité de varier la taille et la position des trous d'air permettent d'obtenir des profils d'indice beaucoup plus variés. Ce qui permet d'obtenir des fibres aux caractéristiques optiques très particulières.

Ce type fibre est utilisés essentiellement pour les applications comme : Capteurs par l'intégration d'autres défauts de matériaux d'indice différents et la création de cavités, sources lasers par la création de cavité résonantes...etc.

En plus la diminution du diamètre de cœur permet d'obtenir une fibre à grande ouverture numérique [4] :

$$NA = \sqrt{n_{core}^2 - n_{eff}^2}$$

n_{core} indice de réfraction du cœur, n_{eff} : indice de réfraction effectif de la gaine.

Ainsi, que la fibre peut supporter une densité de puissance importante dans le cœur. On remarque que le confinement du champ dépend non seulement de la taille des trous d'air mais en plus du nombre d'anneaux de trous d'air entourant le cœur et son diamètre (voir Figures III-11) (A, B, C).

Ainsi l'augmentation du nombre d'anneaux de trous d'air dans la gaine permet d'obtenir la valeur la plus basse de la perte de confinement cette atténuation causée par la géométrie du la fibre optiques PCF est appelée perte de confinement elle est définie en fonction de l'indice de réfraction effectif, qui peut être évaluée par la partie imaginaire de l'indice de réfraction effectif obtenu par la méthode FDFD, c'est-à-dire en termes de dB/m, est défini comme suit [5] :

$$\alpha_L = \frac{20}{\ln(10)} \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}(n_{eff}) \cdot 10^9$$

On constate à partir de la représentation de la distribution du champ électrique sur les figures (III.11-12-13) que suite à l'augmentation de la valeur du diamètre du cœur le caractère monomode de la fibre sera perdu pour la longueur d'onde d'utilisation, en plus un cœur de très petite dimension permet d'abaisser le seuil d'apparition des effets non linéaires.

En plus lorsque le nombre de trous d'air dans la gaine du PCF augmente (7 cells, 19 cells , 37 cells) , l'indice de réfraction l'indice de réfraction effectif de la gaine diminue, ce qui fait que la différence d'indice relative entre le cœur et la gaine augmente. Par conséquent plus d'énergie lumineuse se concentre dans la région noyau, ce qui entraîne une diminution de perte de confinement (voir Figure III-11-12-13), le guidage des modes mode dans le PCF est effectué par réflexion interne totale interne totale plutôt que par un phénomène de bande interdite photonique.

Lorsque la surface du cœur augmente (9 cellules, 37 cellules) (voir figures 12), la distribution du champ s'étend davantage dans la silice et le champ est confiné dans le cœur. Alors Il n'y a pas de chevauchement avec le trou d'air de la gaine.

Référence

- [1] https://optiwave.com/wp-content/uploads/2014/09/OptiFDTD_Getting_Started.pdf.
- [2] **Jyoti1 & Vinita**, *Design and analysis of PCF of Silica and Gallium Phosphide using OPTIFDTD*, *Imperial Journal of Interdisciplinary Research (IJIR) Vol-2, Issue-11, 2016 ISSN: 2454-1362*.
- [3] **T. A. Birks, J. C. Knight, and P. S. J. Russell**, “*Endlessly single-mode photonic crystal fiber*,” *Opt. Lett.*, vol. 22, no. 13, pp. 961–963, Jul. 1997.
- [4] **Robert,P.J. ;Couny,F.;Sebert,H.;Mangan,B.J.;Williams,D.;Farr,L;Mason,M;Tomlins on,A;Birks,T.A.;Knight J.C, Russell,P,S,J**. *Ultimale low loss of hollow-cor pjotonic crystal fibers.opt Express 2005,13,236-244*.
- [5] **W.Y. Crutchfield., H. Cheng, and L. Greengard**, *Sensitivity analysis of photonic crystal fiber*,” *Opt. Express*, vol. 12, pp.4220- 4226, 2004.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Ce travail est consacré à la simulation et la modélisation de la propagation d'une onde électromagnétique dans une fibre à cristaux photoniques bidimensionnelles de structure hexagonale, en appliquant un outil numérique couramment utilisée c'est la méthodes (FDTD), cette technique a été utilisée pour étudier l'influence des paramètres et propriétés d'une fibre PCF, à savoir :

- L'influence de choix du matériau sur la propagation de l'onde électromagnétique dans la fibre à cristaux photonique PCF.
- L'influence de la variation du diamètre sur les propriétés de la fibre PCF.
- Etude de la propagation d'une onde EM dans une fibre à cristaux photoniques par la création d'une cavité par création de défauts par élimination des cellules :7 cells,19 cells,37 cells.

Nous nous sommes intéresser plus particulièrement aux fibres optiques à cristaux photoniques à cœur plein dont nous avons constaté que :

La modification du diamètre des trous d'air ou le pitch (pas du réseau), peut également avoir une relation importante l'apparition d'effet non linéaires très significatifs (dispersion, génération des super continuum, génération de seconds harmoniques).

En pratique, l'introduction de défauts ponctuels (cavité et microcavité) permettent de faire des micro-résonateurs.

En réduisant (augmentant) le diamètre de cœur on fait diminuer (augmenter) l'indice effectif du mode fondamental et donc se rapprocher (s'éloigner) de l'indice de réfraction de la gaine optique.

Ainsi, Les paramètres de la géométrie de la fibre PCF sont le diamètre des trous (d) et la distance entre deux trous adjacents, ainsi que le nombre de couronnes de trous se sont des paramètres critiques pour la qualité du guidage optique (fibres monomodes ou non, avec plus ou moins de pertes).

Ce genre d'études sont très utiles pour choisir la plage de fréquence voulue et les paramètres caractérisant la fibre (choix du matériau, propriétés optogéométriques) . pour une bonne exploitation à savoir: télécommunication, micro-ondes, multiplexage en longueur d'onde WDM (Wavelength Division Multiplexing) ,...etc.

CONCLUSION GENERALE

Perspectives : le travail entrepris dans le cadre de ce mémoire ouvre des perspectives qui méritent d'être développées, à savoir :

- ✚ Etude des fibres optiques à cristaux photoniques non-linéaires.
- ✚ Etude des capteurs en utilisant les fibres optiques à cristaux photoniques.
- ✚ Développement d'un code pour des résolution des équation FDTD.
- ✚ Etude des PCF à base de différents matériaux (classification en fonction de l'application).

Résumé :

Les cristaux photoniques sont des structures dont l'indice de réfraction de matériaux diélectrique vari périodiquement selon une ou plusieurs directions de l'espace. Cette variation périodique suivant les trois directions produit sur la lumière qui se propage dans les cristaux photoniques, une bande photonique (BIP) correspond à un intervalle d'énergie où la propagation de la lumière est interdite dans certaines directions de ce cristal. Cet effet est analogue à celui de potentiel périodique sur les électrons dans un cristal.

Les équations de Maxwell sont proposées pour décrire la propagation d'une onde électromagnétique dans une cristal photonique de structure hexagonal bidimensionnelle, cette description est calculée par les méthodes des différences finies dans le domaine temporel (FDTD). Une simulation numérique en utilisant cette méthode, nous a permis d'étudier l'influence de la variation de quelques propriétés et caractéristiques des cristaux photoniques sur la propagation d'une onde électromagnétique dans une fibre à cristaux photonique.

Mot clés

Cristaux photoniques- Bande interdite photoniques (BIP)-FDTD-fibre à cristaux photoniques (PCF)-OptiFDTD.

Abstract

Photonic crystals are structures in which the refractive index of the dielectric material varies periodically along one or more directions in space. This periodic variation along the three directions produces a photonic band (BIP) on the light propagating in photonic crystals, corresponding to an energy interval where the propagation of light is forbidden in certain directions of this crystal. This effect is analogue to the effect of periodic potential on electrons in a crystal.

Maxwell's equations are proposed to describe the propagation of an electromagnetic wave in a photonic crystal with a two-dimensional hexagonal structure, and this description is calculated by finite-difference time-domain methods (FDTD). A numerical simulation using this method allowed us to study the influence of the variation of some properties and characteristics of photonic crystals on the propagation of an electromagnetic wave in a photonic crystal fiber.

Keyword

Photonic crystals -FDTD-BPG- photonic crystal fiber - OptiFDTD

الملخص

البلورات الضوئية هي مركبات (بنيات) تتميز بترتيب دوري لمعامل الانكسار لمواد عازلة في اتجاه واحد او عدة اتجاهات. هذا التغيير الدوري يؤدي الى ظهور ما يسمى فجوة الحزمة الضوئية التي تمنع انتشار الضوء في بعض اتجاهات البلور. هذه الظاهرة تتم بطريقة مماثلة لما يحصل للإلكترونات في البلورات تحت تأثير كمون دوري.

حيث يقترح النموذج النظري "معادلات ماكسويل" لوصف انتشار الموجات الكهرومغناطيسية في البلورة الضوئية ذات بنية سداسية. الوصف يدرس بطريقة الفرق المحدود في المجال الزمني، اعتمادا على المحاكاة باستعمال هذه الطريقة تمكنا من دراسة تأثير تغيير بعض خصائص ومميزات البلورات الضوئية على انتشار الموجات الكهرومغناطيسية في الالياف ذات البلورات الضوئية.

الكلمات المفتاحية

البلورات الضوئية- الفرق المحدود في المجال الزمني- فجوة الحزمة الضوئية -الياف ذات البلورة الضوئية