

# وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR- ANNABA UNIVERSITY  
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

Année : 2019

Faculté: Sciences de l'Ingéniorat  
Département: Electronique

## MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de : MASTER

**Intitulé :**  
**Etude et modélisation d'un Bio-capteur à base de cristaux photoniques**

**Domaine : Sciences et Technologie**

**Filière : Electronique**

**Spécialité: Instrumentation**

**Par :**  
**Rafraf Asma**

**DEVANT Le JURY**

**Président : K.Saouchi**

**MCB**

**UBM Annaba**

**Directeur de mémoire: M. Brik Fatima**

**MCB**

**UBM Annaba**

**Examineurs: R.Kouachi**

**MCB**

**UBM Annaba**

**M.Taibi**

**Professeur**

**UBM Annaba**

## **Remerciement**

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

*En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur **M. Brik Fatima**, pour l'orientation, la confiance, la patience qui a constitué un mémoire considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être mené au bon port. Qu'il trouve dans ce travail un hommage vivant à sa haute personnalité.*

*Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail Et de l'enrichir par leurs propositions. Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

# *Dédicaces*

*A celle qui m'a enseigné l'ambition...ma mère.*

*A l'a personne devant laquelle tous les mots de l'univers sont incapables d'exprimer mon amour et mon affection pour elle, à l'être qui m'est le plus cher, à ma douce mère. Mère, si tu savais combien je t'aime.*

*A mon cher père qui a payé d'amour et de sacrifices le prix de ma façon de penser. Père, je te remercie d'avoir fait de moi une femme.*

*A mes chers frères.*

*A toute la famille.*

*A mes amis Manel, Hayette et Hafsa à qui je souhaite bonheur et réussite.*

*A tous ceux qui, de loin ou de près, ont contribué à la réalisation de ce modeste travail.*

## **Résumé :**

L'objectif de ce travail est l'étude et la simulation d'un biocapteur à base de cristal photonique. Ces dernières années, les cristaux photoniques ont prouvé leur utilisation en tant qu'éléments de détection.

A cet effet, nous avons entrepris la simulation d'une structure périodique bidimensionnelle de tiges d'air dans un diélectrique de fort indice, grâce au module intégré Fullwave du logiciel Rsoft, basé sur la méthode FDTD (Finite Difference Time Domain analysis).

## **Mots clés :**

Cristal photonique, BIP (Bande Interdite Photonique), Fullwave, défaut.

## **Abstract :**

The objective of this work is the study and simulation of a biosensor based on photonic crystal. In recent years, photonic crystals have proved their use as detection elements.

To this end, we have undertaken the simulation of a two-dimensional periodic structure of air rods in a high-index dielectric, thanks to the integrated Fullwave module of the Rsoft software, based on the FDTD (Finite Difference Time Domain Analysis) method.

## **Keywords:**

Photonic Crystal, BIP (Photonic Forbidden Band), Fullwave, defect.

## **الملخص**

الهدف من هذا العمل هو دراسة ومحاكاة جهاز استشعار حيوي قائم على البلورة الضوئية. في السنوات الأخيرة ، استخدمت البلورات الضوئية للكشف عنها.

تحقيقاً لهذه الغاية، قمنا بإجراء محاكاة لهيكل دوري ثنائي الأبعاد لقضبان الهواء في عازل عالي الفهرسة، وذلك بفضل (FDTD) ، استناداً إلى طريقة تحليل الفرق الزمنية المحددة RSOFT المتكاملة لبرنامج FULLWAVE وحدة

كلمات البحث

، عيب ، FULLWAVE ، (BIP) الفوتون الكريستال ، الفوتون ممنوع الفرقة



# Liste des figures

## Chapitre 1 : Notions de base sur les cristaux photoniques et les Biocapteurs

<b>Figure (1.1) :</b> Schéma représentative des cristaux photoniques 1D (a), 2D (b) et 3D (c) .....	3
<b>Figure (1.2):</b> Structure périodique unidimensionnelle (Réseau de Bragg).....	4
<b>Figure (1.3) :</b> Structure périodique 2D connectée .....	4
<b>Figure (1.4):</b> Structure périodique 2D déconnectée .....	5
<b>Figure (1.5):</b> Structure des cristaux photoniques tridimensionnels .....	5
<b>Figure (1.6) :</b> Analogies du diagramme de bande électronique et du diagramme de dispersion d'un cristal photonique .....	8
<b>Figure (1.7) :</b> Exemple d'un diagramme de bandes interdites(BIP) d'une structure 2D (a), Les deux types de polarisation TM et TE (b) .....	9
<b>Figure (1.8) :</b> Exemple de défaut lacunaire (a) ; défauts de substitutions (b) et (c).....	10
<b>Figure (1.9):</b> Exemple de guide W1 à cristal photoniques hexagonal de torus d'air sur un substrat de silicium sur isolant .....	11
<b>Figure (1.10) :</b> Exemples des défauts dans les différents types de cavités.....	11
<b>Figure (1.11) :</b> Schéma représentative d'un biocapteur .....	12

## Chapitre 2 : Application des cristaux photoniques dans la détection et méthodes de simulations utilisées

<b>Figure (2.1) :</b> Structure du bio capteur de glucose .....	15
<b>Figure (2.2):</b> Résultat de la courbe de réponse du capteur en fonction de la concentration de glucose dans l'urine .....	16
<b>Figure (2.3) :</b> Structure d'un biocapteur à base de cristal photonique 2D a) Vu au microscope électronique d'un cristal photonique sur SOI b) Spectre de transmission pour quatre concentrations de protéine différente (ce qui induit un indice différent).....	17
<b>Figure (2.4) :</b> Représentation de la cellule de Yee .....	19
<b>Figure (2.5) :</b> Exemple du modèle PML utilisé pour la simulation des cristaux photoniques.	20
<b>Figure (2.6) :</b> Interface graphique du logiciel Rsoft .....	20
<b>Figure (2.7) :</b> Fenêtre du module BandSOLVE .....	21
<b>Figure (2.8) :</b> Fenêtre du simulateur FullWAVE .....	22

### **Chapitre3 : Présentation de la structure du biocapteur à base de cristal photonique**

<b>Figure (3.1) :</b> Boite de dialogue pour la création de la structure 2D (CPs).....	<b>25</b>
<b>Figure (3.2) :</b> Structure du cristal photonique formé par un réseau Hexagonal 12×12 .....	<b>25</b>
<b>Figure (3.3) :</b> Paramètres de la structure de base dans l'éditeur des symboles. ....	<b>26</b>
<b>Figure (3.4) :</b> Profil d'indice de la structure de base.....	<b>27</b>
<b>Figure (3.5) :</b> Zone de Brillouin pour le réseau Hexagonal.....	<b>27</b>
<b>Figure (3.6) :</b> Diagramme de bandes interdites photoniques du réseau Hexagonal obtenu ....	<b>28</b>
<b>Figure (3.7) :</b> Structure 2D avec un défaut de ligne (guide d'onde).....	<b>30</b>
<b>Figure (3.8) :</b> Boite de dialogue pour le moniteur.....	<b>31</b>
<b>Figure (3.9) :</b> Boite de dialogue pour l'excitation.....	<b>31</b>
<b>Figure (3.10) :</b> Visualisation de la propagation de la longueur d'onde 1.6µm dans le guide introduit	<b>32</b>
<b>Figure (3.11) :</b> Structure du cristal photonique avec (guide d'onde et cavité) .....	<b>33</b>
<b>Figure (3.12) :</b> Spectre de transmission obtenu pour la cavité conçu. ....	<b>34</b>
<b>Figure (3.13) :</b> Spectres de transmission obtenus pour deux indices de réfraction différents	<b>35</b>
<b>Figure (3.14) :</b> Spectres de transmission obtenus pour deux valeurs de l'indice (1.33 et1.35) .....	<b>35</b>

## Liste des symboles et abréviations

$\Delta n$  : le contraste d'indice

$\epsilon$  : permittivité

$a$  : La période

$f$  : Le facteur de remplissage

$E$  : le champ électrique

$H$  : le champ magnétique

TM : transverse électrique, la polarisation magnétique

TE : transverse magnétique, la polarisation électrique

PhCs : Les cristaux photoniques

CP : cristal photonique

BIP : bandes interdites photoniques

PBG : Photonic Band Gap

$S$  : Sensibilité

RI : indice de réfraction

CW : une excitation de type continue

$n$  : L'indice de réfraction du matériau

$\lambda$  : la longueur d'onde guidée

$\Gamma K$  : la direction du réseau réciproque correspond à la direction des premiers voisins du réseau réel.

RIU : unité de l'indice de réfraction.

$Q$  : facteur de qualité.

## Introduction générale

Introduction générale .....	1
-----------------------------	---

## Chapitre 1 :

### Notions de base sur les Cristaux Photoniques et les Biocapteurs

1.1 Introduction.....	2
1.2 Les cristaux photoniques .....	2
1.2.1 Définition d'un cristal photonique.....	2
1.2.2 Classifications des cristaux photoniques.....	3
2.1.1.1) Cristaux photoniques 1D (Unidimensionnels) : .....	3
2.1.1.2) Cristaux photoniques 2D .....	4
a) La structure connectée.....	4
b) La structure déconnectée.....	5
2.1.1.3) Cristaux photoniques 3D .....	5
1.2.3 Différentes mailles de cristaux photoniques bidimensionnels .....	6
1.2.4 Principales caractéristiques des Cristaux photoniques.....	7
1.2.4.a) Le contraste d'indice.....	7
1.2.4.b) La période.....	7
1.2.4.c) Le facteur de remplissage.....	7
1.2.5 Analogie entre l'électron et le photon.....	8
1.2.6 Notion de bande interdite photonique .....	9
1.2.7 Défauts introduits dans les cristaux photoniques .....	10
1.2.7.a) Exemple de défauts ponctuels.....	10
1.2.7.b) Exemple de des défauts étendus.....	11

1.3 Les Biocapteurs .....	12
1.3.1 Définition d'un biocapteur .....	12
1.3.2 Principe de fonctionnement d'un biocapteur .....	12
1.3.3 Classifications des biocapteurs .....	12
1.3.3.a) Biocapteurs calorimétriques.....	12
1.3.3.b) Biocapteurs optiques.....	13
1.3.3. c) Biocapteurs acoustiques.....	13
1.3.3.d) Biocapteurs électrochimiques.....	13
1.3.4 Principales caractéristiques des biocapteurs.....	13
1.3.4.a) La sensibilité.....	13
1.3.4.b) Reproductibilité.....	14
1.3.4.c) Exactitude.....	14
1.3.4.d) Limite de détection.....	14
1.4. Conclusion.....	14

## Chapitre 2 :

### **Application des cristaux photoniques dans la détection et méthodes de simulations utilisées**

2. 1 Introduction.....	15
2.2 Structures de biocapteurs à cristal photonique pour la détection.....	15
2. 2.1. Capteur de glucose.....	15
2. 2.2. Capteur de protéine à CPs basés RI (réfractive index).....	17
2. 3.Méthodes de simulations .....	18
2. 3.1. La méthode des ondes planes (PWE) .....	18
2. 3.2. La méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD).....	18
2. 4.Présentation de l'interface graphique du logiciel Rsoft.....	20

2. 4.1 Le simulateur BandSolve.....	21
2. 4.2 Le simulateur FullWave .....	22
2. 5.Conclusion.....	23

### Chapitre 3 :

#### *Présentation de la structure du biocapteur à base de cristal photonique*

3.1 Introduction.....	24
3.2. Présentation de la structure du biocapteur conçu.....	24
3.2.1 Structure de base.....	24
3.2.2 Structure avec défaut .....	24
3.2.3 Définition des paramètres.....	26
3.2.4 Résultats de simulation obtenus par le Band Solve.....	26
a) Profil d'indice.....	26
b) Zone de Brillouin.....	27
c) Diagramme des bandes interdites photoniques.....	28
Présentation de la structure avec défaut.....	29
3.3.1 Un défaut de ligne.....	29
a) Résultats de simulation obtenus par le module Fullwave.....	32
3.3.2 Défaut de cavité.....	32
b) Résultat de simulation obtenu par le Fullwave.....	33

### Conclusion générale

Conclusion générale:.....	37
Bibliographie.....	38

## INTRODUCTION GENERALE

Récemment, une nouvelle classe de détecteurs biochimiques a été mise en évidence théoriquement ainsi qu'expérimentalement : il s'agit de biocapteurs [1-2] qui utilisent la lumière et ses variations en fonction de la nature de la matière à analyser.

En raison de leur micro-structuration périodique qui permet de confiner (ou piéger) les photons et déplacer les résonances optiques dues à la présence des molécules à détecter, de leur extrême miniaturisation, ainsi que de leur haute sensibilité, les cristaux photoniques constituent un axe prometteur en tant que biocapteurs optiques.

On appelle biocapteur le dispositif qui a pour rôle la détection des espèces ou molécules chimiques. Les biocapteurs optiques sont fondés sur l'absorption de la lumière et la détection des changements d'indice de réfraction qui l'accompagne. Le signal mesuré étant l'intensité de lumière, son spectre en longueur d'onde et sa polarisation.

Quoiqu'il existe différents types de biocapteurs optiques, le choix reste limité sur les cristaux photoniques actuels en raison de leurs grandes performances [3].

Notre travail porte sur l'étude et la simulation d'un biocapteur à base de cristal photonique. Le principe de détection consiste à détecter le décalage de fréquence de résonance, qui est provoqué par le changement de l'indice de réfraction (IR) des trous remplis de la matière à analyser.

Pour mener ce travail à bien, nous avons entrepris la simulation d'une structure bidimensionnelle de trous d'air percés dans une matrice de Silicium. La méthode d'expansion d'onde plane (PWE) et la méthode du domaine temporel de différence finie (FDTD) sont utilisées pour analyser et simuler les caractéristiques de la structure proposée.

Dans ce contexte, ce mémoire s'articule autour de trois chapitres :

**Le premier chapitre** expose sur des notions de bases sur les cristaux photoniques et les biocapteurs, leurs structures, leur principe de fonctionnement ainsi que leurs applications.

**Le deuxième chapitre** fait l'objet de quelques exemples d'utilisation des cristaux photoniques pour la détection, aussi une présentation des méthodes de simulations disponibles dans le logiciel de simulation utilisé.

**Le troisième chapitre** porte sur la présentation de la structure du biocapteur simulé avec l'interprétation des résultats correspondants obtenus.

Enfin, une conclusion générale sur l'ensemble du travail effectué est tirée.

## 1.1 Introduction

Ce chapitre a pour but de poser les bases générales et nécessaires, à la compréhension du fonctionnement des cristaux photoniques et des biocapteurs, à travers la présentation d'un ensemble de notions et de définitions. Nous énumérons les principales structures bidimensionnelles utilisées.

Ainsi, nous abordons le principe de fonctionnement des biocapteurs, nous présentons également leurs caractéristiques ainsi que leur classification.

## 1.2 Les cristaux photoniques

Les cristaux photoniques désignent des structures artificielles dont le constant diélectrique (indice de réfraction), varie périodiquement à l'échelle de la longueur d'onde.

Ces matériaux ont suscité un vif intérêt au sein de la communauté scientifique depuis leurs découvertes par E.Yablonovitch en 1987 [3-4].

La périodicité de l'indice de réfraction dans ces structures, perturbe la propriété des modes électromagnétiques, et fait apparaître des bandes interdites à la propagation des photons.

Ces structures ouvrent la voie à diverses applications : réalisation de micro- capteurs [5], de switch [6], coupleurs et filtres [7], des portes logiques [8] et des cellules photovoltaïques très récemment [9].

### 1.2.1 Définition d'un cristal photonique

Le terme cristal désigne un matériau dans lequel des motifs sont répétés de manière régulière.

Dans le cas de l'optique, par analogie avec les cristaux atomiques, on appelle cristal photonique, une structure dans laquelle les atomes ou molécules sont remplacés par un milieu macroscopique avec différentes constantes diélectriques. Le terme photonique est ajouté, car ce sont les photons et non les électrons qui se propagent à travers ce cristal.

Les cristaux photoniques sont donc des matériaux diélectriques ou métallo diélectriques dont l'indice de réfraction varie périodiquement à l'échelle de la longueur d'onde. Cette périodicité provoque une interdiction de la propagation des photons, dans une certaine gamme spectrale, que l'on nomme bande interdite photonique (BIP en français, PBG en anglais) [10].

### 1.2.2 Classifications des cristaux photoniques

Suivant le type de structuration, on distingue trois catégories des cristaux photoniques :

- Périodicité dans une seule direction : cristal photonique 1D ;
- Périodicité dans deux directions de l'espace : cristal photonique 2D ;
- Périodicité dans toutes les directions de l'espace : cristal photonique 3D.

La figure (1.1) représente la structure des cristaux photoniques dont le constant diélectrique ( $\epsilon$ ) varie d'une façon périodique dans une, deux ou trois directions de l'espace.

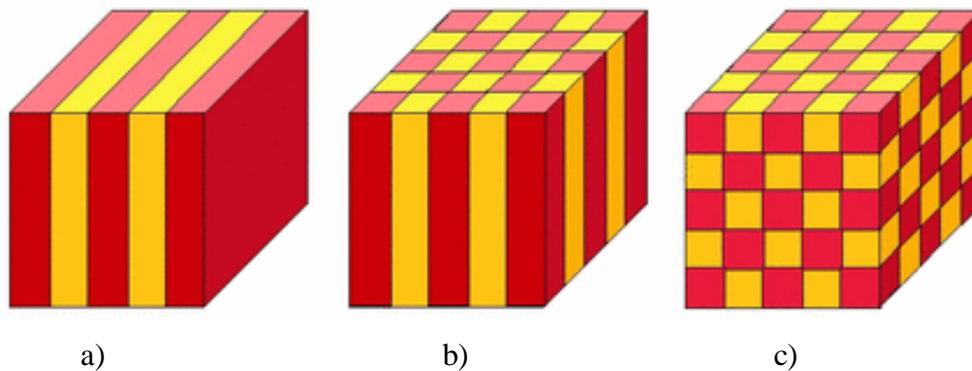


Figure (1.1) : Schéma représentatif des cristaux photoniques 1D (a), 2D (b) et 3D (c).

#### 1.2.2.1 Cristaux photoniques 1D (Unidimensionnels) :

Ces structures sont couramment connues sous le nom : Réseau de Bragg. Elles sont généralement réalisées par un empilement de couches d'indice de réfraction  $n_1$  et  $n_2$  respectivement, les couches ont une épaisseur optique égale à  $\lambda/4$ ,  $\lambda$  étant la longueur d'onde guidée autour de laquelle le matériau doit interdire la propagation des ondes électromagnétiques sous incidence normale. Figure (1.2).

Les réseaux de Bragg ont prouvé leur utilité dans de nombreuses applications : convertisseurs de modes pour fibres optiques, filtres sélectifs de longueur d'onde, multiplexeurs, lasers spéciaux à bande étroite [11].

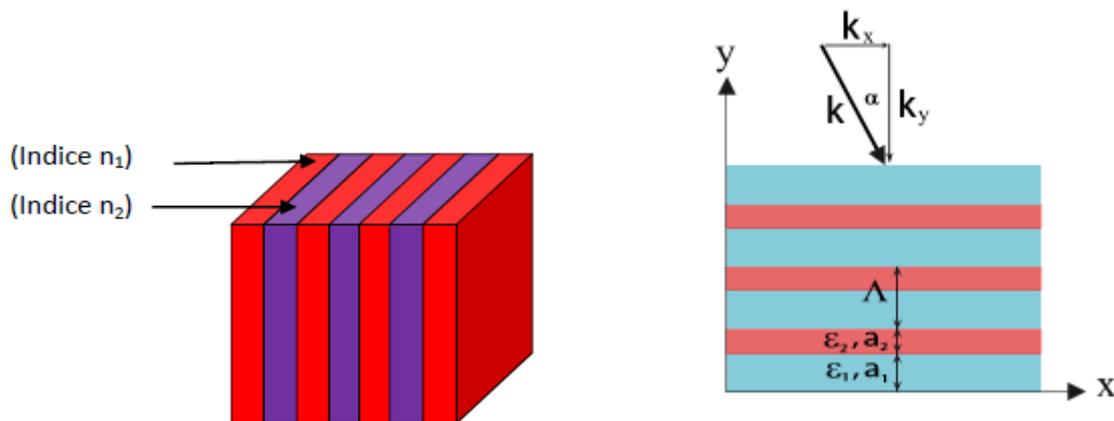


Figure (1.2): Structure périodique unidimensionnelle (Réseau de Bragg).

### 1.2.2.2) Cristaux photoniques 2D :

Les cristaux photoniques bidimensionnels sont des structures périodiques suivant deux directions de l'espace et infinies suivant la troisième, c'est-à-dire que, l'indice optique présente une modulation bidimensionnelle (suivant deux directions de l'espace  $(x,y)$ )

Les cristaux photoniques à deux dimensions sont classés en deux grandes catégories : les structures dites connectées et les structures dites déconnectées.

#### a) La structure connectée :

Les motifs élémentaires sont d'indice  $n_1$  inférieur à l'indice  $n_2$ . Ces structures sont généralement constituées d'un réseau périodique de trous d'air percés dans une matrice de Silicium. Figure (1.3).

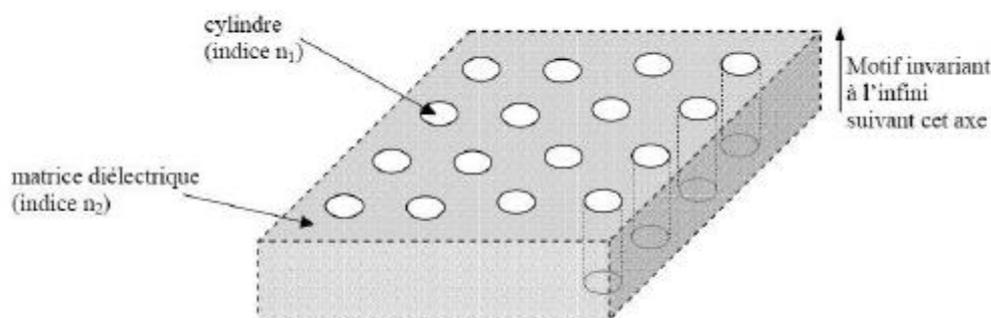


Figure (1.3) : Structure périodique 2D connectée

### b) La structure déconnectée :

Dans cette structure, les motifs élémentaires sont d'indice  $n_1$  supérieur à l'indice  $n_2$ , elle est constituée de tiges diélectriques ou métalliques alignées périodiquement dans l'air ou de la mousse.

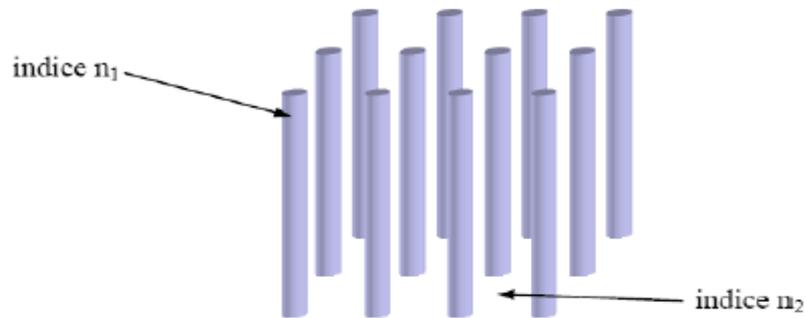


Figure (1.4): Structure périodique 2D déconnectée

### 1.2.2.3) Cristaux photoniques 3D :

Les configurations 3D les plus intéressantes sont basées sur la structure du Diamant [11].

Il en existe deux : la première dite: « hexagonale », elle résulte de deux angles d'observations différents du diamant, figure (1.5.a) et la deuxième dite : « en tas de bois », figure (1.5.b)

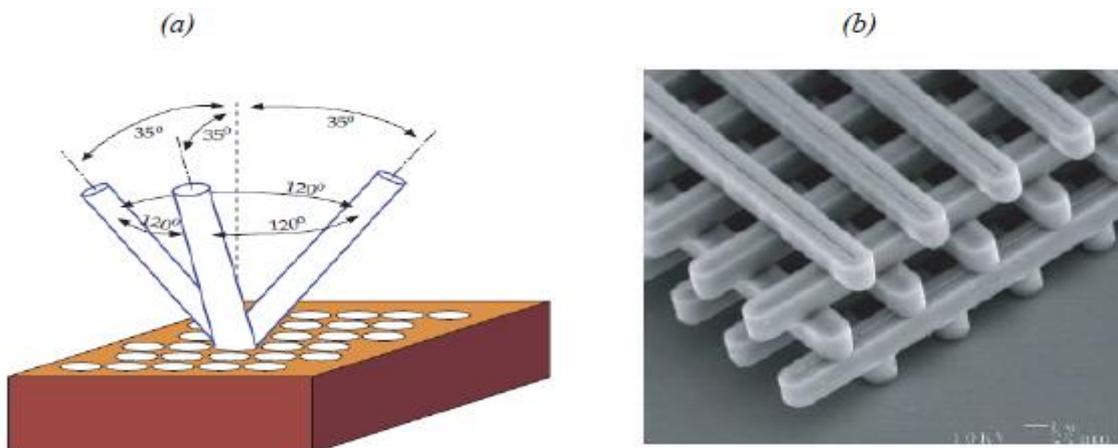


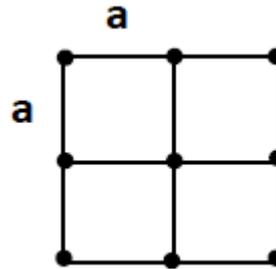
Figure (1.5): Structure des cristaux photoniques tridimensionnels.

### 1.2.3 Différentes mailles de cristaux photoniques bidimensionnels

D'une manière générale, les cristaux photoniques bidimensionnels sont structurés suivant les réseaux semblables aux réseaux cristallins. On distingue trois familles selon la forme du réseau: Le réseau carré, le réseau triangulaire et le réseau hexagonal.

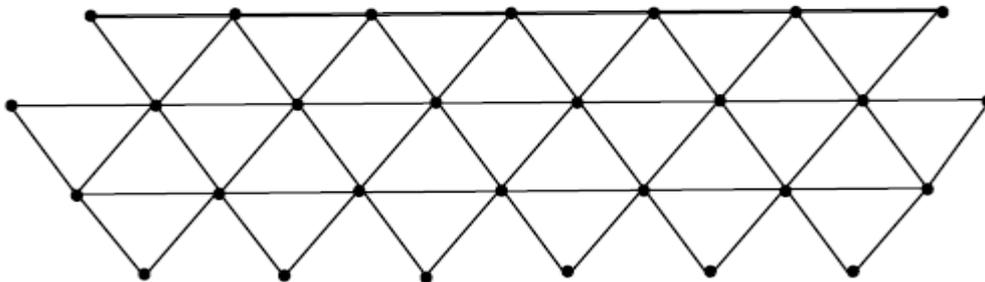
- **Réseau carré :**

Les nœuds du réseau sont situés sur un carré de côté « a », où a représente la période du réseau.



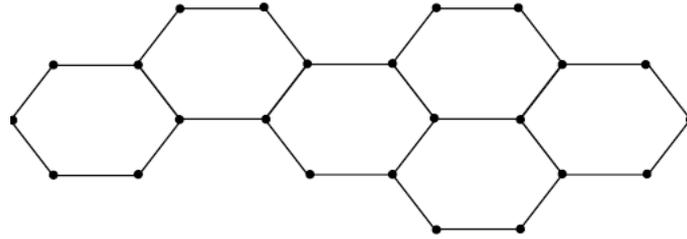
- **Réseau triangulaire :**

Les nœuds du réseau sont situés sur un triangle de côté « a », où a représente le pas du réseau.



- **Réseau hexagonal :**

À la différence du réseau triangulaire, il s'agit d'un réseau à deux atomes par maille. Les nœuds du réseau sont situés sur un hexagone de côté « a », où a est le pas du réseau.



### 1.2.4 Principales caractéristiques des Cristaux photoniques

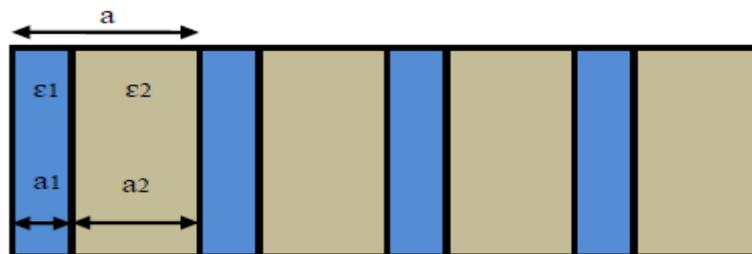
Un cristal photonique est caractérisé par les différents matériaux qui le composent, le système cristallin selon lequel ces matériaux sont organisés et les volumes relatifs qu'ils occupent dans la cellule élémentaire du cristal.

#### 1.2.4.a) Le contraste d'indice:

Le contraste d'indice ( $\Delta n$ ), est la différence entre les indices de réfraction des deux matériaux utilisés dans la conception du cristal à savoir  $n_1$  et  $n_2$ ,  $\Delta n = n_1 - n_2$ .

#### 1.2.4.b) La période:

La période ( $a$ ) est donnée par :  $a = (a_1 + a_2)$ , avec  $a_1$  épaisseur de la couche de permittivité  $\epsilon_1$  et  $a_2$  épaisseur de la couche de permittivité  $\epsilon_2$ , noter que l'indice de réfraction et la permittivité sont reliés par la relation :  $n = \sqrt{\epsilon}$



#### 1.2.4.c) Le facteur de remplissage :

Pour un cristal photonique bidimensionnel planaire composé de trous d'air percés dans une matrice diélectrique, le facteur de remplissage en air  $f$  désigne le rapport entre l'aire du motif et l'aire de la cellule élémentaire du réseau considéré [10].

### 1.2.5 Analogie entre l'électron et le photon

La principale caractéristique des cristaux est leur périodicité (le potentiel atomique), et quand un certain nombre d'atomes sont disposés ensemble d'une manière périodique, il ya apparition d'une structure de bandes d'énergie. Pour une certaine distance interatomique, cette bande est divisée en deux parties séparées par une zone où il n'existe pas de niveaux d'énergie (Bande interdite).

Un photon qui se propage dans un cristal photonique est l'équivalent d'un électron dans un semi-conducteur. Par analogie, on définit les bandes interdites photoniques comme la conséquence d'une structuration périodique du potentiel de photon à savoir l'indice de réfraction (permittivité diélectrique) [11].

La figure (1.6) montre cette analogie des bandes interdites dans un semi-conducteur et un cristal photonique.

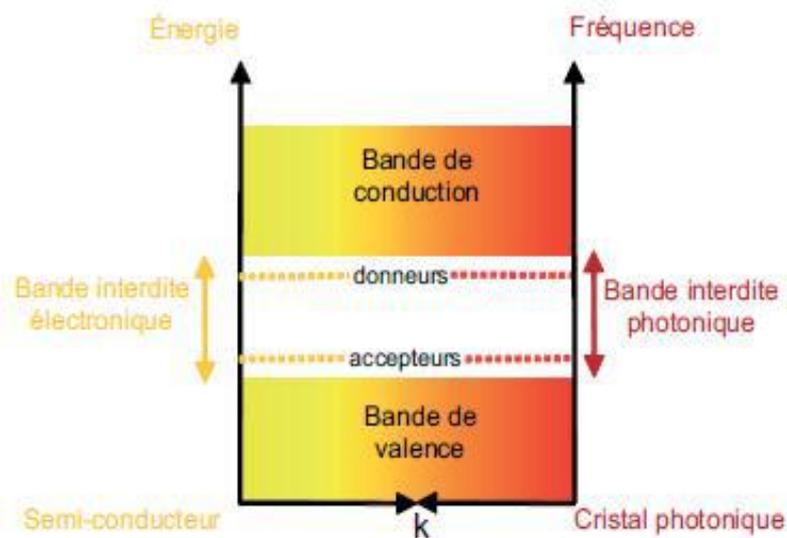


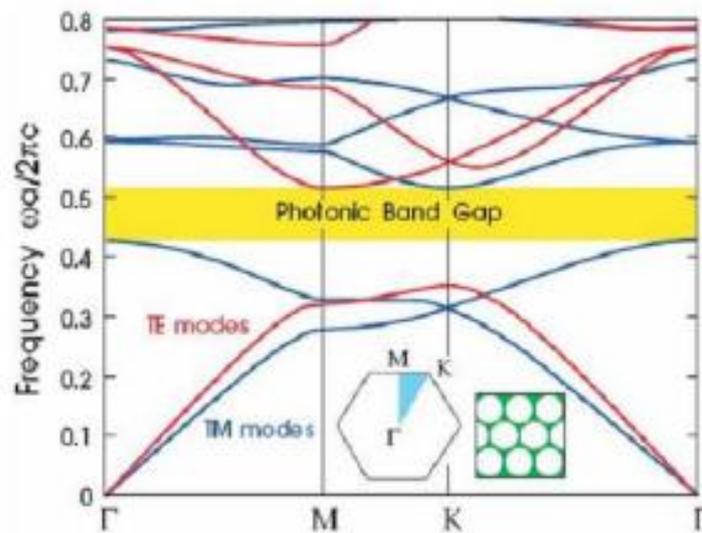
Figure (1.6) : Analogies du diagramme de bande électronique et du diagramme de dispersion d'un cristal photonique

**1.2.6 Notion de bande interdite photonique :**

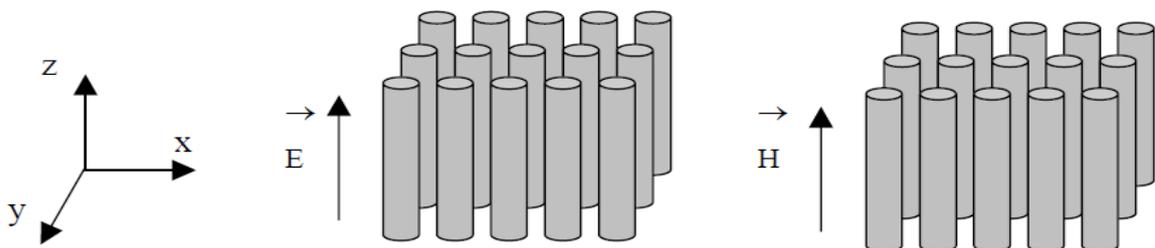
La description théorique d'un cristal photonique peut se faire à l'aide d'un diagramme de bandes donnant, pour chaque valeur du vecteur d'onde pris dans la zone de Brillouin du cristal, les fréquences correspondant aux modes électromagnétiques supportés par la structure [11].

Les bandes interdites d'un CP se regroupent dans un diagramme de bandes photoniques, qui est une représentation de la fréquence possible pour l'onde électromagnétique au sein du CP en fonction de son vecteur d'onde (sa direction de propagation au sein du cristal).

La figure (1.7) montre un digramme de bandes interdites d'un cristal photonique bidimensionnel. Noter qu'à deux dimensions, il existe deux directions (modes) de propagation différente : TE (avec le champ H perpendiculaire à l'axe des tiges) et TM (où E est parallèle à l'axe des tiges).



a)



b)

Figure (1.7) : Exemple d'un diagramme de bandes interdites(BIP) d'une structure 2D (a),

Les deux types de polarisation TM et TE (b).

Pour calculer les diagrammes de bandes il faut considérer pour chaque cristal, toutes les directions de propagation possibles. En physique du solide [4,10], on montre que pour certaines symétries du cristal, on peut limiter l'étude aux vecteurs d'ondes  $\vec{k}$  situés à l'intérieur d'une zone restreinte appelée zone de Brillouin irréductible. Le vecteur  $\vec{k}$  varie le long des directions de hautes symétries de cette zone qui fait partie du réseau réciproque.

### 1.2.7 Défauts introduits dans les cristaux photoniques

En introduisant des défauts dans la structure du cristal photonique, on interrompt la périodicité de celle-ci, la bande interdite photonique devient alors incomplète, ce qui permettra à certaines longueurs d'onde de passer à travers. Le contrôle de ces longueurs d'onde permet de concevoir plusieurs dispositifs photoniques à base de cristaux photoniques tel que les coupleurs, les modulateurs, filtres, capteurs. Il existe principalement deux types de défauts : les défauts ponctuels (cavités) et les défauts linéaires (guide d'ondes).

#### 1.2.7.a) Exemple de défauts ponctuels :

Les défauts ponctuels sont créés en modifiant les caractéristiques d'une cellule du réseau. Pour reprendre la terminologie de la physique du cristal, on peut réaliser alors des défauts lacunaires ou de substitution (Figure 1.8). Cela correspond à une microcavité à l'intérieur du cristal photonique.

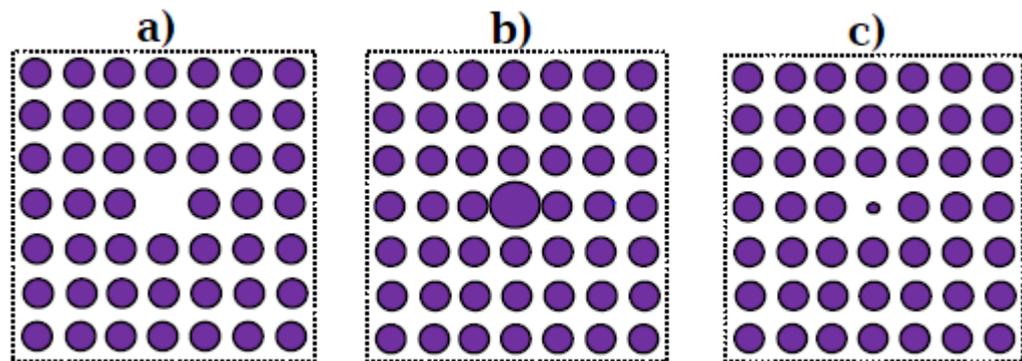


Figure (1.8) : Exemple de défaut lacunaire (a) ; défauts de substitutions (b) et (c).

**1.2.7.b) Exemple de des défauts étendus :**

Parmi les défauts étendus de dimension 1,2 ou 3, il existe les défauts 1D appelés couramment (W1). La figure (1.9) montre un défaut linéaire W1 dans un cristal photonique 2D réel.

Une façon de réaliser un tel guide consiste à omettre une ou plusieurs lignes de trous [11].

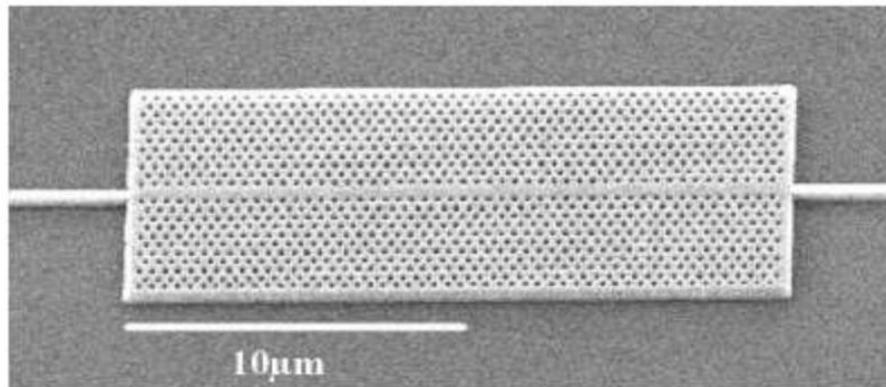


Figure (1.9): Exemple de guide W1 à cristal photonique hexagonal de trous d'air sur un substrat de silicium sur isolant [11].

En plus des défauts W1, il existe plusieurs types de cavités, elles dépendent de la forme de réseau (triangulaire, hexagonal ou carré), et du nombre de défauts (omission d'une ou plusieurs tiges). La figure (1.10) illustre ces types de défauts respectivement.

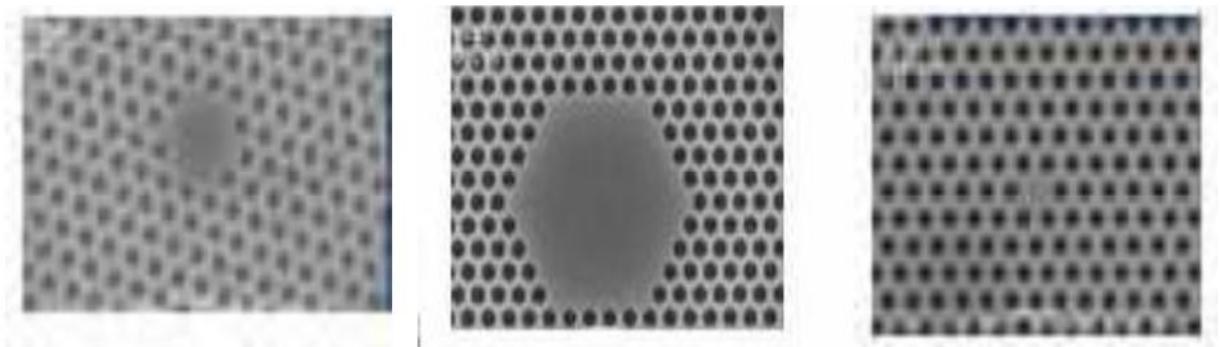


Figure (1.10) : Exemple des défauts dans les différents types de cavités. [11]

### 1.3 Les Biocapteurs

Les biocapteurs ont connu un développement considérable depuis leur apparition en 1960 jusqu'à nos jours. Ce progrès est dû à leurs nombreuses applications potentielles, que ce soit dans le domaine médical, ou l'agro-alimentaire ou même le contrôle de l'environnement. Ils sont remplacés les techniques classiques d'analyses disponibles en laboratoire [12].

#### 1.3.1 Définition d'un biocapteur

On appelle Biocapteur, le dispositif analytique qui transforme un phénomène biochimique en un signal mesurable. Il se compose d'un transducteur et d'un élément biologique (appelé : bio récepteur). La figure (1.11) illustre la structure d'un biocapteur.



Figure (1.11) : Schéma représentatif d'un biocapteur

#### 1.3.2 Principe de fonctionnement d'un biocapteur

Un biocapteur est l'association d'un élément biologique qui peut être une enzyme, anticorps, antigène, fragment d'ADN possédant une fonction de reconnaissance spécifique, et un élément transducteur, qui peut être une électrode, microbalance à quartz ou une fibre optique, qui assure le transfert de l'événement biologique « reconnaissance de l'élément analysé (l'analyte) » et la transforme en un signal exploitable (électrique ou lumineux).

#### 1.3.3 Classifications des biocapteurs

Selon le type du transducteur associé, les biocapteurs peuvent être classés en plusieurs catégories : biocapteurs calorimétriques, optiques, acoustiques et électrochimiques [12-14].

##### 1.3.3.a) Biocapteurs calorimétriques

Ce sont ceux qui mesurent la chaleur de la réaction biochimique entre l'élément de détection et l'élément analysé.

### **1.3.3.b) Biocapteurs optiques**

Ceux sont des dispositifs dans lesquels la fluorescence est utilisée dans la transduction du signal, particulièrement en employant des enzymes et des anticorps. Les sondes à fibres optiques se composent au moins de deux fibres. Une est branchée à une source lumineuse d'une gamme de longueur d'onde donnée et produit l'onde d'excitation. L'autre est liée à la photodiode qui détecte le changement de densité optique à la longueur d'onde choisie. Les transducteurs de résonance de plasmon mesurent l'altération dans l'indice de réfraction sur et près de la surface d'élément de détection.

### **1.3.3. c) Biocapteurs acoustiques**

Ce sont des dispositifs dans lesquels les ondes acoustiques mécaniques agissent en tant que système de transduction. La membrane contient les matériaux chimiquement interactifs en contact avec un matériau piézoélectrique. Les dispositifs varient selon le procédé de guidage d'onde utilisé.

### **1.3.3.d) Biocapteurs électrochimiques**

Selon le type de transducteurs on trouve les signes ampérométriques ou potentiométriques. Ces électrodes sont couramment faites de platine, or, argent, acier inoxydable, ou matériaux inertes basés sur le carbone.

Les transducteurs ampérométriques, trouvent les changements du courant qui se produisent en raison de l'oxydation ou de la réduction. Le courant reflète la réaction qui a lieu entre l'analyte et le bioélément.

Les transducteurs potentiométriques peuvent mesurer l'accumulation de charge (potentiel) d'une cellule électrochimique. Le transducteur se compose habituellement d'une électrode ion-sélectrice et d'une électrode de référence.

## **1.3.4 Principales caractéristiques des biocapteurs**

Ce sont les caractéristiques qui servent à évaluer un capteur et ses qualités analytiques. On peut citer :

### **1.3.4.a) La sensibilité**

Ce paramètre correspond au rapport entre l'accroissement de la réponse du capteur et la variation correspondante de la grandeur à mesurer.

**1.3.4.b) Reproductibilité**

C'est un paramètre très important. Elle indique la capacité du biocapteur à donner des réponses très voisines pour des mesures répétées de la même quantité de la grandeur à mesurer.

**1.3.4.c) Exactitude**

C'est l'accord entre le résultat de la mesure et la valeur vraie de la grandeur mesurée et l'écart est appelé erreur absolue.

**1.3.4.d) Limite de détection**

C'est la plus petite valeur de la grandeur à mesurer pouvant être détectée par le biocapteur d'une façon significativement différente du bruit de fond.

**1.4 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté d'une façon générale les différents types de cristaux photoniques utilisés, et on a décrit spécialement la structure bidimensionnelle, ainsi que les biocapteurs et leurs caractéristiques. Dans ce qui suit, on va présenter quelques structures de capteurs à base de cristaux photoniques.

## **2.1 Introduction**

Ce chapitre a pour objectif la mise en valeur du potentiel des cristaux photoniques dans la détection, à travers la présentation des travaux de recherches déjà étudiés.

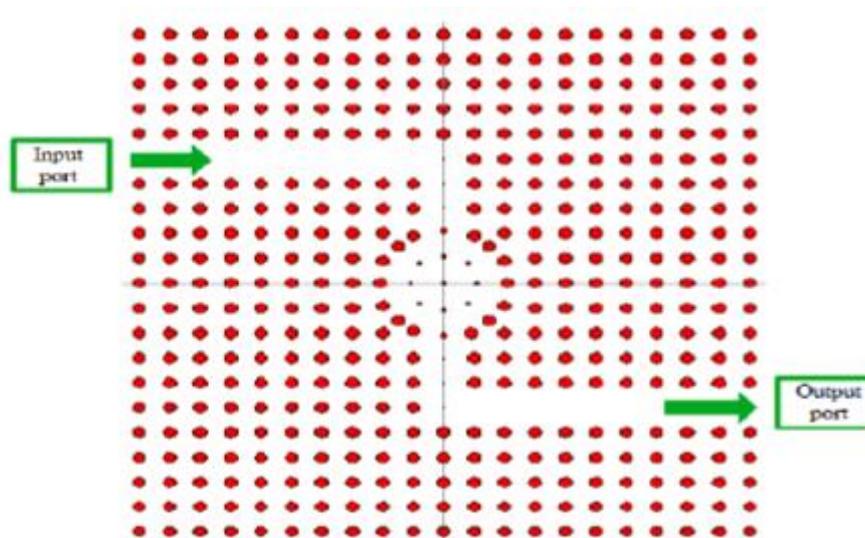
La première partie sera consacrée à la présentation des structures d'un capteur de glucose et de protéine. Dans la deuxième partie, nous décrivons les méthodes de simulation utilisés pour les cristaux photoniques sur lesquelles est basé le logiciel de simulation utilisé Rsoft Photonique CAD.

## **2.2 Structures de biocapteurs à cristal photonique pour la détection**

### **2.2.1 Capteur de glucose**

Le premier capteur à base de cristal photonique proposé pour détecter la concentration de glucose, d'albumine, de bilirubine dans l'urine et le sang, a été étudié par S.Robeinson [15]. Le bio capteur comprenait  $21 \times 21$  tiges montées en réseau carré. La distance entre les deux tiges les plus proches est de 540 nm (la période du réseau a), et le rayon de chaque tige était de 100 nm. Ces tiges étaient à base de silicium d'indice de réfraction 3,46.

La figure (2.1) présente la structure du biocapteur utilisé par S.Robinson [15].



*Figure (2.1) : Structure du bio capteur de glucose [15]*

La structure du biocapteur utilisé se compose de deux guides d'ondes "L" inversés et d'un résonateur en anneau. Les rayons de la tige inférieure et de la tige externe sont respectivement de

**Chapitre 2 Application des cristaux photoniques dans la détection et méthodes de simulations utilisées**

50 nm et 100 nm. Cependant, le rayon de la tige qui est positionné en haut et en bas du résonateur à anneau est de 86 nm afin d'obtenir une transmission de sortie plus élevée.

L'indice de réfraction varie avec la concentration de glucose présente dans l'urine. Cette variation induit le décalage des longueurs d'ondes des impulsions de sorties au niveau du moniteur. La réponse du capteur en fonction de la concentration de glucose trouvée par S.Robeinson [15] est présentée dans le tableau (2.1)

Concentration de glucose dans l'urine	indice de réfraction	longueur d'onde (nm)	Transmission Normalisée	facteur de qualité
Normal (0mg/dl-15mg/dl)	1.335±0.001	1585	1	264
0.625mg/dl	1.336±0.001	1585	0.96	269
1.25mg/dl	1.337±0.001	1585	0.92	260
2.5mg/dl	1.338±0.001	1585	0.85	252
5mg/dl	1.341±0.001	1585	0.55	217

Tableau (2.1) : Résultats obtenus pour le capteur de glucose [15]

Une augmentation de la concentration en glucose provoque une diminution de la transmission optique. Figure (2.2)

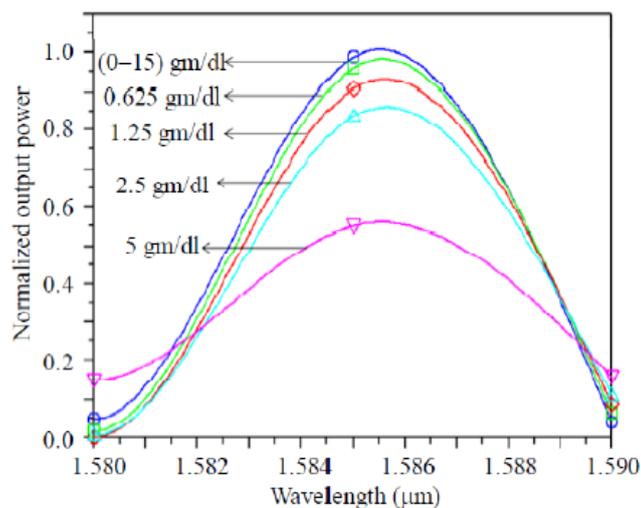


Figure (2.2): Résultat de la courbe de réponse du capteur en fonction de la concentration de glucose dans l'urine [15]

### 2.2.2 Capteur de protéine à CPs basés RI (réfractive index)

On présente un autre exemple d'utilisation des cristaux photoniques en tant que capteur, il s'agit d'un capteur pour mesurer l'indice de réfraction et détecter la concentration de protéine étudié par N.Skevisen [16].

La détection est effectuée par une monocouche sensible qui réagit avec la matière analysée. La zone de détection est composée d'une structure photonique fonctionnant avec une monocouche sensible. Cette monocouche réagit avec l'analyte qui induit une variation de l'indice de réfraction de la l'épaisseur de la couche sensible et de son absorption.

La figure (2.3) montre la structure d'un biocapteur 2D et les résultats de sa caractérisation [16].

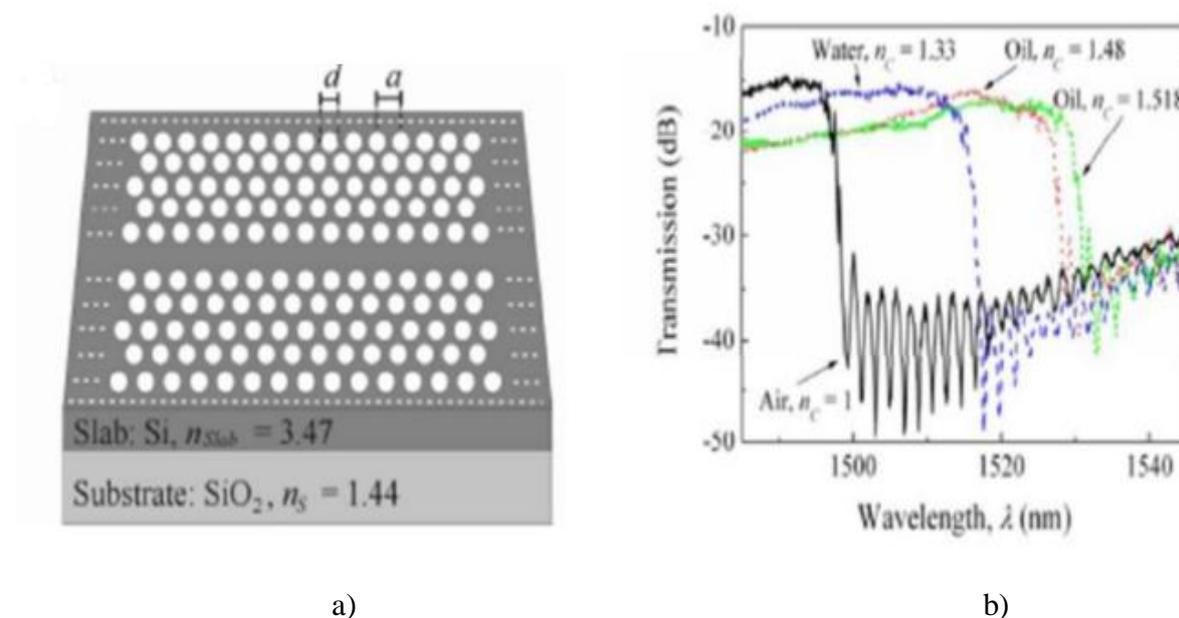


Figure (2.3) : Structure d'un biocapteur à base de cristal photonique 2D [16]

- Vu au microscope électronique d'un cristal photonique sur SOI
- Spectre de transmission pour quatre concentrations de protéine différente (ce qui induit un indice différent).

Des concentrations autour de 10  $\mu\text{g} / \text{ml}$  sont mesurées avec un excellent rapport signal-bruit, et une large plage de détection d'indice de réfraction dynamique s'étendant de l'air à des fluides visqueux élevés.

## **2.3 Méthodes de simulations**

La modélisation des cristaux photoniques passe par le calcul des diagrammes de dispersion, de la réflexion et de la transmission, qui sont régis par les équations de Maxwell. Les méthodes les plus citées dans la littérature pour l'étude des cristaux photoniques ainsi que celles utilisés dans nos simulations par le logiciel Rsoft sont : la méthode des ondes planes (PWE) et la méthode des différences finies temporelles (FDTD).

### **2.3.1 La méthode des ondes planes (PWE)**

La méthode des ondes planes (PWE : Plane Wave Expansion), est la méthode privilégiée pour le calcul des diagrammes de dispersion dans les CP [17]. Comme son nom l'indique, elle repose sur la décomposition en ondes planes du champ électrique ou magnétique.

Cette méthode est essentiellement utilisée pour analyser les propriétés dispersives des matériaux à bandes interdites photoniques et permet de déterminer la fréquence, la polarisation, la symétrie et la distribution du champ pour les modes d'une structure photonique. La technique PWE consiste à résoudre, dans l'espace fréquentiel, l'équation d'onde linéaire en développant le champ électromagnétique sur une base d'ondes planes.

Le logiciel de simulation Rsoft et spécialement son module intégré (BandSolve), que nous utiliserons pour notre simulation est basé sur la méthode (PWE).

### **2.3.2 La méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD)**

La méthode dite FDTD ( Finite Difference in the Time Domain), est la méthode la plus connue pour le calcul en électromagnétisme. C'est une méthode de résolution directe des équations de Maxwell dans le domaine temporel. Elle utilise l'outil numérique des différences finies. La méthode FDTD a été initialement proposée par Kane S. Yee en 1966, pour résoudre les problèmes impliquant les équations de Maxwell dans des milieux isotropes avec des conditions aux limites données [17].

Cette méthode permet à l'utilisateur de développer une compréhension plus intuitive des processus de propagation. Elle permet aussi d'obtenir de nombreuses informations sur la propagation de l'onde dans la structure.

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 [9,17].

Afin d'utiliser cette méthode, un domaine de calcul est défini et discrétisé avec un maillage spatial

## Chapitre 2 Application des cristaux photoniques dans la détection et méthodes de simulations utilisées

de pas ( $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$ ), l'espace temporel est quand à lui discrétisé avec un pas  $\Delta t$ .

D'un point de vu mathématique, la méthode FDTD est fondée sur l'algorithme de Yee [11], elle permet de calculer à chaque instant discret, les composantes du champs électromagnétique dans chaque cellule parallélépipédique du volume tridimensionnel, figure (2.4).

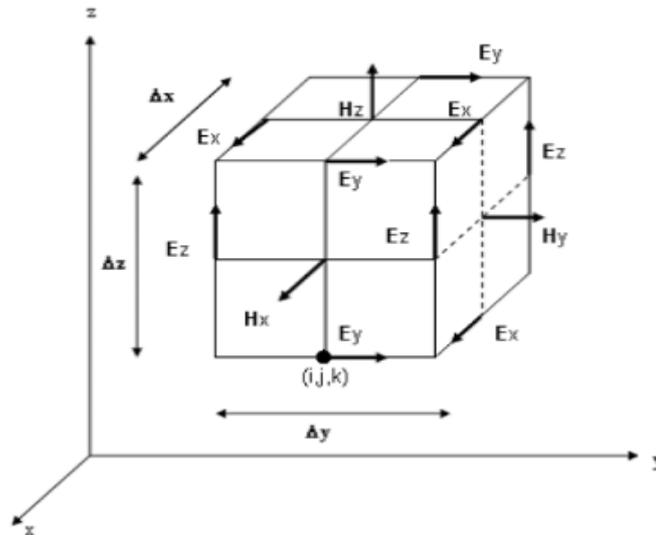


Figure (2.4) : Représentation de la cellule de Yee

Donc cette méthode nécessite un maillage délicat dans l'espace réel afin de discrétiser les champs et de pouvoir estimer leurs dérivées. Les champs se propagent dans le temps de proche en proche à partir d'une certaine distribution de départ donnée par l'utilisateur et pendant un certain temps  $t$ . On peut donc observer le régime transitoire du système et voir le régime permanent s'établir.

Les conditions aux limites constituent eux aussi un point très important dans cette méthode du fait du traitement presque exclusif de structures finies. Parmi les conditions aux limites, les plus utilisées et les plus adaptées aux cristaux photoniques, on trouve les conditions de Mur connues sous le nom : PML (Perfectly Matched Layer) [17]. En effet les PML sont basées sur l'existence d'un absorbant sur le bord de la cellule, conçu pour faire une adaptation d'impédance avec le vide et ainsi éliminer toute réflexion, figure (2.5).

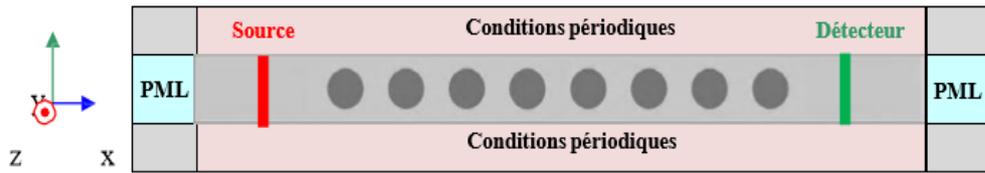


Figure (2.5) : Exemple du modèle PML utilisé pour la simulation des cristaux photoniques.

Le logiciel de simulation Rsoft et spécialement son module intégré (FullWave), que nous utiliserons pour notre simulation est basé sur la méthode (FDTD).

## 2.4 Présentation de l'interface graphique du logiciel Rsoft

Le logiciel Rsoft CAD permet la conception et la simulation des différents dispositifs optiques, tels que les coupleurs, les commutateurs, les multiplexeurs optiques ainsi que les cristaux photoniques [18]. Il intègre plusieurs modules comme : BeamPROP, Diffract Mod, Fullwave, Band Solve et Grating mod.

Les deux modules permettant la simulation des cristaux photoniques sont : le module FullWave et le module Band Solve.

La figure (2.6) montre la fenêtre de l'interface graphique pour logiciel Rsoft.

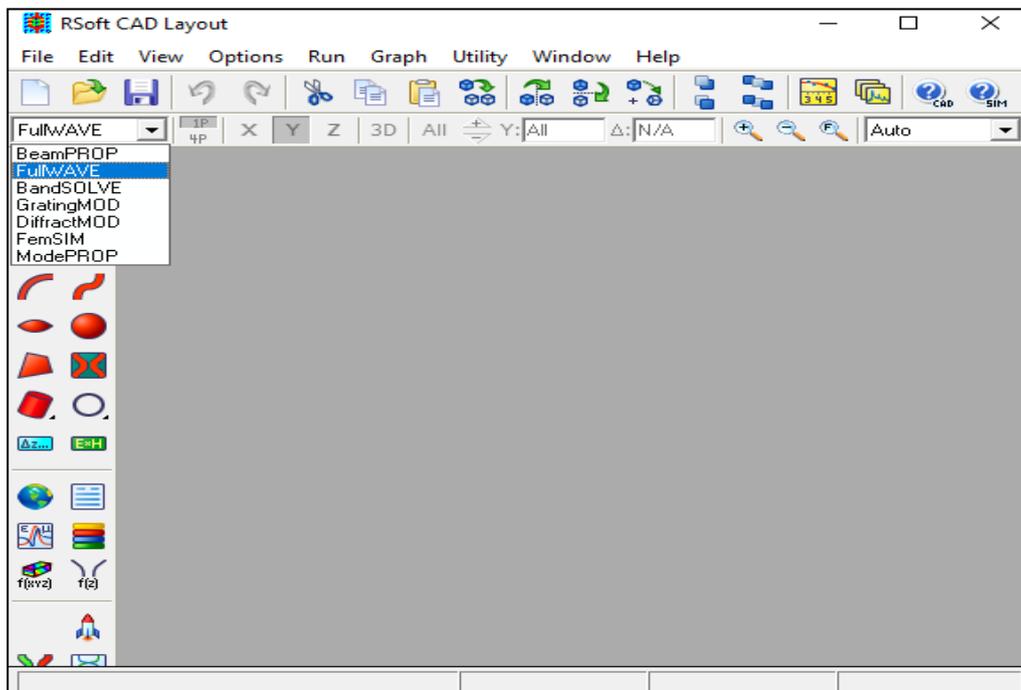


Figure (2.6) : Interface graphique du logiciel Rsoft

### 2.4.1 Le simulateur BandSolve

Band Solve est un module intégré avec le logiciel Rsoft, il permet de calculer le digramme des bandes (BIP) pour les cristaux photonique, il est base sur la méthode des ondes plane (PWE).

La figure (2.7) montre la fenêtre qui apparait lors de l'exécution du module BandSolve.

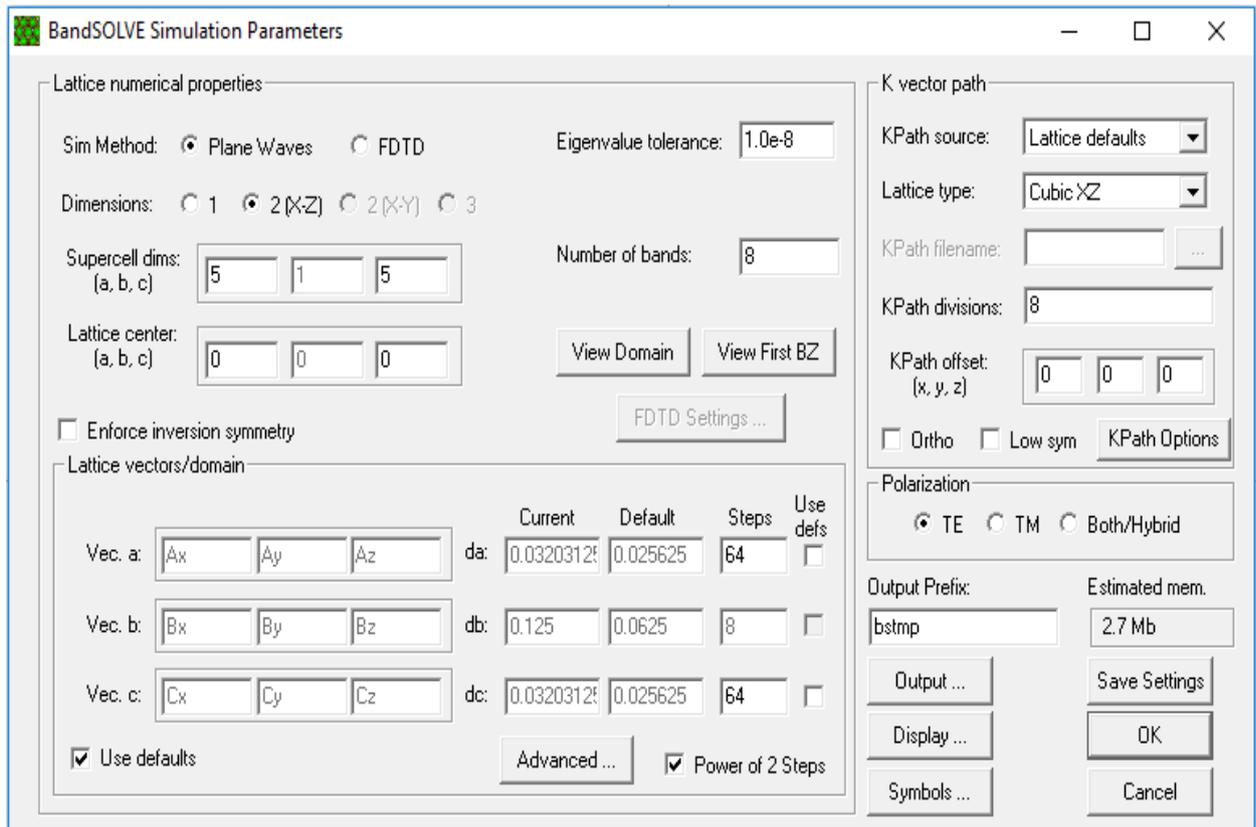


Figure (2.7) : Fenêtre du module BandSOLVE

Cette fenêtre permet l'affichage de la zone de Brillouin pour le type de réseau utilisé, elle permet aussi de voir les bandes interdites photoniques pour la structure du cristal photonique simulé avec les deux types de modes disponibles : TE ou TM.

### 2.4.2 Le simulateur FullWave

Ce module intégré avec le logiciel Rsoft est basé sur la méthode FDTD.

La figure (2.8) montre la fenêtre qui apparaît lors de l'exécution du module FullWave.

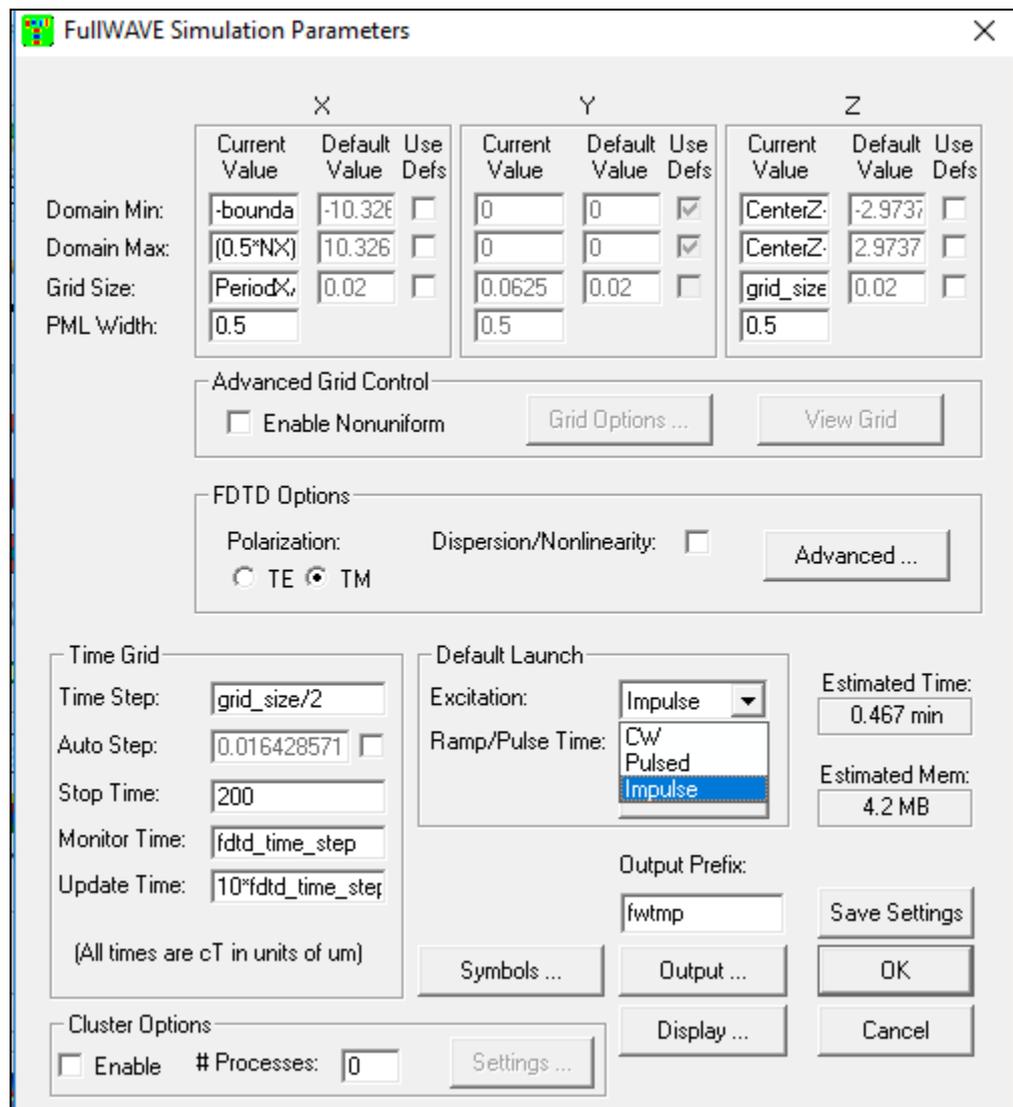


Figure (2.8) : Fenêtre du simulateur FullWAVE.

- Cette boîte de dialogue permet de rentrer les paramètres de base exigés pour une simulation FDTD, comme par exemple le pas du maillage (**Grid size**) et (**time step**) et

commande aussi bien d'autres aspects importants de la simulation comme les conditions aux limites (PML), cependant les valeurs par défaut peuvent être acceptées.

- **Modes d'affichage du simulateur Fullwave**

Pour effectuer la simulation, FullWave dispose de deux modes d'affichage : 'Pulsed' et 'CW' Excitation.

**a) CW (central wavelength) Excitation**

Cette option permet de calculer et déterminer la fréquence de résonance.

**b) Pulsed Excitation**

Cette option, permet de déterminer la réponse en longueur d'onde du résonateur optique.

## **2.5 Conclusion**

Dans le chapitre qui suit, nous allons présenter le design du biocapteur à base de cristal photonique 2D simulé via ces deux modules, et nous présentons les résultats des diagrammes de bandes photoniques ainsi que la réponse en transmission pour la structure étudiée.

### 3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons la structure du biocapteur conçu via le logiciel de simulation Rsoft.

Nous commençons d'abord par la présentation de la structure proposée, en décrivant les étapes à suivre pour la conception du biocapteur à base de cristal photonique 2D sous le logiciel Rsoft. Puis nous présentons les résultats de simulation obtenus.

### 3.2 Présentation de la structure de base.

Avant la conception du biocapteur, on commence d'abord l'étude de la structure de base, afin de déterminer le diagramme de bandes interdites photoniques. La structure d'étude est à base de cristaux bidimensionnels membranaires à réseau de trous d'air dans un diélectrique à fort indice, il s'agit d'un réseau à maille hexagonal.

#### 3.2.1 Description de la structure

La structure de base du biocapteur à cristal photonique que nous proposons possède les caractéristiques suivantes :

**Dimensions** : on a pris une matrice  $12 \times 12$  suivant les directions 'X' et 'Z' respectivement.

**Period** : la distance entre deux cellules (Pas ou constante de périodicité notée 'a') est de  $0.4\mu\text{m}$ .

**Radius** : les cellules ont un rayon  $R = a * 0.325\mu\text{m}$ .

**Nhole** =1 (indice de réfraction de l'air), **Nslab**=3.37 (Indice de réfraction du silicium)

**Background-index**=Nslab,( indice du substrat)

**Delta**= la différence d'indice ( $\Delta n = N_{\text{hole}} - N_{\text{slab}}$ ).

#### 3.2.2 Conception de la structure de base via le logiciel Rsoft

On commence la conception de la structure par la création du réseau complet de dimensions  $12 \times 12$  en cliquant sur **Utility-->Array Layout XZ...**

La figure (3.1) montre la fenêtre d'exécution (boîte de dialogue) qui apparaît et la figure (3.2) illustre le réseau complet.

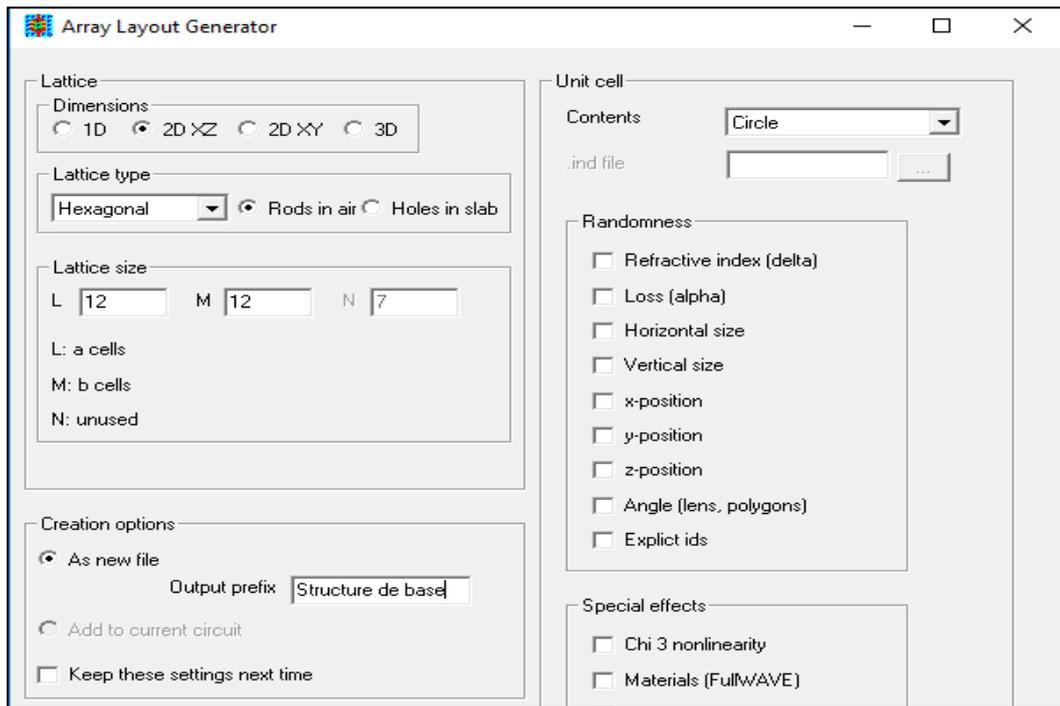


Figure (3.1) : Boîte de dialogue pour la création de la structure 2D (CPs)

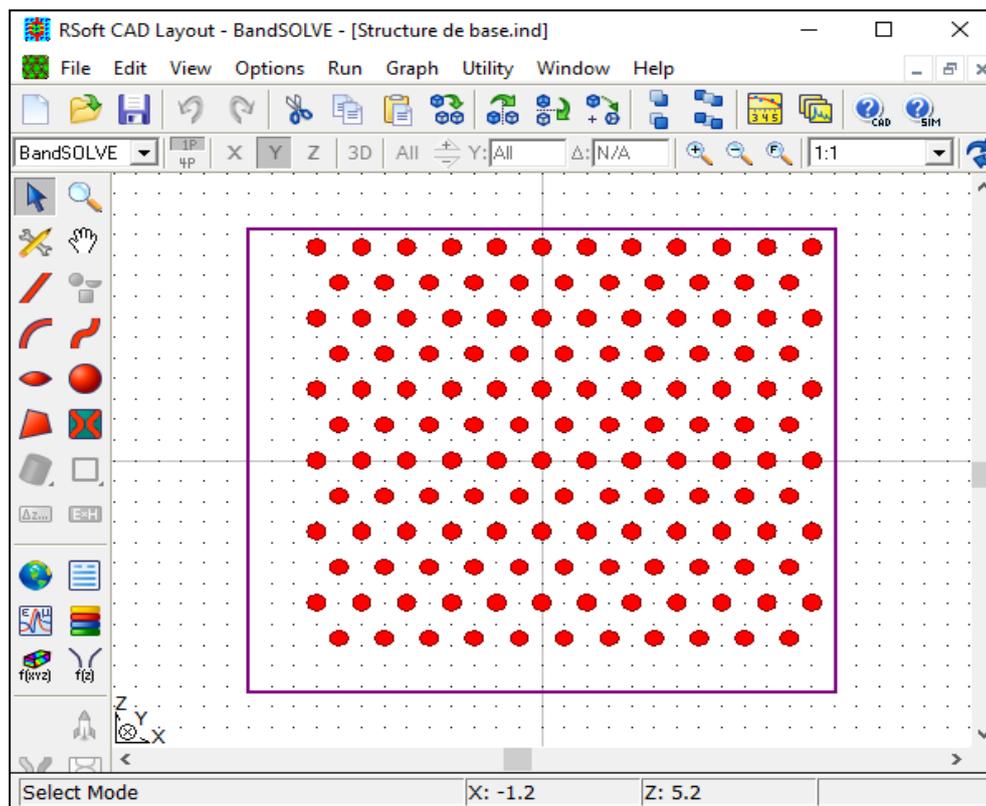


Figure (3.2) : Structure du cristal photonique formé par un réseau Hexagonal 12×12

### 3.2.3 Définition des paramètres

Pour faire rentrer les paramètres de la structure de base, en cliquant sur l'icône  'Symbol table editor', une boîte de dialogue s'ouvre (figure 3.3), et on fait saisir les variables :  $\text{Radius} = \text{Period} * 0.325 \mu\text{m}$ ,  $a = \text{Period} = 0.4 \mu\text{m}$ ,  $N_{\text{hole}} = 1$ ,  $N_{\text{slab}} = 3.37$ ,  $\text{Background-index} = N_{\text{slab}}$ ,  $\text{delta} = N_{\text{hole}} - N_{\text{slab}}$ .

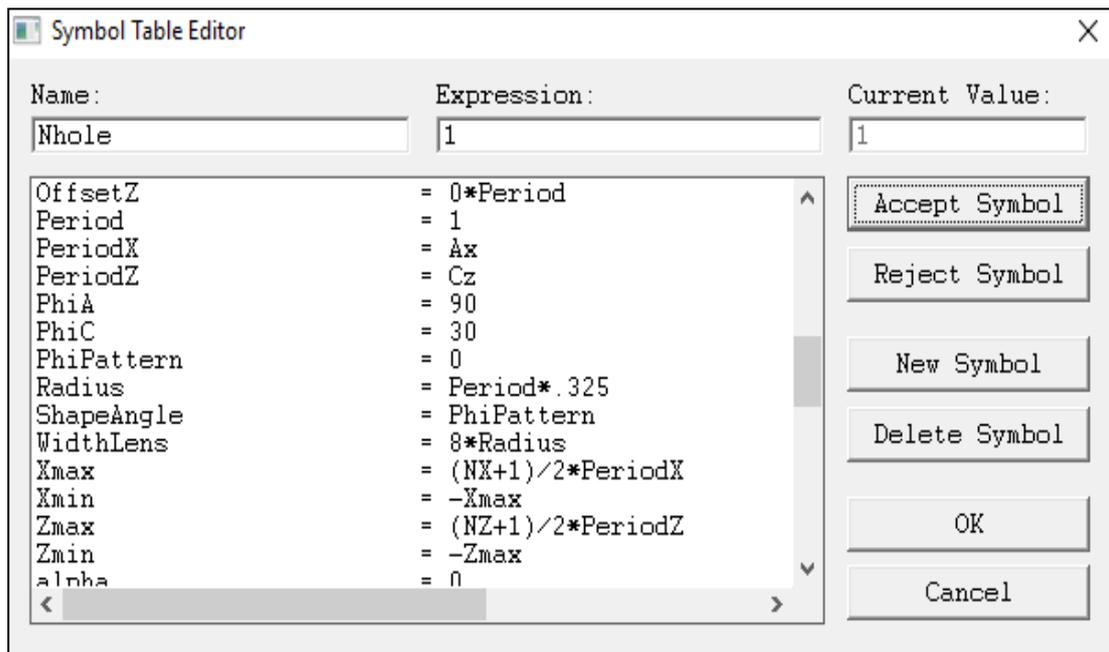


Figure (3.3) : Paramètres de la structure de base dans l'éditeur des symboles.

Après la conception de la structure désirée, on utilise le module BandSolve qui permet le calcul de diagramme de bandes interdites par la méthode (PWE).

### 3.2.4 Résultats de simulation obtenus par le Band Solve.

#### a) Profil d'indice :

La figure (3.4) montre le profil d'indice de la structure 2D conçu.

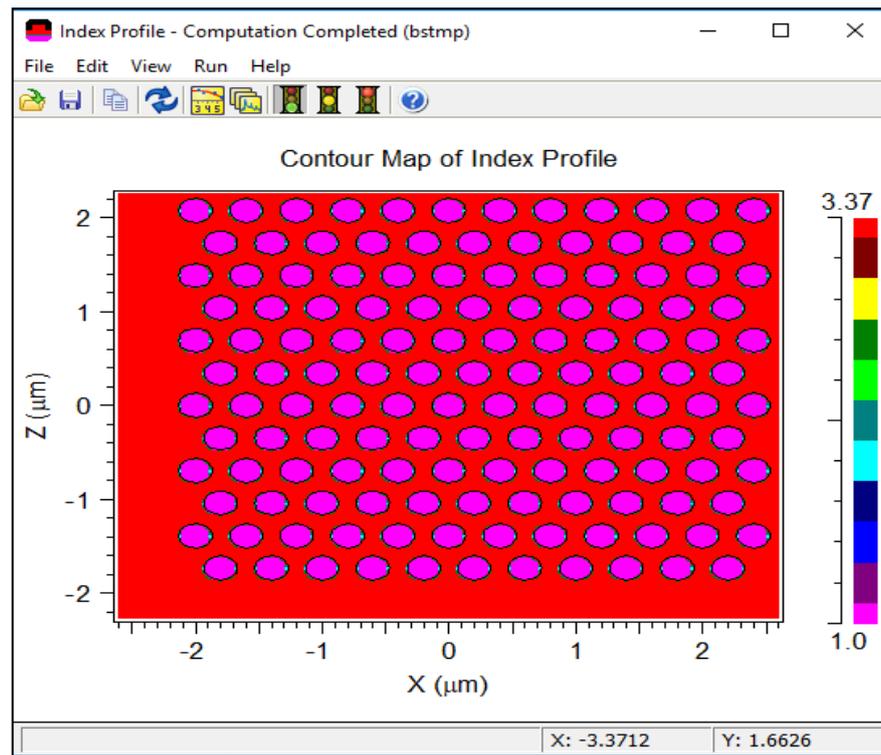


Figure (3.4) : Profil d'indice de la structure de base

La visualisation du profil d'indice est toujours utile, afin de voir la répartition des indices de réfraction dans une structure créée.

### **b) Zone de Brillouin**

La figure (3.5) montre la première zone de Brillouin correspondant au réseau hexagonal étudié.

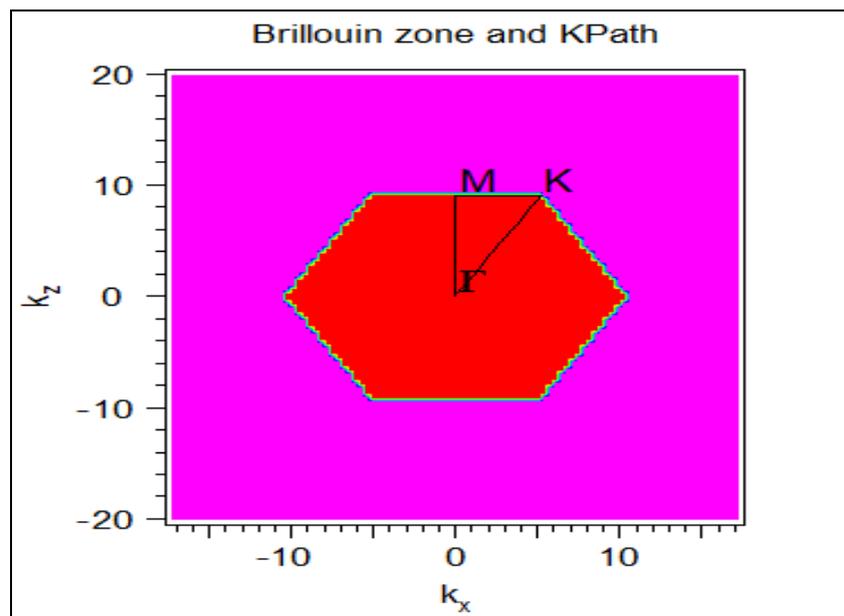


Figure (3.5) : Zone de Brillouin pour le réseau Hexagonal

### c) Diagramme des bandes interdites photoniques

La figure (3.6) montre le diagramme de bandes interdites photoniques (BIP), correspondant à la structure 2D.

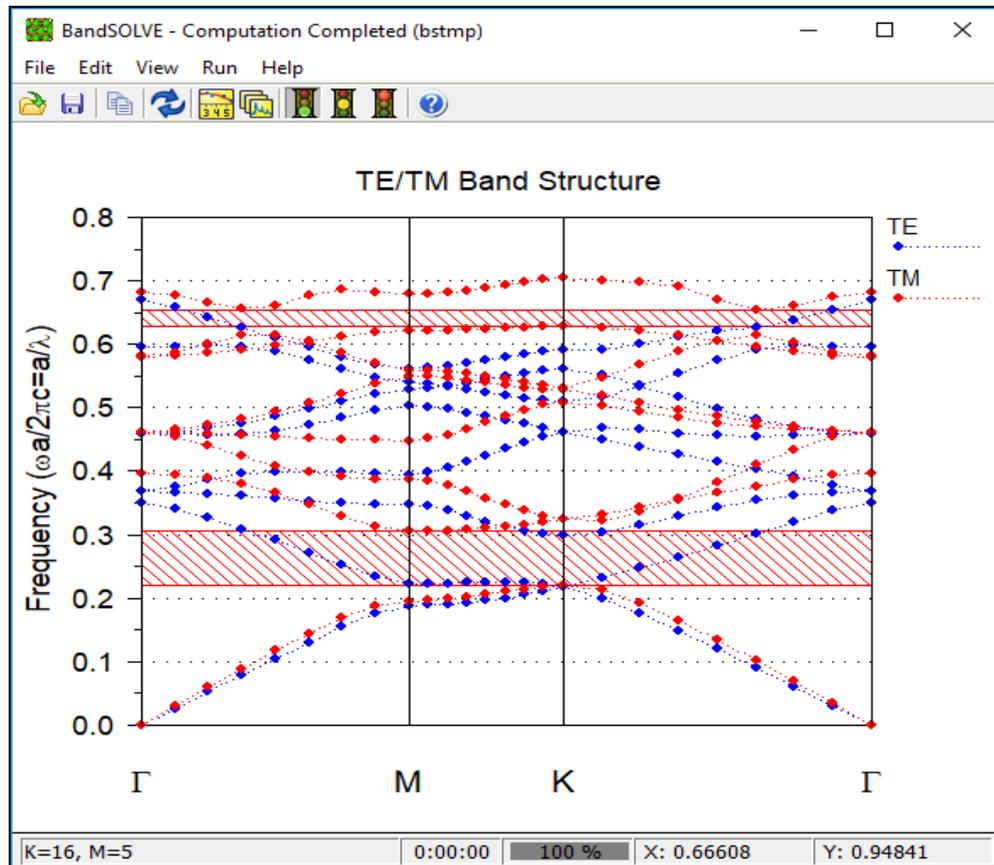


Figure (3.6) : Diagramme de bandes interdites photoniques du réseau Hexagonal obtenu

Les zones hachurées en rouge représentent les bandes interdites photoniques (BIP) pour la polarisation TM. Pour la polarisation TE, aucune bande n'est détectée.

Nous constatons que la première bande interdite photonique va de 0.2189  $a/\lambda$  jusqu'à 0.3096  $a/\lambda$  (où 'a' est la constante de périodicité égale à 400nm).

Pour calculer les longueurs d'ondes correspondantes, on a procédé comme suit :

Les fréquences sont données en unités normalisés :

$$\frac{wa}{2\pi c} = \frac{va}{c} = \frac{a}{\lambda}$$

Avec :  $\nu$  est la fréquence et  $C$  est la vitesse de la lumière dans le vide.

$$\lambda = \frac{a}{\nu} = \frac{0.4}{0.2189} = 1.82 \mu\text{m}.$$

$$\lambda = \frac{a}{\nu} = \frac{0.4}{0.3096} = 1.30 \mu\text{m}.$$

Ce qui correspond à une gamme de longueurs d'onde allant de 1300nm jusqu'à 1820nm. On remarque ici que cette gamme recouvre entièrement l'intervalle de longueurs d'onde utilisées en télécommunication.

### 3.3 Présentation de la structure avec défaut

Pour l'application de cette structure en détection, on doit introduire des défauts.

Il existe deux types de défauts, ceux des guides d'ondes et ceux de cavité.

#### 3.3.1 Un défaut de ligne

On a introduit un défaut de ligne, en enlevant une rangée de trous dans la direction  $\Gamma K$  du réseau hexagonal comme c'est schématisé sur la figure (3.7).

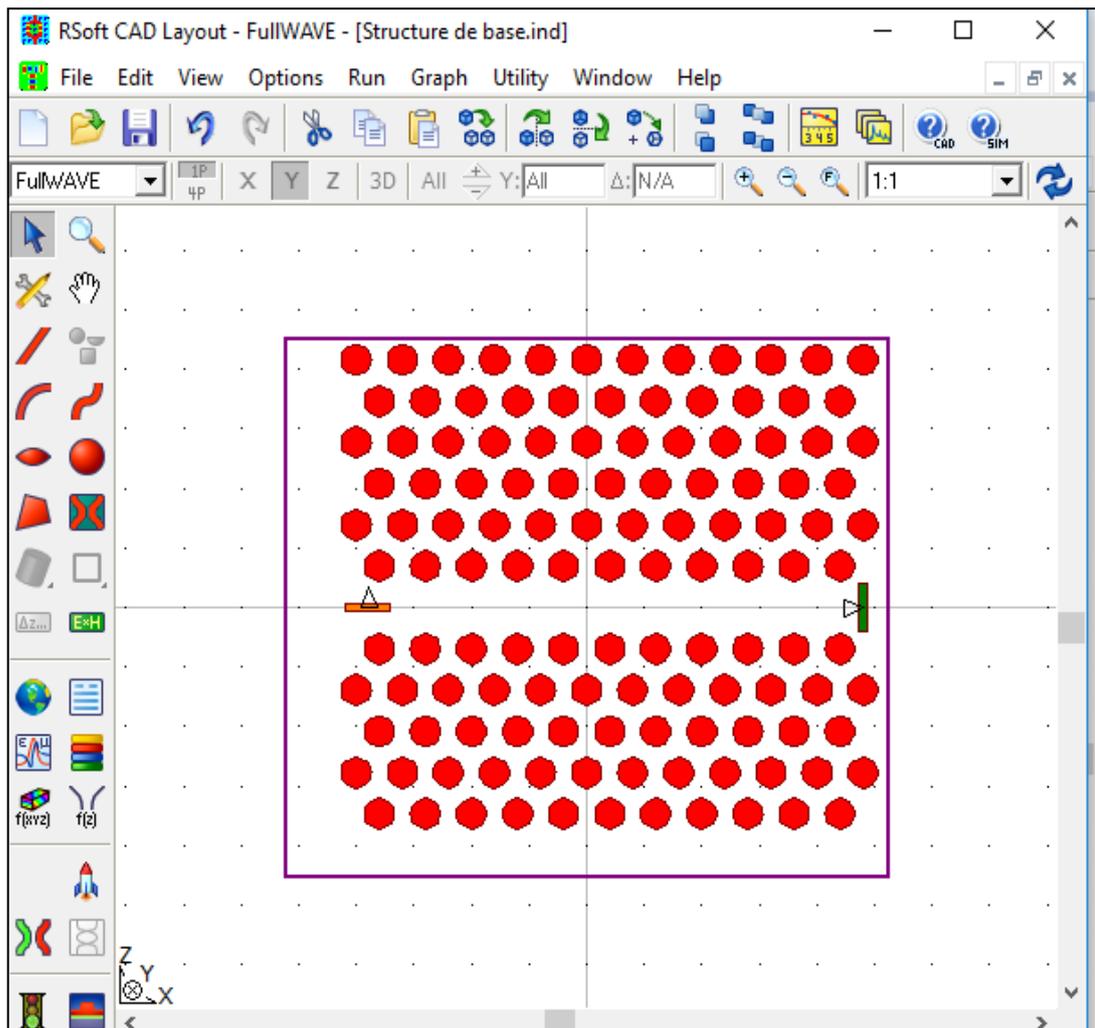


Figure (3.7) : Structure 2D avec un défaut de ligne (guide d'onde).

Avant de voir la transmission, on utilise le module Fullwave, mais avant ça on doit d'abord insérer une source d'excitation et un moniteur (capteur qui permet de visualiser la lumière de sortie).

Les figures (3.8) et (3.9) montrent, respectivement la boîte de dialogue du menu insert-monitor et celle de Edit lunch field .

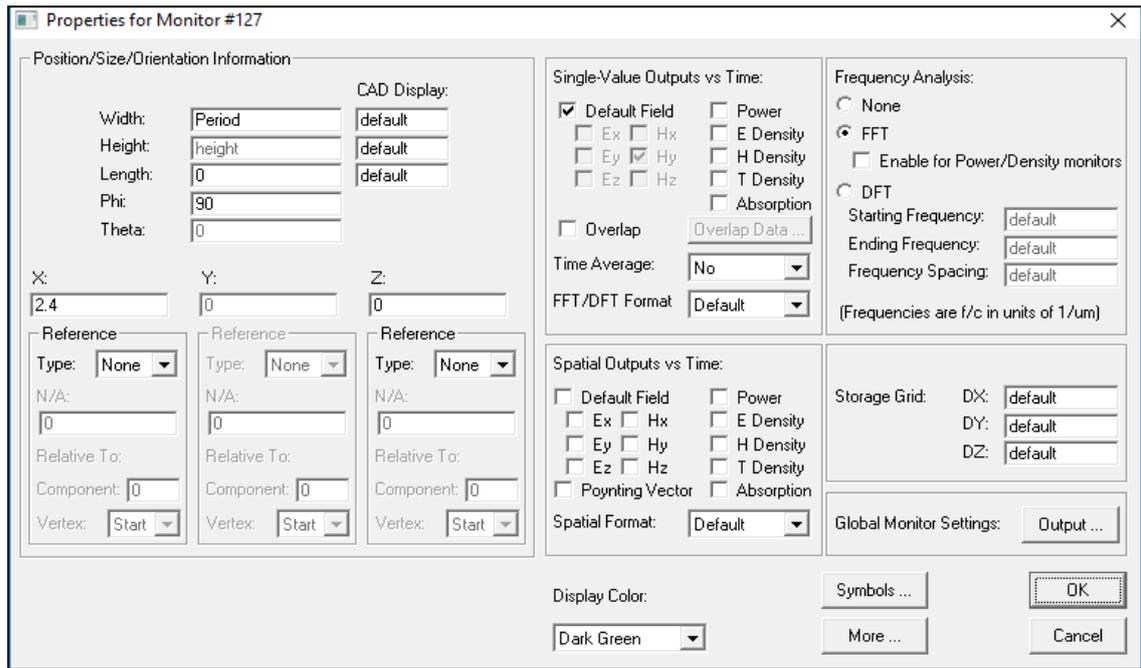


Figure (3.8) : Boite de dialogue pour le moniteur

Le choix de la position du Time Moniteur est très important, car c'est lui qui va capter la lumière qui sort.

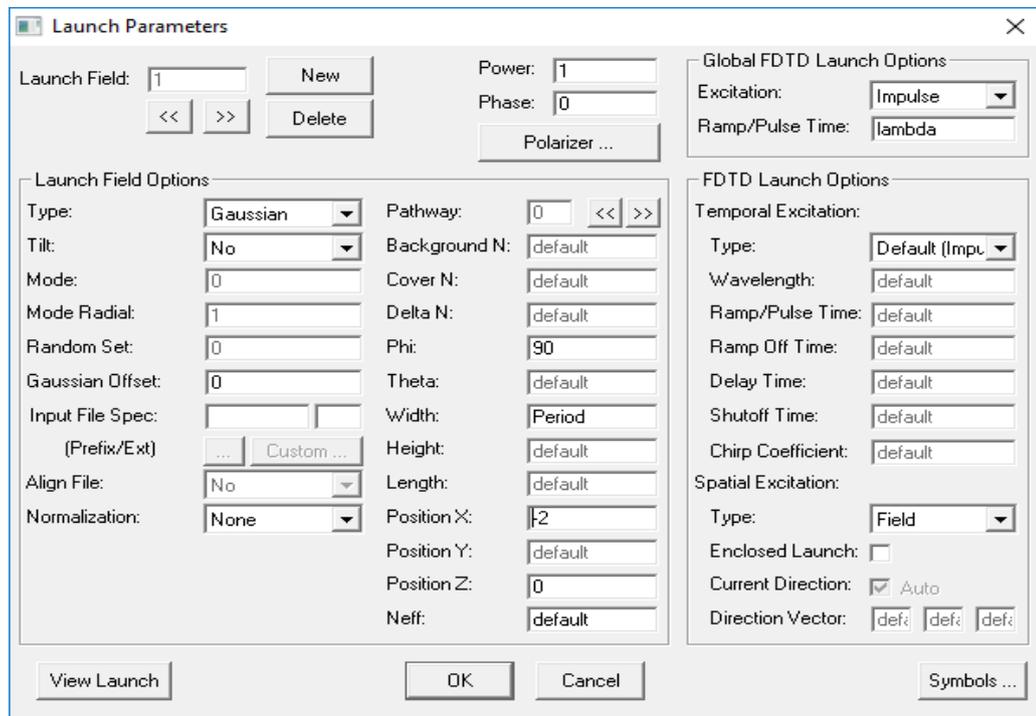


Figure (3.9) : Boite de dialogue pour l'excitation.

La position de l'excitation à travers l'éditeur du champ est aussi importante, on ne doit pas positionner hors les limites de la structure pour qu'il n'y ait pas de pertes de lumière injectée.

a) *Résultats de simulation obtenus par le module Fullwave.*

La figure (3.10) montre la distribution spatiale d'une excitation de type continue (CW) à une longueur d'onde de  $1.6\mu\text{m}$  (longueur d'onde permise) pour la polarisation TM du guide droit.

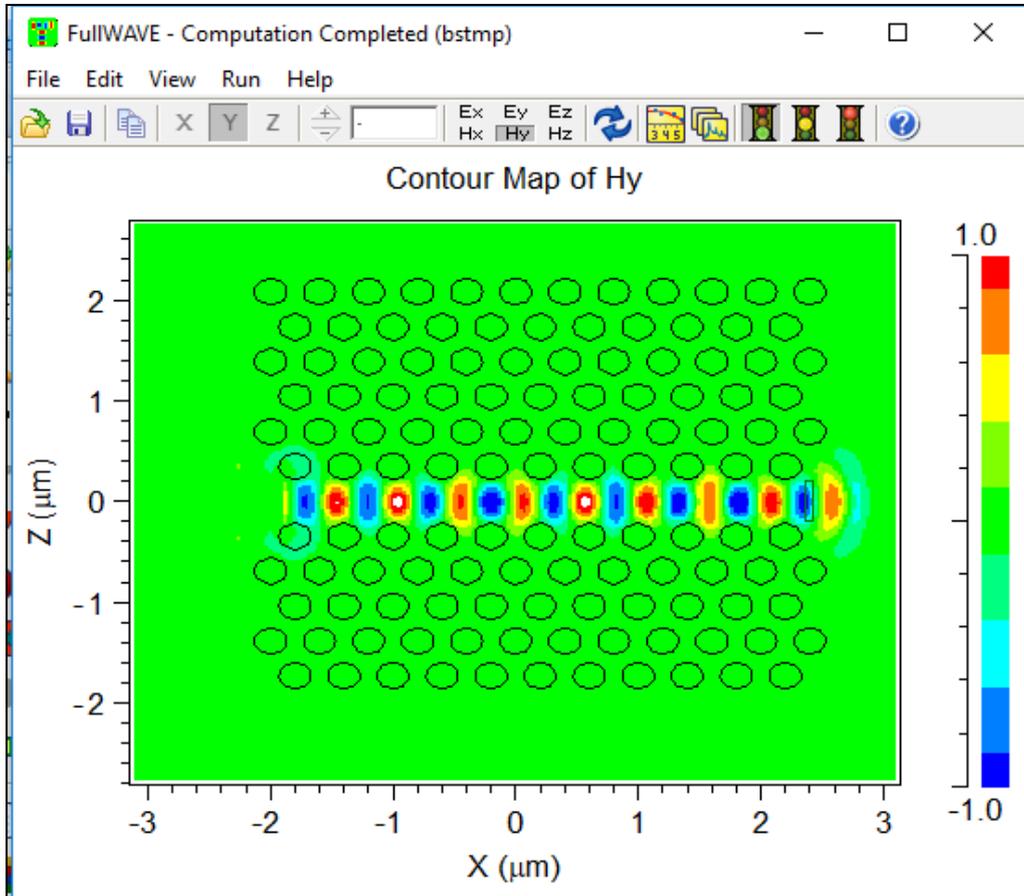


Figure (3.10) : Visualisation de la propagation de la longueur d'onde  $1.6\mu\text{m}$  dans le guide introduit.

On constate bien que la lumière se propage que dans le guide, par contre elle est nulle dans le cristal photonique, ce qui montre bien que ce cristal est comme un miroir pour cette longueur d'onde qui appartient aux longueurs d'ondes de la bande interdite photonique.

L'introduction de défaut permet donc de bien diriger et confiner la lumière (phénomène de guidage de la lumière)

### 3.3.2 Défaut de cavité

Dans le but d'avoir l'application des cristaux photonique en détection, nous avons effectué une optimisation de la structure initiale dite de référence pour avoir un changement de la transmission de la longueur d'onde de résonance en fonction du changement d'indice.

On a introduit une cavité qui est formé d'un guide d'onde d'entrée, un résonateur et un guide d'onde de sortie. La cavité est formée de trous de rayon inférieur aux rayons des tiges d'air ( $R_a=0.292*a$ ). Les tiges de la cavité sont représentées en couleur bleu sur la fenêtre de conception du logiciel, figure (3.11).

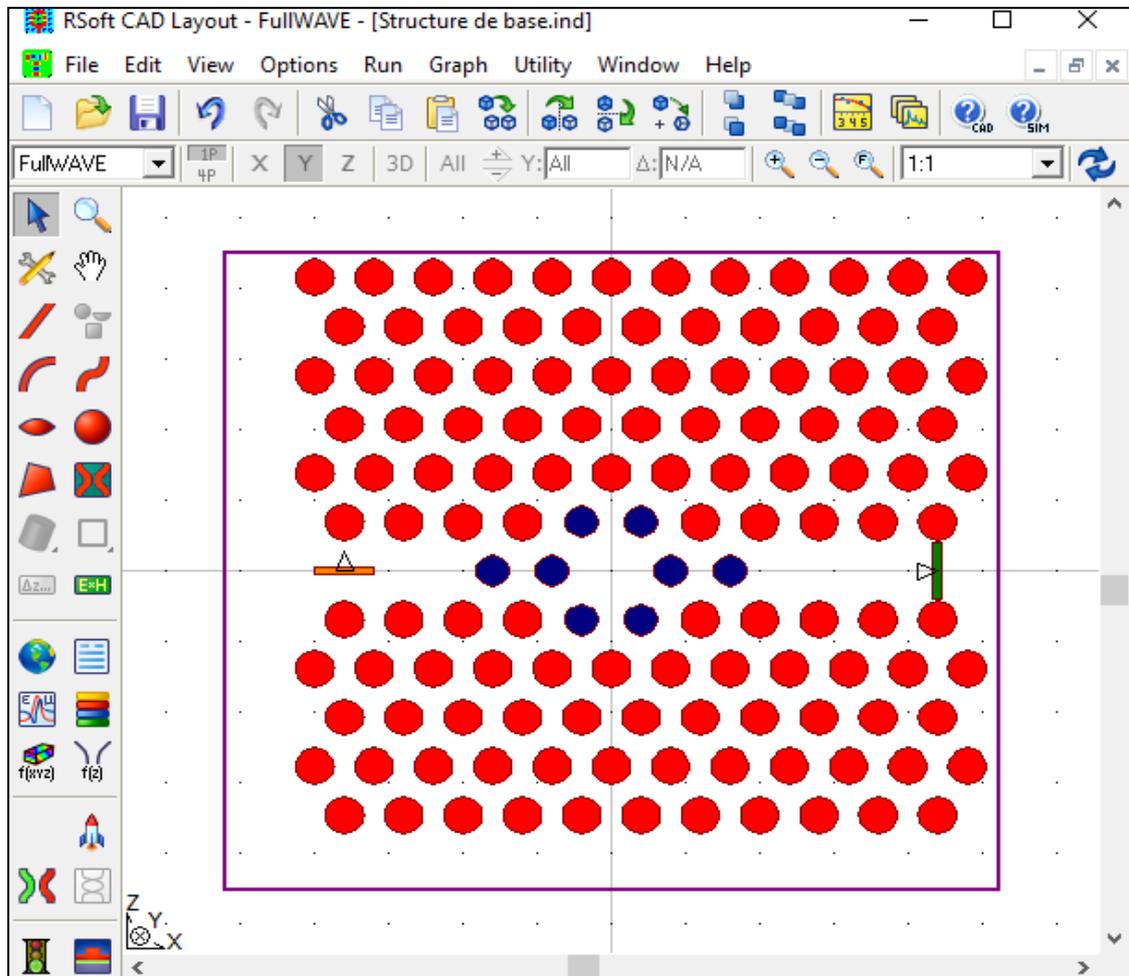


Figure (3.11) : Structure du cristal photonique avec (guide d'onde et cavité)

### b) Résultat de simulation obtenu par le Fullwave

La figure (3.12) représente le spectre de transmission calculé par la méthode FDTD du logiciel Fullwave pour la structure avec défaut.

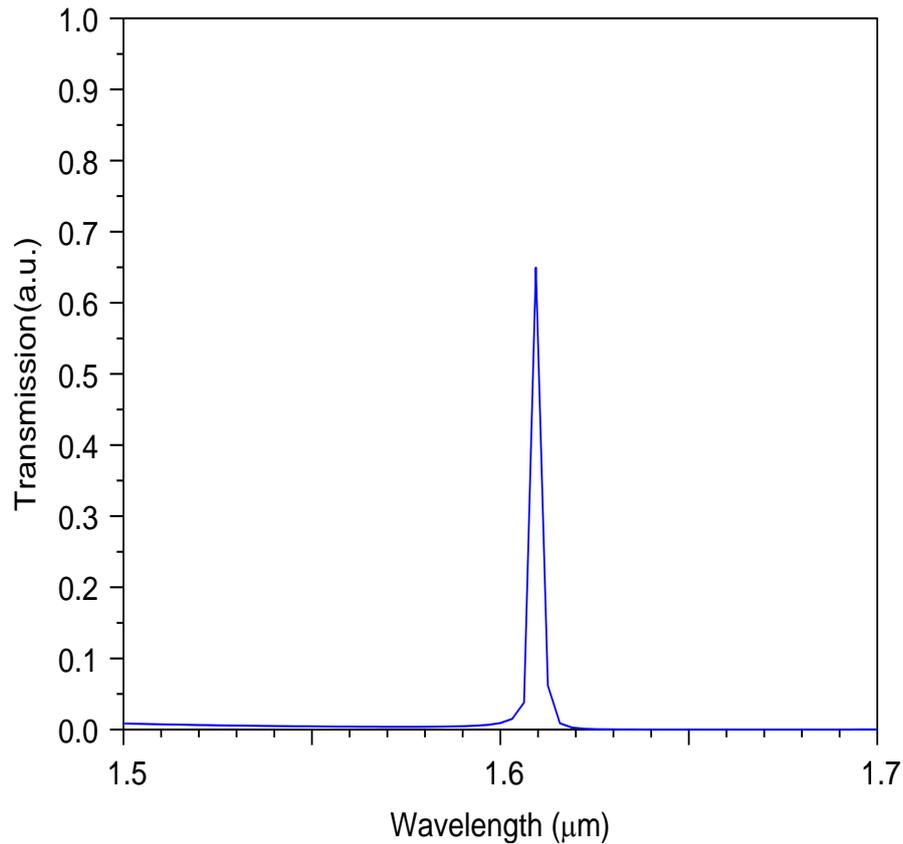


Figure (3.12) : Spectre de transmission obtenu pour la cavité conçue.

Le spectre montre l'existence d'un mode de cavité autour de la longueur d'onde  $1,64\mu\text{m}$ , ce mode appartient à l'intérieur de la bande interdite photonique en polarisation TM du réseau hexagonal.

Lorsque les trous d'air du CP sont remplis d'eau homogène ( $n_{\text{eau}} = 1.33$ ), La longueur d'onde de la résonance  $\lambda_0$  de cette structure se déplacera en conséquence avec la variation de l'indice de réfraction (RI) comme s'est schématisé sur la figure (3.13).

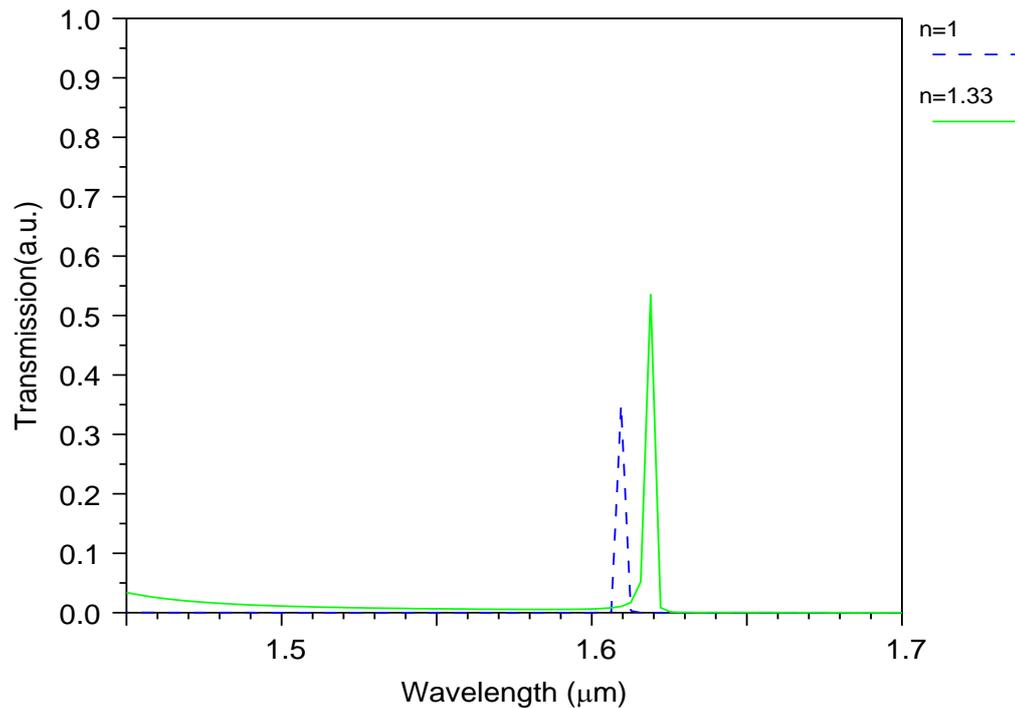


Figure (3.13) : Spectres de transmission obtenus pour deux indices de réfraction différents

On constate que le spectre de transmission est décalé par rapport au spectre de référence quand on a changé l'indice de réfraction des trous d'air de la cavité.

Nous avons calculé aussi le spectre de transmission lorsque les trous d'air de cavité sont remplis de matériau d'indice 1.35.

La figure (3.14) montre le spectre de transmission obtenu.

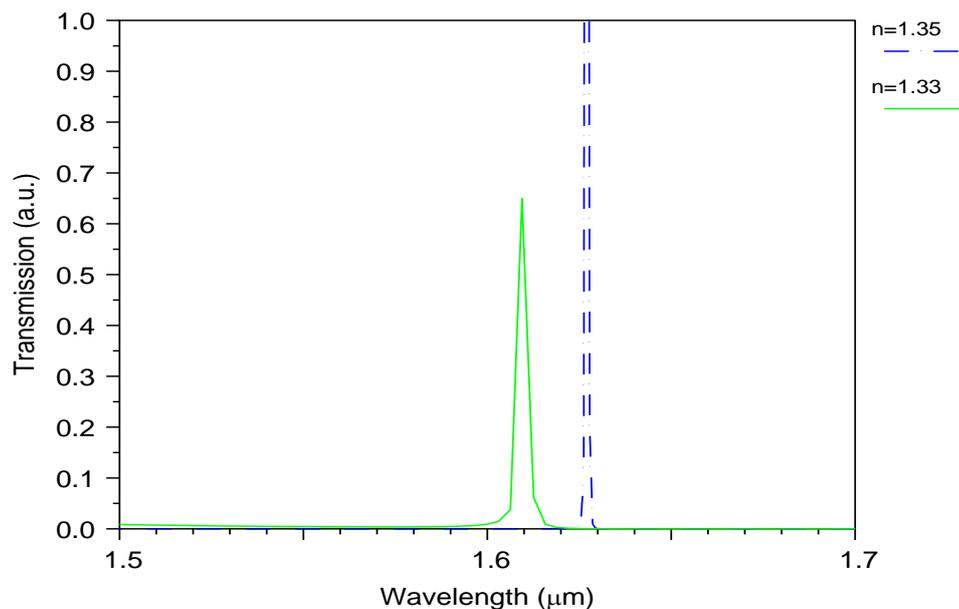


Figure (3.14) : Spectres de transmission obtenus pour deux valeurs de l'indice (1.33 et 1.35).

On constate aussi un décalage du spectre de transmission pour la longueur d'onde  $1.6\mu\text{m}$  lorsque l'indice de réfraction des trous d'airs de la cavité ont été remplis avec un matériau d'indice 1.35.

✚ Pour exploité ce résultat dans le domaine des capteurs, on a calculé l'une des caractéristiques principale qui est la sensibilité.

- **Sensibilité :**

Nous définissons la sensibilité par [10] :

$S = \Delta\lambda_0 / \Delta n$ , avec :

$\Delta n$  : différence d'indice et  $\Delta\lambda_0$  le décalage en longueur d'onde

Dans notre exemple, la cavité donne un décalage le la longueur d'onde de résonance  $\lambda_0$  de 7.1 nm pour une variation d'indice 0.02.

Donc la sensibilité vaut 355 nm/RIU (RIU réfractive index unit).

## Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'étude et la simulation d'un biocapteur à base de cristal photonique. En effet, ces dernières années les cristaux photoniques ont prouvé leur utilité dans le domaine des télécommunications et les capteurs.

Les cristaux photoniques sont des structures où l'indice de réfraction varie périodiquement à l'échelle de la longueur d'onde dans une, deux ou trois directions de l'espace.

Les cristaux photoniques 2D ont été utilisés comme capteurs de température [10], de pression [19], et comme détecteurs d'éléments biochimiques (ADN, Protéine,...) [20].

Le principe de la détection consiste à trouver le décalage de la fréquence de résonance, provoqué par le changement de l'indice de réfraction (IR) des trous remplis de la matière à analyser.

Pour effectuer la simulation d'un tel dispositif, nous avons utilisé le logiciel Rsoft et notamment ses deux modules BandSolve et Fullwave, qui sont les plus adaptés à la simulation et la conception des structures périodiques (CPs).

Pour mener à bien ce modeste travail, nous sommes tout d'abord passés par une étude théorique, qui nous a permis de se familiariser avec le sujet et de connaître la structure et les paramètres caractéristiques des cristaux photoniques étudiés.

On a commencé d'abord par l'étude des bandes interdites photoniques de la structure de base du cristal 2D à réseau hexagonal, puis on a introduit les défauts et trouvé la cavité qui permet d'avoir un décalage de son spectre de transmission en fonction du changement d'indice de réfraction du CP( qui correspond à l'élément à analyser). On a obtenu un décalage dû au changement d'indice dans les trous présents dans la cavité.

La structure ainsi simulée peut être utilisée comme capteur d'ADN, ou pour la détection de fluides.

*En perspective nous comptons améliorer la structure d'étude pour une application bien déterminée et optimiser ses dimensions ainsi que les caractéristiques recherchées pour un capteur (sensibilité élevée et fort facteur de qualité et une limite de détection faible).*

## Références bibliographiques & Webographie

- [1]: Mohamed, M.S., Hameed, M.F.O., Areed, N.F., El-Okr, M.M., Obayya, S.S.A.: Analysis of Highly Sensitive Photonic Crystal Biosensor for Glucose Monitoring. *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*. 31 , (2016).
- [2]: Shiramin, L.A., Kheradmand, R., Abbasi, A.: High-Sensitive Double-Hole Defect Refractive Index Sensor Based on 2-D Photonic Crystal. *IEEE Sensors Journal*. 13, 1483–1486 (2013).
- [3]: Yablonovitch, E.: Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics. *Physical Review Letters*. 58, 2059–2062 (1987).
- [4]: Jean-Michel Lourtioz, «Cristaux photoniques et gaps de photons - Aspects fondamentaux », *Techniques de l'Ingénieur*, AF 3 710, 07/2004
- [5]: Wang, C., Sun, F., Fu, Z., Ding, Z., Wang, C., Zhou, J., Wang, J., Tian, H.: High figure of merit ultra-compact 3-channel parallel-connected photonic crystal mini-hexagonal-H1 defect microcavity sensor array. *Optics Communications*. 396, 71–77 (2017).
- [6] F.Brik, N.Paire, T.Bouchemat and M.Bouchemat, "Minimization of the thermal effect in a waveguide structure optical switch, " *Applied physics B Lasers and optics*, vol.97, 2009.
- [7]: Moumeni Imen, Labani Amel, Brik Fatima" Conception d'un duplexeur optique très compact à base de matériaux périodiques photoniques ", Fourth International Conference on Energy, Materials, Applied Energetics and Pollution. ICEMAEP2018, April29-30, 2018, Constantine,Algeria.
- [8]: Kotb, A., Zoiros, K.E.: Performance analysis of all-optical XOR gate with photonic crystal semiconductor optical amplifier-assisted Mach–Zehnder interferometer at 160 Gb/s. *Optics Communications*. 402, 511–517 (2017).
- [9] : <http://dspace.univ-lemcen.dz/bitstream/112/14126/1/Effet-des-structures-nanometriques-sur-le-developpement-des-cellules-photovoltaique-de-troisieme-generation.pdf>
- [10] : BOUGRIOU Fiada, Etude théorique des matériaux à bandes interdites photoniques bidimensionnels: applications dans le domaine de guidage optique et la détection, université de Constantine, 2013
- [11] : Azzedine Boudrio, *Optique intégrée théorie et applications*, Hermes sciences.
- [12] : [http://www.cse.unt.edu/~smohanty/Publications\\_Journals/2006/MohantyIEEEPotentials2006Mar-Apr.pdf](http://www.cse.unt.edu/~smohanty/Publications_Journals/2006/MohantyIEEEPotentials2006Mar-Apr.pdf)
- [13] : <http://www.gwent.org/presentations/biointro.pdf>

- [14] : <http://www.crec.ifas.ufl.edu/academics/faculty/reyes/PDF/BiosensorsEAFBE.pdf>
- [15]: S. Robinson and N.Dhanlaksmi, « Photonic Crystal Based Biosensor for the Detection of Glucose Concentration in Urine », PHOTONIC SENSORS , Vol. 7, No. 1, 11–19, 2017.
- [16]: N. Skivesen, A. Têtu, M. Kristensen, J. Kjems, L.H. Frandsen, and P.I. Borel, “Photonic crystal waveguide biosensor,” Optics Express 15, pp. 3169-3176 (2007).
- [17]: K. S. Yee : Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell’s equations in isotropic media. IEE Transactions on Antennas and Propagation, 14(3):302– 307, 1966.
- [18]: RSoft Design Group, Inc, “FullWAVE 6.1 User Guide”, license 16847214, 1999-2013.
- [19] : Kaddour Nassiba, Tahmi chahrazad, ‘Design de capteur de pression haute sensibilité à base de cristaux photoniques 2D sur substrat en silicium’, mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf, Msila.
- [20]: Faiza Bounaas, Amel Labani, Fatima Brik, ‘Design of an ultra compact photonic crystal biosensor with core shell defects’, CEE2019, Conference on Electrical Engineering, April 22-23,2019, EMP( Ecole Militaire Polytechnique), Algeria.