

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTÈRE DE**  
**L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**  
**Université Mohamed Boudiaf - M'sila**  
**Faculté de Technologie**  
**Département d'Electronique**



**Mémoire**  
**MASTER ACADEMIQUE**  
**Domaine : Sciences et technologies**  
**Filière : Electronique**  
**Spécialité : Microélectronique**

***THÈME***

**Optimisation d'une structure de piégeage  
de la lumière pour les cellules solaires**

**Membres du jury :**

**Professeur HOCINI Abdesselam**    **Président**

**Docteur ZOUACHE Tarek**        **Examineur**

**Docteur BOURAS Mounir**       **Encadreur**

**Présenté par :**

**ABDELATIF Hicham**

**CHERIF Madani**

**Année 2019/2020**

## **Dédicaces**

Nous dédions ce travail en signe de respect et de reconnaissance :  
À nos cher parents CHERIF Toufik, BENHOUHOU Kheira, BENAZIEZ Aicha, et à toute la famille sans exception et spécialement à notre cher père ABDELATIF Hamid et notre cher oncle feu DAHMANI Bensnousi que dieu ai leur âmes.

## **Remerciements**

Nous remercions ALLAH le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, la santé et la patience de mener à terme ce présent travail.

Nous exprimons toute nos profonde gratitude, nos profonde reconnaissance et nos sincères remerciements à Monsieur BOURAS Mounir Docteur au département d'électronique à l'Université de M'sila pour nous avoir encadré tout le long de notre travail, qui par ses conseils a été un guide précieux dans l'élaboration de ce mémoire.

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

# Sommaire

Résumé .....	1	
Introduction générale.....	2	
<b>Chapitre I</b>	<b>LES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES</b>	4
I.1 Introduction.....	4	
I.2 Les cellules solaires photovoltaïques.....	4	
I.2.1 Définition .....	4	
I.2.2 Historique.....	5	
I.3 L'absorption de la lumière .....	6	
I.3.1 La conversion photovoltaïque.....	6	
I.3.2 Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire.....	7	
1.3.2.1. L'Absorption des photons .....	7	
1.3.2.2. La Création de paires électrons/trous.....	7	
1.3.2.3. La Collecte .....	8	
I.3.3 Structure des cellules solaires .....	9	
I.4 Silicium et dépôt de silicium utilisé dans les cellules solaires.....	10	
I.4.1 Propriétés photovoltaïques du silicium.....	10	
I.4.2 Cellules solaires à base de silicium amorphe.....	10	
I.4.2.1 Propriétés générales .....	10	
I.4.2.2 Dépôt du silicium amorphe.....	11	
I.5. Différentes filières technologiques des cellules photovoltaïques.....	12	

I.5.1 Le silicium .....	12
I.5.2 Cellules en couches minces .....	14
I.5.2.1 Cellules à base de tellure de cadmium CdTe .....	14
I.5.2.2 Matériaux à base de sélénure de cuivre indium gallium .....	14
I.5.3 Les cellules III-V multi-jonctions .....	15
I.5.4 Les cellules nanocristallines à colorant ou cellules de Gratzel .....	15
I.5.5 Les cellules photovoltaïques organiques .....	16
I.6 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque .....	17
I.6.1 Avantages.....	17
I.6.2 Inconvénients .....	17
I.7 Ce qu'on attend de la photovoltaïque .....	17
I.8 Secteurs d'applications .....	18
I.9 Conclusion .....	20
<b>Chapitre II</b>	<b>LES CRISTAUX PHOTONIQUES</b>
II.1. Introduction .....	21
II.2. Définition de cristaux photonique .....	21
II.3. Les cristaux photoniques naturel .....	22
II.3.1. Les opales .....	22
II.3.2. Les papillons.....	23
II.3.3. Les oiseaux .....	24





# Liste des figures

<b>Figure I.1 :</b> Cellules solaires photovoltaïques .....	6
<b>Figure I.2 :</b> Réflexion, Transmission et Absorption .....	7
<b>Figure I.3 :</b> a) Photogénération dans la cellule solaire b) Diagramme d'énergie.....	8
<b>Figure I.4 :</b> Structure d'une cellule photovoltaïque .....	10
<b>Figure I.5:</b> (a)Structure cristalline du silicium, (b) Structure amorphe du silicium.....	11
<b>Figure I.6 :</b> Répartition des matériaux sur le marché mondial du photovoltaïque.....	13
<b>Figure I.7 :</b> Vue schématique de la composition de la cellule à multijonction .....	16
<b>Figure II.1:</b> Représentation schématique d'un cristal photonique 1D, 2D et 3D .....	24
<b>Figure II.2 :</b> Image d'une opale .....	25
<b>Figure II.3 :</b> (a) Photographie d'un papillon morpho, (b) Les images et (c) Présentent l'agrandissement par microscope d'une aile de papillon .....	26
<b>Figure II.4 :</b> Une vue microscopique d'une structure de cristal photonique naturel d'une plume du paon .....	27
<b>Figure II.5 :</b> 1D,2D, et 3D bande interdite structure.....	28
<b>Figure II.6:</b> Schéma d'un cristal photonique unidimensionnel constitué d'un empilement de couches diélectriques de période d .....	33
<b>Figure II.7:</b> (a) Cristal photonique 2D. (b) Matrice de trous d'air réalisée sur un substrat de Niobate de Lithium avec une période $a = 825$ nm et un rayon $r = 206$ nm.....	33
<b>Figure II.8 :</b> Structures 2D : a) Structure carrée, (b) Triangulaire et (c) Hexagonale. Les propriétés optiques des structures bidimensionnelles sont fortement dépendantes de la polarisation de l'onde électromagnétique. ....	34
<b>Figure II.9 :</b> Un exemple d'une structure de pile de bois 3D .....	35
<b>Figure II.10 :</b> Réseau direct.....	37

<b>Figure II.11</b> : Cristal photonique unidimensionnel (à gauche) et zone de Brillouin correspondante (à droite). L'intervalle $\left[-\frac{\pi}{a}; +\frac{\pi}{a}\right]$ est la première zone de Brillouin et $\left[0; +\frac{\pi}{a}\right]$ la zone de Brillouin irréductible.....	37
<b>Figure II.12</b> : Cristaux photoniques bidimensionnels à symétries (1) Carrée, (2) Rectangulaire et (3) Triangulaire avec leurs zones de Brillouin irréductibles correspondantes (en trait vert).	38
<b>Figure II.13</b> : Principe de fonctionnement d'un miroir de Bragg.....	39
<b>Figure II.14</b> : Réponse spectrale d'un réseau holographique en réflexion et illustration de la bande interdite photonique (BIP). .....	40
<b>Figure II.15</b> : Représentation des polarisations TE et TM dans un BIP 2D .....	41
<b>Figure II.16</b> : Diagramme de bande d'un cristal photonique 2d a maille carrée (polarisation TE).....	41
<b>Figure II.17</b> : Défaut dans une structure périodique unidimensionnelle, formé par l'élargissement d'une couche. Ce défaut peut être considéré comme une interface entre deux réseaux unidimensionnels parfaits. On notera l'élargissement du champ dû au défaut.....	43
<b>Figure II.18</b> : Division de l'espace des fréquences dans les états propagatifs et évanescents. Dans ce schéma, la densité d'états (nombre de modes permis par unité de fréquence) est nulle dans les bandes interdites du cristal (zone gris clair). Les modes ne peuvent exister dans ces régions que s'ils sont évanescents, et si la périodicité est rompue par un défaut(trait pointillé).	44
<b>Figure II.19</b> : Section d'une fibre microstructure (MOF) .....	45
<b>Figure.III.1</b> : Fenêtre principale du programme CAD.....	52
<b>Figure III.2</b> : La fenêtre de démarrage (startup Window). .....	53
<b>Figure III.3</b> : Nouvelle fenêtre pour réaliser un nouveau composant ou nouveau circuit. ....	54
<b>Figure III.4</b> : Propriétés sectoriels pour l'objet de guide d'ondes créé.....	54
<b>Figure III.5</b> : Disposition de configuration nom structure.....	54
<b>Figure III.6</b> : L'éditeur du Tableau de symboles .....	55
<b>Figure III.7</b> : Arrangements de calcul de profil d'index.....	56
<b>Figure III.8</b> : Distribution d'index pour la configuration nom structure (référence) .....	56
<b>Figure III.9</b> : La boîte de dialogue Paramètres de simulation DiffractMOD où les paramètres de simulation sont contrôlés.....	57

<b>Figure III.10:</b> Output Options .....	58
<b>Figure III.11:</b> Résultats de la simulation .....	58
<b>Fig. IV. 1 :</b> Schéma de principe de la cellule solaire au silicium avec piégeage de la lumière structure .....	62
<b>Fig. IV.2. (a) :</b> Illustration de l'efficacité globale de la cellule $\eta$ en fonction de l'indice de réfraction de la couche $n_{AR}$ .....	63
<b>Fig. IV.2. (b) :</b> Illustration de l'efficacité globale de la cellule $\eta$ en fonction de l'épaisseur $t_{AR}$ de la couche AR. ....	64
<b>Fig. IV.3. (a)</b> Illustration de l'efficacité globale de la cellule $\eta$ en fonction de la Période de réseau normalisé. ....	65
<b>Fig. IV.3 (b) :</b> Illustration de l'efficacité globale de la cellule $\eta$ en fonction de la profondeur de réseau normalisé $tg$ pour ( $\Lambda = 0,72\lambda_g$ ).....	66
<b>Fig. IV.3. (c) :</b> Illustration de l'efficacité globale de la cellule $\eta$ en fonction de rapport cyclique $W/\Lambda$ .....	67
<b>Fig. IV.4 :</b> Illustration de l'efficacité globale des cellules $\eta$ en fonction de la longueur d'onde centrale $\lambda_d$ du DBR. ....	68

# Liste des tableaux

**Tableau I.1** : Les différentes technologies photovoltaïques..... 17

## Résumé

Une cellule photovoltaïque est un composant optoélectronique qui converti la lumière en l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Notamment grâce aux innovations technologiques. Un pas important a été franchi dans ce sens grâce à la mise en place d'une filière utilisant des couches minces, réduisant significativement la quantité de matériau actif nécessaire. Aujourd'hui, ces efforts ont aboutis à des couches semi-conductrices ultraminces qui voient le jour. Du fait de leur faible épaisseur, ces couches souffrent d'une faible absorption de la lumière, ce qui limite le rendement de conversion des cellules.

Pour remédier à ce problème nous proposons une optimisation de conception pour de telles structures de piégeage de la lumière afin d'améliorer considérablement l'efficacité des cellules pour les cellules avec des couches actives de silicium très fines (généralement 2 à 10  $\mu\text{m}$ ). La structure démontre une absorption considérablement améliorée dans la gamme de longueurs d'onde de 400 à 1 100 nm, conduisant à une amélioration remarquable de l'efficacité globale.

**Mots –clés :** Cellules photovoltaïques, structures de piégeage de la lumière, l'amélioration de l'efficacité des cellules PV.

## ملخص

الخلية الكهروضوئية هي مكون إلكتروني ضوئي يحول الضوء إلى كهرباء من خلال التأثير الكهروضوئي.

بفضل الابتكارات التكنولوجية تم اتخاذ خطوة مهمة في هذا الاتجاه وذلك بإنشاء عملية تكمن في استخدام الأغشية الرقيقة، التي من شأنها قللت بشكل كبير من كمية المادة الفعالة المطلوبة. واليوم تستمر هذه الجهود التي تظهر أن طبقات أشباه الموصلات بالغة الرقة تعاني من انخفاض امتصاص الضوء نظراً لسمكها المنخفض مما يحد من كفاءة تحويل الخلايا.

لمعالجة هذه المشكلة، نقتراح تحسيناً للتصميم هياكل محاصرة الضوء لتحسين كفاءة الخلية بشكل كبير للخلايا ذات طبقات السيليكون النشطة الرقيقة جداً (عادةً من 2 إلى 10 ميكرومتر).

يوضح الهيكل امتصاصاً محسناً بشكل كبير في نطاق الطول الموجي من 400 إلى 1100 نانومتر، الذي أدى إلى تحسن ملحوظ في الكفاءة الكلية.

**الكلمات المفتاحية:** الخلايا الضوئية، هياكل محاصرة الضوء، تحسين كفاءة الخلايا الكهروضوئية.

### Introduction générale

L'énergie est listée comme la première priorité de l'humanité pour les années prochaines. Elle est largement utilisée dans l'industrie, le transport, la communication, L'agriculture et la vie quotidienne. Elle provient sous multiple formes divisées en deux catégories principales. La première est la catégorie des énergies dites non renouvelables extraient du charbon, du gaz, du pétrole et d'Uranium. La deuxième est celle des énergies appelés renouvelables comme l'éolienne, la biomasse, la géothermique, l'hydroélectrique et le solaire thermique et photovoltaïque [1-3].

L'inconvénient des énergies non renouvelables est qu'ils sont des ressources de disponibilité limitée d'une part et leur combustion est l'une des causes principales de la pollution de l'environnement d'autre part. Ainsi que, vu les risques d'accidents que présente, l'énergie nucléaire nécessite une commande et une sécurité très élevée pour son utilisation [4,5].

Parmi les énergies renouvelables, l'énergie solaire photovoltaïque (PV), permet de produire de l'électricité de manière respectueuse pour l'environnement, en utilisant une source d'énergie quasiment infinie : le soleil. Aujourd'hui, la plupart des cellules solaires commercialisées sont produites en utilisant du silicium monocristallin ou polycristallin. Ces cellules solaires peuvent atteindre des rendements photovoltaïques de l'ordre de 24.7% avec une lumière nom concentrée (Green et al, 2006). Toutefois, les inconvénients majeurs sont le coût élevé du matériau et la forte consommation d'énergie au cours de la production [6].

Ce travail vise l'étude et la conception d'une structure qui démontre une absorption considérablement améliorée dans la gamme de longueurs d'onde de 400 à 1100 nm, conduisant à une amélioration remarquable de l'efficacité globale.

## **Introduction générale**

---

Notre mémoire a été structurée en quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré à le fonctionnement général d'une cellule solaire en couches minces, l'histoire de l'énergie photovoltaïque, les filières technologiques associées et le principe de fonctionnement d'une photopile.

Le deuxième chapitre, nous introduisons les cristaux photoniques et leurs différents types.

Dans le troisième chapitre, on va présenter le logiciel Rsoft CAD et en particulier les modules DiffractMOD et FullWave. Le développement des méthodes de modélisation optique précise et rapide reste donc primordial pour l'étude de ces structures.

Dans le quatrième chapitre, on va présenter une étude et la conception d'une structure de piégeage de la lumière afin d'améliorer considérablement l'efficacité des cellules.

## Chapitre I

### Les cellules photovoltaïques

#### I.1 Introduction

On distingue plusieurs types des sources d'énergies renouvelables Parmi ces énergies l'énergie solaire photovoltaïque (PV) est la seule source d'énergie qui peut fournir de l'énergie de l'échelle de milliwatts à plusieurs mégawatts à partir d'une technologie modulaire. L'énergie photovoltaïque est la plus jeune de l'énergie renouvelable Elle est en outre, élégantes, non polluante, silencieuse et sans pièces rotatives. Cette énergie est l'énergie électrique produite de la conversion directe du rayonnement solaire à l'aide des cellules solaires photovoltaïques [1].

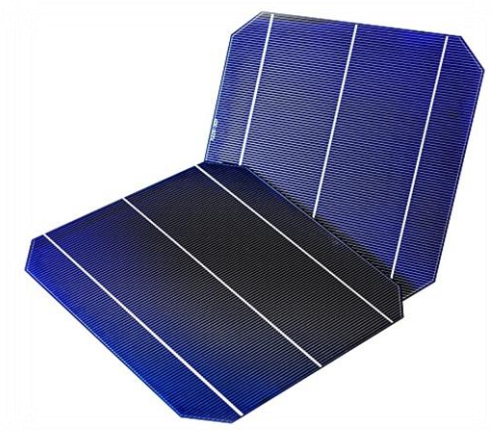
#### I.2 Les cellules solaires photovoltaïques

##### I.2.1 Définition

Cellule solaire et photopile sont des termes équivalents qui désignent généralement des capteurs de petite taille, utilisés soit tels quels soit en assemblage dans un panneau solaire ou module photovoltaïque, ce dernier terme est un composant composée de matériau semi-conducteur qui convertie l'énergie qui produit de l'électricité lorsqu'il est exposé à la lumière [2]. Les cellules photovoltaïques sont constituées :

- D'une fine couche semi-conductrice (matériau possède une bande interdite, qui joue le rôle de la barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne.
- D'une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.
- D'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode.

- Les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement [3].



**Figure I.1** : Cellules solaires photovoltaïques [5].

### I.2.2 Historique

- En 1839, Antoine-César Becquerel constate les effets électriques que produisent les rayons solaires dans une pile.
- En 1905, Einstein découvrit que l'énergie de ces quanta de lumière est proportionnelle à la fréquence de l'onde électromagnétique.
- L'utilisation des cellules solaires débute dans les années quarante. Le domaine spatial a besoin d'une énergie sans combustible embarqué. La recherche s'intensifie sur le photovoltaïque.
- La première cellule solaire P-N à base de silicium monocristallin a été réalisée par Chapin, Fuller et Pearson dans les laboratoires Bell en 1954. Le rendement était de 6 % mais fut rapidement augmenté à 10%.

C'est dans les années soixante-dix avec la crise énergétique, que les cellules solaires ont connu leurs premières applications terrestres [1].

### I.3 L'absorption de la lumière

La lumière se compose de photons ; «grains de la lumière », chacun porteur d'une énergie dépendant de sa longueur d'onde (ou couleur du rayon). Ces photons peuvent pénétrer dans certaine matière même passée au travers :

Les objets transparents pour notre oeil laissent passer la lumière visible. Plus généralement, un rayon lumière qui arrive sur un solide peut subir trois événements optiques :

- ❖ Absorption : la lumière pénètre dans l'objet et n'en ressort pas l'énergie est restituée sous une autre forma.
- ❖ Réflexion : la lumière est renvoyée par la surface de l'objet.
- ❖ Transmission : la lumière traverse l'objet [4].

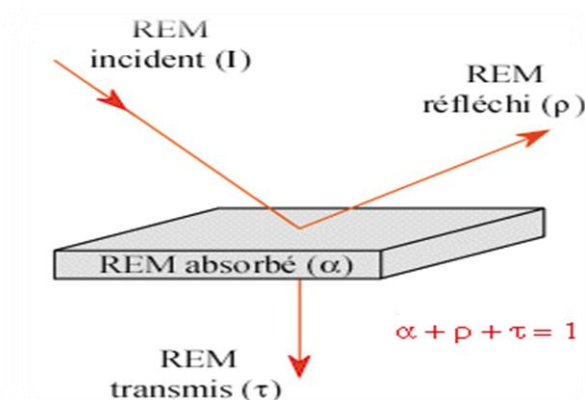


Figure I.2 : Réflexion, Transmission et Absorption [4].

#### I.3.1 La conversion photovoltaïque

La conversion d'énergie photovoltaïque met en jeu trois phénomènes physique, intimement liés et simultanés :

- L'absorption de la lumière dans le matériau.
- Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques.

- La collecte des charges.

Il est donc clair qu'un matériau doit avoir des propriétés optiques et électriques spécifiques pour permettre la conversion photovoltaïque [5].

### **1.3.2 Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire**

Trois phénomènes physiques de base traduisent le fonctionnement d'une cellule solaire:

#### **1.3.2.1. L'Absorption des photons**

Dont l'énergie est supérieure au gap par le matériau constituant le dispositif ( $h\nu > E_g$ ).

#### **1.3.2.2. La Création de paires électrons/trous**

Les photons incidents créent des paires électrons-trous dans chacune des régions N,P et ZCE. Le comportement de ces porteurs libres diffère suivant le lieu de leur création.

##### **a). Dans les régions électriquement neutres P et N**

Les photoporteurs minoritaires diffusent, ceux qui atteignent la zone de charge d'espace sont propulsés par le champ électrique vers la région où ils deviennent majoritaires. Ces photoporteurs contribuent donc au courant par leur diffusion, ils créent un photo courant de diffusion.

##### **b). Dans la zone de charge d'espace ZCE**

Les paires électrons-trous créées par les photons sont dissociées par le champ électrique ; L'électron est propulsé vers la région de type n, Le trou vers la région de type p. Ces porteurs donnent naissance à un photo courant de génération.

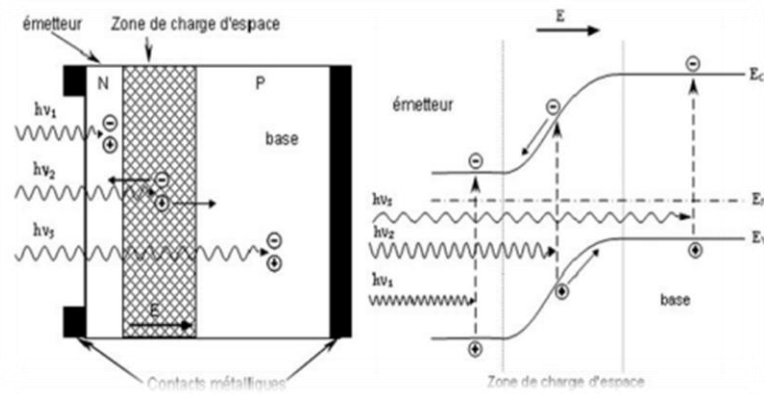


Figure I.3 : a) Photogénération dans la cellule solaire b) Diagramme d'énergie [6].

### 1.3.2.3. La Collecte

Sans perte des porteurs créés en le séparant par le champ interne du dispositif (champ jonction ou hétérojonction) dans un circuit électrique extérieur, en reliant les cotés de la jonction à une charge \$R\_c\$, un courant \$I\$ la parcourt et une différence de potentiel apparaît:

$$I = I_{ph} - I_d(v) \quad (1.1)$$

$$I = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{qv}{kT}\right) - 1 \right] \quad (1.2)$$

\$I\_s\$ : le courant de saturation

\$I\_{ph}\$ : le courant de court circuit généré par la lumière

\$I\_d(V)\$ : courant d'obscurité de la diode

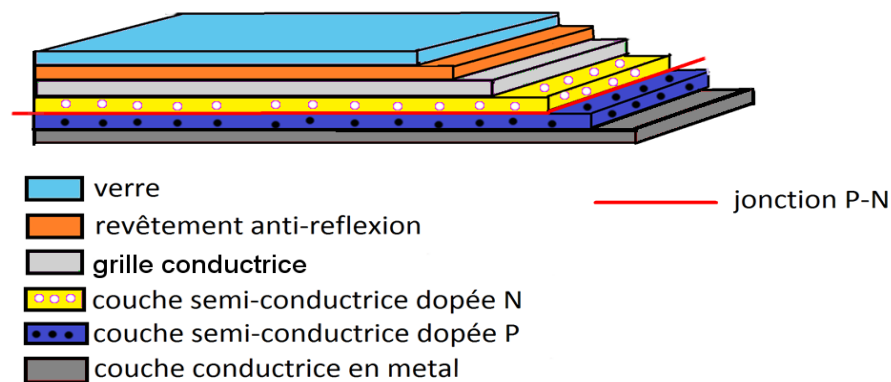
La différence potentiel de contact constitue une barrière d'énergie potentielle donnée par :

$$V_d = \left(\frac{k.T}{q}\right) \ln\left[\frac{N_d.N_a}{n_i^2}\right] \quad (1.3)$$

En l'absence d'une polarisation externe, existe un champ électrique interne qui s'oppose au mouvement des porteurs majoritaires mais qui accélère les minoritaires. Il existe au niveau de la jonction une barrière de potentiel dont la hauteur est la différence entre les niveaux d'énergie des accepteurs et des donneurs [6].

### I.3.3 Structure des cellules solaires

Une cellule photovoltaïque est constituée de plusieurs couches. On trouve au centre de cette cellule, une couche avec porteurs de charges libres négative (N) en contact avec une autre couche avec porteurs de charges libres positives (P). De part et autre du cœur de la cellule, on a une couche conductrice (K) autrement dit une grille métallique, puisqu'il faut que cette couche soit conductrice et ne subisse pas des phénomènes de corrosion.



**Figure I.4 :** Structure d'une cellule photovoltaïque [7].

On a donc une couche qui sert de cathode (pôle +) recouvrant la couche semi-conductrice dopée N et une couche qui joue le rôle de l'anode (pôle -) en dessous la couche semi-conductrice P. Aussi le silicium est très réflecteur, on place donc un revêtement anti-réflexion sur le dessus de la cellule. Enfin on trouve une couche de verre qui protège la cellule. Ces couvertures de protections sont indispensables car la cellule est très fragile. L'épaisseur totale de la cellule est de l'ordre du millimètre. Pour finir, on relie les cellules entre elles, constituant alors le panneau solaire, afin d'obtenir une puissance suffisante.

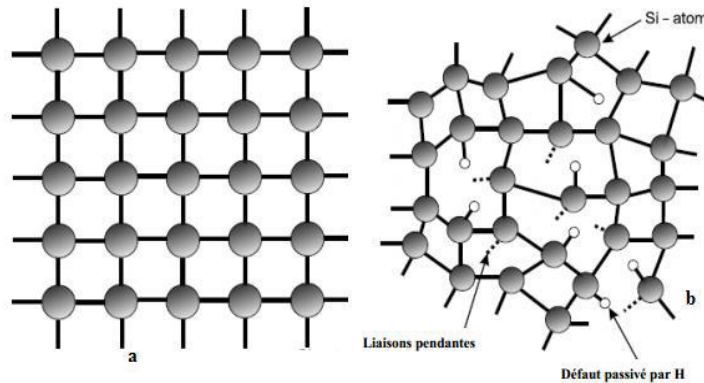
Pour la fabrication de cellules photovoltaïques, on utilise actuellement avant tout du silicium, car c'est le second élément le plus courant sur terre et donc bon marché à valoriser. En plus du silicium, d'autres éléments, comme le cuivre, le gallium ou le cadmium, trouvent leur utilisation dans le photovoltaïque [7].

## I.4 Silicium et dépôt de silicium utilisé dans les cellules solaires

### I.4.1 Propriétés photovoltaïques du silicium

Le silicium est le matériau semi-conducteur le plus utilisé dans la technologie dominante photovoltaïque pour la production des cellules solaires. Car le silicium est le deuxième élément chimique le plus abondant dans la croûte terrestre puisqu'il représente environ 27% de sa masse. Il fait partie de la famille des cristallogènes. Il existe dans deux types principaux d'état solide, l'état dans lequel l'arrangement des atomes est aléatoire « amorphe » et celui dans lequel les atomes sont arrangés régulièrement aux nœuds d'un réseau « cristallin », il est aisé de modifier les propriétés électrique du silicium en introduisant dans la matrice des atomes dopants tels que le Bore (induisant un dopage de type p) ou le phosphore (induisant un dopage de type n).

D'un point de vue photovoltaïque, le seul inconvénient du silicium réside dans sa structure électronique qui présente un gap indirect (1,12 eV) et qui ne correspond donc pas exactement au maximum d'intensité du spectre solaire [8].



**Figure I.5:** (a) Structure cristalline du silicium, (b) Structure amorphe du silicium [9].

### I.4.2 Cellules solaires à base de silicium amorphe

#### I.4.2.1 Propriétés générales

Le silicium amorphe a une structure tétraédrique comme le cas du silicium cristallin mais il présente des distorsions aléatoires. Les défauts sont également présents sous forme d'atomes de silicium qui ont seulement trois liens covalents avec des voisins. Le quatrième lien non satisfait

s'appelle liaison pendante. La concentration des liaisons pendantes dans le silicium amorphe non hydrogéné est de l'ordre de  $10^{19}$  à  $10^{20}\text{cm}^{-3}$ . Ces liaisons pendantes créent des états électroniques dans la région centrale du gap qui rendent le matériau difficilement utilisable pour des applications électroniques [9]. On trouve des atomes de silicium avec un électron célibataire d'où la liaison pendante qui peut constituer un piège à électron comme elle peut constituer un piège à trous. Ces défauts créent des états dans le milieu du gap qui rendent le dopage inefficace et donc ce matériau inutilisable pour des applications en microélectronique. Heureusement, ces liaisons pendantes peuvent être passivées par l'hydrogène, ce qui permet de réduire la densité de défauts de  $10^{15}$ - $10^{16}\text{cm}^{-3}$  et de redonner aux matériaux ses propriétés semi-conductrices. C'est pourquoi on nomme ce matériau silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H) [10].

#### I.4.2.2 Dépôt du silicium amorphe

Le silicium amorphe a été préparé la première fois au milieu des années 60 par la technique d'évaporation thermique et pulvérisation. Mais, le matériau était fortement défectueux, difficile à doper, et en général peu convenable pour des applications des cellules.

Des indications que la règle de Mott [11] sur l'insensibilité du dopage des semi-conducteurs amorphes ne peut être strictement obéi dans le silicium amorphe, cela a été prouvé la première fois dans le travail de Chittick en 1969 [12] qui étaient également les premiers préparateurs des films du a-Si par "glow discharge" à partir de du  $\text{SiH}_4$  (monosilane). Bien que ces films aient montré la photosensibilité significative, ils étaient très instables. Il a été découvert plus tard que le a-Si préparé par "glow discharge" par décomposition du gaz  $\text{SiH}_4$  avec un pourcentage de 10-15% d'  $\text{H}_2$  lié et qui passive une fraction significative des liaisons pendantes, réduit ainsi sa densité de défaut. Ce matériau est nommé silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H). La percée a été atteinte par le groupe de Spear, 1975 [13] ; qui a montré, par mesure de l'effet de champ que la "glow discharge" du a-Si:H, peut être préparé avec une faible concentration de défaut ( $10^{16}$ - $10^{17}\text{cm}^{-3}$   $\text{eV}^{-1}$ ) et a démontré que par l'addition de phosphine ( $\text{PH}_3$ ) ou diborane ( $\text{B}_2\text{H}_6$ ) respectivement, le a-Si:H type n et type p, peuvent être obtenus avec une conductivité à température ambiante aussi hautes que  $10^{-2}$  ( $\text{cm}^{-1}$ ) et lui étaient possibles de déplacer le niveau de Fermi dans le gap à cause de la basse densité de défaut, qui est demeurée piégé tellement longtemps au milieu du gap, en raison de la densité très élevée de défauts.

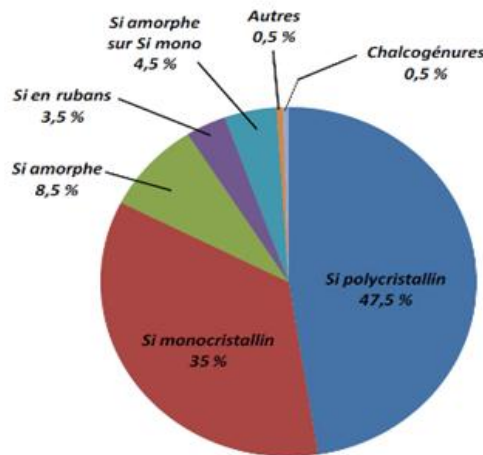
Dans le a-Si non hydrogéné, presque en même temps, Carlson et Wronski a prévu que le dopage est possible seulement quand la densité de défaut < densité du dopant. La fabrication des premières cellules solaires du a-Si:H avec un rendement de 2 à 2,5% employant ces matériaux ont été annoncés par Carlson en 1976 [14]. Ceci a mené aux activités intenses de recherches en cellules solaires de silicium amorphes.

### 1.5. Différentes filières technologiques des cellules photovoltaïques

On va citer dans ce paragraphe les différentes filières technologiques des cellules photovoltaïques

#### 1.5.1 Le silicium

La filière silicium représente actuellement 99% du marché des modules photovoltaïques comme le montre la figure 1. 6. Il est l'un des éléments les plus abondants sur Terre parfaitement stable et non toxique. On trouve plusieurs technologies pour le photovoltaïque silicium détaillées ci-après ; d'une part les cellules à base de silicium massif (monocristallin, polycristallin, rubans) dites de première génération, et qui constituent à l'heure actuelle l'essentiel des modules photovoltaïques commercialisés et d'autre part la technologie à base de silicium en couche mince [6].



**Figure I.6 :** Répartition des matériaux sur le marché mondial du photovoltaïque [6].

**a). Silicium monocristallin**

Le silicium monocristallin est difficile à obtenir. En effet, il nécessite un taux de pureté très élevé et donc plusieurs étapes de purification. Les cellules monocristallines ont un taux de rendement excellent (16 à 24%) mais leur méthode de production est laborieuse et délicate, et donc, très chère ; il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir du cristal pur [15]

Il existe deux méthodes par lesquelles il est possible d'obtenir du silicium monocristallin de qualité microélectronique mais nécessitant cependant une dépense d'énergie considérable, proche du MWh. Les siliciums obtenus sont appelés Cz (méthode Czochralski) et FZ (Float Zone), et permettent d'obtenir des rendements de conversion recorde en laboratoire de l'ordre de 25% pour des cellules de 4 cm<sup>2</sup> (Université de New South Wales, Australie) soit supérieurs de huit points à ceux de l'industrie.

Les inconvénients de cette technologie sont les rendements faibles obtenus sous un faible éclairage et surtout le coût prohibitif de production des matériaux [6].

**b). Silicium polycristallin**

Le silicium multi cristallin (Polycristallin) est devenu aujourd'hui la technologie la plus utilisée. A-t-elle seule elle représente près de 50% du marché. Les cellules polycristallin ont un coût de production moins élevé et un rendement qui varie entre 14 à 18% [15].

**c). Silicium amorphe**

Les cellules à base de silicium amorphe sont basées sur l'empilement de base constitué par une couche de type p, une couche non dopée dite intrinsèque et notée i, et une couche de type n.

Ces structures pin sont déposées directement sur le support à basse température (200 C<sup>0</sup> ou moins) à partir de la méthode de dépôt chimique en phase vapeur assistée par plasma (appelée PE-CVD pour plasma enhanced-CVD), par décomposition du gaz silane (SiH<sub>4</sub>). Il s'agit de technologies largement similaires à celles utilisées dans le domaine des écrans plats. Les cellules solaires au silicium amorphe, à l'origine cantonnées dans des marchés de niches (exemple : calculettes) ont élargi leur champ d'application dans le domaine des modules souples que l'on

peut déployer sur les grandes toitures, fabriqués par les technologies en rouleau (roll to roll) sur des supports plastiques ou métalliques, et dans celui des supports verre de grande surface pouvant aller jusqu'à près de 5,7 m<sup>2</sup> d'un seul tenant.[16]

L'avenir des couches de silicium amorphe passera probablement, par un mariage avec le silicium cristallin. En effet, les hétéro structures à base de silicium amorphe/silicium cristallin (structure HIT de Sanyo présentent des rendements de laboratoire de plus de 21% et de 16% en production industrielle [6].

## **I.5.2 Cellules en couches minces**

### **I.5.2.1 Cellules à base de tellure de cadmium CdTe**

Les cellules à base de CdTe sont également basées sur la formation de jonction p-n mais cette fois-ci par la mise en contact de deux matériaux différents, on parle alors d'hétérojonction. La couche n est un semi-conducteur de grande bande interdite (le CdS avec l'énergie du gap  $E_g$  2,4 eV), qui laisse passer la lumière. On parle alors de couche fenêtre. Les photons sont ensuite absorbés dans la couche de CdTe de type p, appelée absorbeur. La valeur 1,45 eV de la bande d'énergie interdite du CdTe est idéalement adaptée au spectre solaire. En outre, son très grand coefficient d'absorption fait que la quasi-totalité du spectre est absorbée sur une profondeur de 2  $\mu\text{m}$  autorisant ainsi l'utilisation de matériaux relativement impurs, dont la longueur de diffusion des porteurs minoritaires ne dépasse pas quelques  $\mu\text{m}$ .

### **I.5.2.2 Matériaux à base de sélénure de cuivre indium gallium**

La fabrication des couches de CIS est plus complexe que celles du CdTe du fait de leur caractère ternaire, voire quaternaire (avec le gallium, CIGS), ce qui a nécessité une mise au point plus longue. La contrepartie positive de cette complexité est une grande flexibilité concernant l'optimisation des propriétés. On peut ainsi fixer de façon très modulable, non seulement le gap mais également les autres propriétés (affinité électronique, travail de sortie), en substituant partiellement l'indium avec du gallium, de l'aluminium ou le sélénium par du soufre. L'absorbeur est le CIGS et les couches fenêtres et d'OCT sont constituées de sulfure de cadmium, zinc ou indium (en substitution potentielle du cadmium) et d'oxyde de zinc, dopé aluminium, tandis que le contact arrière est constitué par une couche de molybdène.

### I.5.3 Les cellules III-V multi-jonctions

Utilisant actuellement majoritairement des alliages dérivés de l'arséniure de gallium GaAs (dits III-V). Comme montre la figure I-7 :

- ✓ une première jonction à grande bande interdite permet de convertir efficacement les photons UV en minimisant les pertes par thermalisation.
- ✓ une seconde jonction située immédiatement derrière possède un gap plus petit et convertit alors de façon optimale les photons visibles qui traversent la première jonction.
- ✓ une troisième jonction à petit gap convertit les photons infrarouges.



**Figure I.7 :** Vue schématique de la composition de la cellule à multijonction [16].

### I.5.4 Les cellules nanocristallines à colorant ou cellules de Gratzel

Pour les cellules à colorants, il s'agit d'une matrice poreuse inorganique, fonctionnalisée par le greffage de colorants photoactifs à l'échelle de la monocouche moléculaire et imprégnée par un électrolyte liquide contenant un couple oxydoréducteur permettant de communiquer « électriquement » avec la molécule de colorant.

Le système de référence est constitué d'une couche d'oxyde de titane (TiO<sub>2</sub>) frittée dont les particules sont de taille nanométrique, une molécule de colorant à base de ruthénium et un électrolyte non aqueux (acétonitrile) contenant le couple redox iode-iodure.

### I.5.5 Les cellules photovoltaïques organiques

Une des filières émergentes est celle des cellules tout organique. Dans ce cas, on se sert de la propriété semi-conductrice de certains polymères, permettant ainsi de créer des jonctions analogues aux jonctions p-n, et donc d'en faire des cellules solaires. Le saut a été franchi avec l'idée de mélanger intimement deux matériaux organiques permettant ainsi aux excitons (paires électron-trou créées lors de l'excitation lumineuse) d'être plus facilement séparés aux nombreuses interfaces. Le concept de cellules organique à jonction interpénétrée était né (BulkHeterojunction). Le système de base montré sur la figure I-7 est celui où le donneur est constitué par des molécules de fullerène fonctionnalisées et l'accepteur est un polymère dérivé du polythiophène [16].

Dans ce tableau on va présenter les différentes technologies photovoltaïques :

Type	Rendement cellule (en labo)	Module (en labo)	Module (commercial)	Niveau de développement
<b>1<sup>ère</sup> génération</b>				
Silicium monocristallin	24,70%	22,70%	12-20%	Production industrielle
Silicium polycristallin	20,30%	16,20%	11-15%	Production industrielle
<b>2<sup>ème</sup> génération</b>				
Silicium amorphe	13,40%	10,40%	5-9%	Production industrielle
Silicium cristallin en couche mince		9,40%	7%	Production industrielle
CIS	19,30%	13,50%	9-11 %	Production industrielle
CdTe	16,70%		6-9%	Prêt pour la production
<b>3<sup>ème</sup> génération</b>				
Cellule organique	5,70%			Au stade de la
Cellule de Grätzel	11%	8,40%		Au stade de la
Cellules multi-jonctions	39%	25-30%		Au stade de la recherche, production

**Tableau I.1** : Les différentes technologies photovoltaïques [16].

## I.6 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

### I.6.1 Avantages

- Une haute fiabilité, les modules sont garantis durant 25 ans par la plupart des constructeurs.
- Les panneaux solaires ne comportent pas de pièces mobiles, ce qui les rend particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de leur utilisation sur les engins spatiaux.
- Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits, et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique, car le produit final est non polluant, peu de déchet, pas de ligne électrique supplémentaire et pas de nuisance sonore.

### I.6.2 Inconvénients

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- L'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible.
- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs Diesel que pour de faibles demandes d'énergie en régions isolées [17].

## I.7 Ce qu'attend de la photovoltaïque

Source d'énergie 100% propre et faible pour des usages très variés, elle figurera à l'avenir parmi les principales sources mondiales. Son handicap majeur reste un coût encore élevé comparée aux sources conventionnelles et aux filières renouvelables.

Ce coût diminue de 10% par an, et pour accélérer cette baisse, les autorités nationales et internationales doivent engagés une politique de soutien à long terme de la filière photovoltaïque. C'est précisément l'objectif des programmes lancés depuis quelques années dans plusieurs pays industrialisés. Dans notre pays, l'application du PV reste encore modeste. La première utilisation été dans le domaine des télécommunications. Après, certain puits dans les hauts plateaux ont été équipés par des systèmes de pompes PV.

A nos jours, quelques dizaines de village saharien de la région de Tamanrasset et Adrar jouissent des avantages de cette source d'énergie.

## **I.8 Secteurs d'applications**

### **a). Domaine spatial**

C'est de loin le secteur le plus ancien puisque les premières utilisations de cellules solaires pour des engins spatiaux (satellites, navettes,...) remontent aux années soixante.

Depuis lors, des recherches et développements nombreux ont été réalisés dans le domaine militaire (NASA aux Etats-Unis) et public (ESA en Europe) pour accroître les performances électriques tout en réduisant le poids des modules.

### **b). Habitation isolée**

L'approvisionnement en électricité dans les régions rurales isolées est un problème d'actualité, en particulier dans les pays en voie de développement. L'extension du réseau pour des demandes relativement faibles et isolées n'est pas rentable pour les sociétés d'électricité.

De nombreuses organisations internationales d'aide aux pays en voie de développement ont choisi la technologie photovoltaïque comme outil de développement social et économique pour fournir des services de base à la population, tels que:

- Le pompage de l'eau pour la consommation du village ou pour l'irrigation, la réfrigération pour la production de glace et la conservation de vaccins, sang, produits agricoles,...,
- l'éclairage (lampe portative, éclairage public, électrification villageoise, ...)

### **c). Industrie isolée**

Beaucoup d'applications professionnelles exigent une source d'électricité hautement fiable, autonome, sans entretien et sans combustible. Le générateur photovoltaïque est de loin l'option la plus séduisante; on l'utilise avec succès dans les télécommunications (stations relais pour TV, radio, téléphonie, émetteur-récepteur,...), mais aussi pour d'autres applications telles que:

- protection cathodique,
- systèmes silencieux ou sans vibration,
- éclairage, balises et signaux pour la navigation,
- équipement de monitoring,
- télémétrie, etc.

**d). Centrale de puissance**

Avec les applications photovoltaïques connectées au réseau d'électricité national, une nouvelle tendance se dégage; elle est caractérisée par un fort potentiel de diffusion dans les pays industrialisés. La plupart des projets utilisent des champs de capteurs plans, mais on expérimente aussi les systèmes à concentration dans les régions riches en rayonnement direct. Lorsque la pointe de la demande est en phase avec l'ensoleillement, la centrale photovoltaïque connectée au réseau permet de fournir les pointes. C'est le cas dans le sud des E.U. où la demande est maximum aux heures les plus ensoleillées à cause du conditionnement d'air omniprésent.

**e). Résidence urbaine**

Le générateur photovoltaïque connecté au réseau est aussi envisagé en zone urbaine avec l'installation de modules sur les toits et façades de bâtiments.

La façade photovoltaïque suscite beaucoup d'enthousiasme en Europe et aux E.U. le recouvrement des façades de bâtiments commerciaux - où la consommation est essentiellement diurne - correspondent mieux aux heures d'ensoleillement. L'orientation verticale (ou quasi) peut être avantageuse dans nos régions de haute latitude pour rehausser la production au creux de l'hiver. Cependant, l'apport énergétique d'une façade recouverte de modules photovoltaïques risque d'être assez négligeable par rapport aux consommations de bâtiments commerciaux. En réalité, l'enthousiasme découle du fait que le revêtement à l'aide de panneaux solaires photovoltaïques reviendrait pratiquement au même prix qu'un recouvrement à l'aide de matériaux classiques.

**f). Biens de consommation**

L'électronique moderne requiert de très petites puissances - du milliWatt à la dizaine de Watt de sorte que beaucoup de petits appareils peuvent être alimentés par une petite surface de cellules photovoltaïques. Les calculatrices et les montres sont de loin les applications les plus connues. Les chargeurs de batteries, radios, lampes de poche, luminaires de jardin, systèmes d'alarme, jouets, fontaines, tondeuses à gazon, etc., sont d'autres exemples et cette liste n'est pas limitative.

La plupart de ces mini-générateurs photovoltaïques utilisent des cellules au silicium amorphe, bon marché et mieux appropriées aux faibles illuminations et petites puissances. Ils constituent une alternative très intéressante aux piles qui comportent des risques divers de contamination de l'environnement par les métaux lourds principalement. Le Japon est le principal producteur et consommateur de ces articles.

**I.9 Conclusion**

Pour conclure, on peut dire que la conversion photovoltaïque peut se substituer à toute autre source de courant extérieur mais pour de grandes puissances, elle sert surtout d'appoint facile, utile mais pas toujours. La solution économique photovoltaïque est donc assez intéressante mais freinée par des investissements nécessaires trop importants. (L'avenir semble brille) à la filière solaire à couche mince de a-Si: H en ce qui concerne l'amélioration de ses principaux défauts.

## Chapitre II

### Les cristaux photoniques

#### II.1.Introduction

Les propriétés optiques des structures périodiques peuvent être observées dans tout le monde naturel, des couleurs changeantes d'une opale tenue à la lumière en passant par les motifs sur les ailes d'un papillon. La nature exploite les cristaux photoniques depuis des millions d'années [18], mais les humains n'ont commencé que récemment à réaliser leur potentiel. Des structures périodiques unidimensionnelles sous forme d'empilements de couches minces ont été étudiées depuis de nombreuses années [19], mais le cristal photonique tridimensionnel a été proposé pour la première fois par Yablonovitch [20], et John en 1987 [21].

Yablonovitch a proposé que les structures diélectriques périodiques tridimensionnelles pourraient présenter une bande interdite électromagnétique - une gamme de fréquences à laquelle la lumière ne peut se propager à travers la structure dans aucune direction.

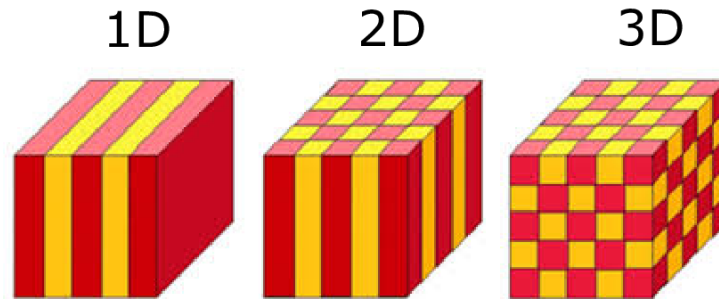
A partir de ce constat et des propositions initiales pour limiter l'émission spontanée, le concept de contrôle de la lumière avec des structures périodiques s'est rapidement développé pour devenir un sujet de recherche mondial.

Les bandes interdites dans les matériaux périodiques étaient déjà bien comprises dans la physique du solide, où la présence de bandes interdites électroniques dans les semi-conducteurs a révolutionné l'électronique. De nombreux concepts de la recherche sur l'état solide ont été transférés aux cristaux photoniques, y compris la notation et la nomenclature, et c'est peut-être ce qui a permis au domaine de faire des progrès aussi rapides en moins de vingt ans [22].

#### II.2. Définition de cristaux photonique

Les cristaux photoniques sont des structures périodiques dont le motif du réseau est composé de matériaux diélectriques ou de métallos diélectriques ou de la combinaison des deux et cela dans de multiples configurations : unidimensionnelle (1D), bidimensionnelle (2D) ainsi que tridimensionnelle (3D) (Figure I.1). Les cristaux photoniques ouvrent la voie à la réalisation de nombreuses fonctions optiques grâce aux possibilités de confinement de la lumière qui

pourraient révolutionner la fabrication des circuits intégrés optoélectroniques. La majorité des applications des cristaux photoniques repose sur leur bande interdite photonique. Il est nécessaire d'introduire des défauts dans la structure périodique afin de disposer d'une fréquence permise dans la bande interdite [23].



**Figure II.1:** Représentation schématique d'un cristal photonique 1D, 2D et 3D [24].

### II.3. Les cristaux photoniques naturel

La capacité de manipuler et de contrôler la lumière est l'un des principaux objectifs de l'optique moderne. Cependant, c'est aussi quelque chose que la nature a perfectionné il y a longtemps. Lorsqu'il s'agit de systèmes optiques très avancés, il semble qu'il n'y ait pas d'ingénieur plus expérimenté que la nature elle-même [25].

#### II.3.1. Les opales

Une opale est un exemple de cristal photonique naturel. Lorsqu'une opale est observée, une variété de couleurs est vue en raison de la structure de la silice qui compose l'opale. Dans une opale, la silice est essentiellement agencée sous forme de petites sphères dans un agencement régulier étroitement tassé comme celui ci-dessous. L'espacement entre ces sphères de silice est d'environ 150 à 300 nanomètres, soit environ la longueur d'onde de la lumière visible. En raison de cet espacement, la lumière peut interférer et se diffracter lorsqu'elle traverse la structure. Les couleurs observées sont dues à l'angle d'observation par rapport à la structure de l'opale. Cela signifie que lorsque l'opale est tournée, le même endroit peut prendre différentes couleurs en fonction de la façon dont la lumière interagit avec la structure [26].

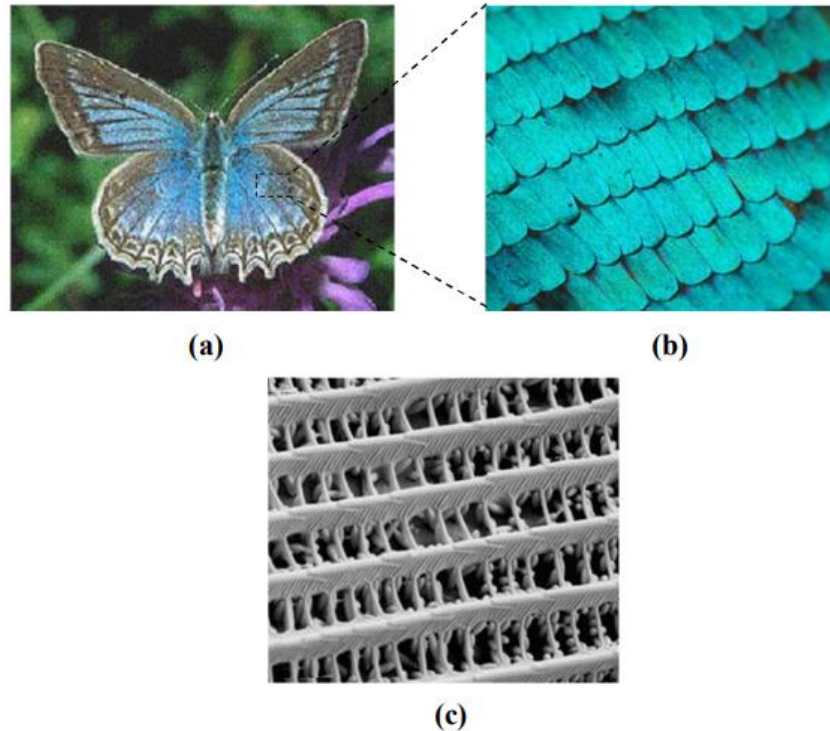


**Figure II.2 :** Image d'une opale [26].

### II.3.2. Les papillons

Il est possible de trouver dans la nature les papillons, qui sont parmi les insectes les plus colorés. Il est démontré qu'ils dépendent énormément de la lumière d'où les couleurs particulières des ailes de ces derniers. Elles sont engendrées par l'interférence entre la lumière environnante et la micro-structuration de leurs ailes [27].

Sur la figure I.2 une étude au microscope des ailes a montré que ces derniers étaient composés d'écailles dont les paramètres varient continuellement et périodiquement. En effet, il se trouve que celle-ci représente une forme du cristal photonique à bande interdite photonique. En effet, ce type de structure naturelle est capable de réfléchir la lumière pour des longueurs d'onde spécifiques dans des différentes directions [28].



**Figure II.3** : (a) Photographie d'un papillon morpho, (b) Les images et (c) Présentent l'agrandissement par microscope d'une aile de papillon [28].

### II.3.3. Les oiseaux

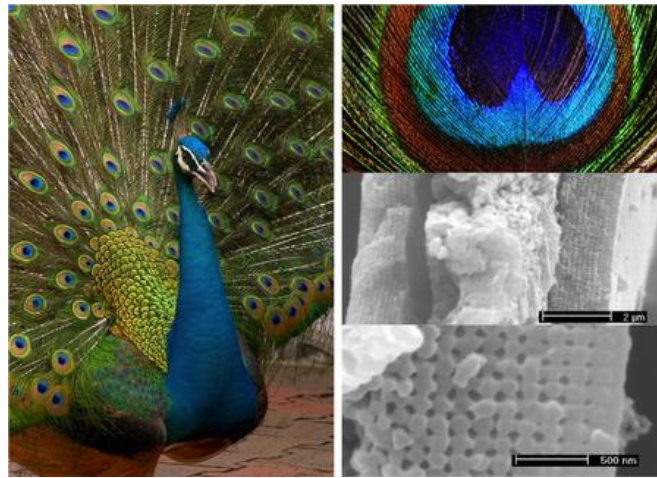
Une des caractéristiques les plus admirables des oiseaux est leurs couleurs. Elles leur permettent d'affirmer leur identité. Pour produire une telle couleur, ils emploient la technologie structurale des plumes et leurs pigments dans leurs pièces de corps [29].

Les pigments et la structure périodique des plumes contribuent à l'absorption et la diffraction de la lumière. Les couleurs pigmentaires sont liées au phénomène d'absorption. En effet, les pigments absorbent une partie de la lumière solaire et renvoient d'autres couleurs vers l'œil. À ces couleurs « pigmentaires » s'opposent les couleurs structurales, qui naissent de la diffraction du rayonnement lumineux par des microstructures des plumes. Alors que les couleurs pigmentaires sont stables, les couleurs structurales varient souvent selon l'incidence de la lumière. En effet quand on observe une plume de paon au microscope, on voit que toutes les couleurs naissent dans les barbules des plumes. Les barbules sont des lames étroites faites d'une

succession de petites cuvettes séparées par un seuil transversal. Au fond de ces cuvettes se trouvent de minces lamelles parallèles.

On peut considérer ces lamelles comme des miroirs réfléchissant la lumière incidente. On peut alors rapprocher l'étude de ce phénomène de l'étude d'un cristal photonique unidimensionnel.

On peut en déduire que l'intensité réfléchiée par la plume dépend de la longueur d'onde et de l'angle d'observation d'où la sensation de ruissellement de couleur sur les plumes du paon [30].



**Figure II.4 :** Une vue microscopique d'une structure de cristal photonique naturel d'une plume du paon [31].

#### II.4. Les bandes interdites photonique (BIP)

Les matériaux à bande interdite photonique (BIP) ou les cristaux photoniques (CP) sont des matériaux avec un profil diélectrique périodique, qui peuvent empêcher la lumière de certaines fréquences ou longueurs d'onde de se propager dans une, deux ou un certain nombre de directions de polarisation dans les matériaux. Cette gamme de fréquences est similaire à une bande interdite électronique ; ainsi, on l'appelle souvent une bande interdite photonique. Comme le montre la figure I.5, les matériaux BIP peuvent être un (1D), deux (2D) ou en trois dimensions (3D). La structure de réseau de Bragg est le BIP unidimensionnel le plus connu. Comme une bande interdite électronique, le BIP est causé par un réseau ou une structure cristalline.

L'échelle du réseau de BIP est de l'ordre de la longueur d'onde de la lumière (0,1–2 mm), plutôt que de l'ordre des atomes [32].

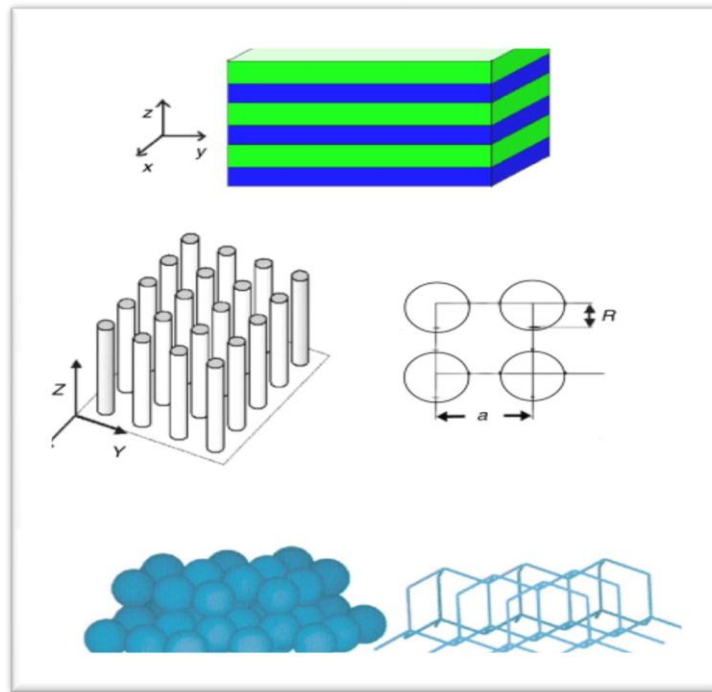


Figure II.5 :1D,2D, et 3D bande interdite structure [32].

### II.5.L'analogie Photon-Electron

L'analogie entre les équations de propagation de l'électromagnétisme et l'équation fondamentale de la mécanique quantique rend aisée son étude dans le domaine optique ou dans celui des ondes millimétriques.

Cette analogie permet de comprendre les diverses propriétés optiques des matériaux et notamment les cristaux photoniques des différentes dimensions [30].

#### 1) Étude électromagnétique

La plupart des phénomènes électromagnétiques se produisant dans les métaux sont bien décrits dans l'électrodynamique classique basée sur les équations macroscopiques de Maxwell. Celles-ci les équations supposent l'utilisation de la moyenne statistique (sur un ensemble de l'équivalent système) champs électriques et magnétiques [33] :

$$\begin{cases} \text{div} \vec{H} = 0 & \text{Maxwell Faraday} \\ \text{div} \vec{D} = \rho & \\ \overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 & \text{Maxwell Ampère} \\ \overrightarrow{\text{rot}} \vec{H} - J - \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = 0 & \end{cases}$$

Maxwell Gauss magnétique

(II-1)

Maxwell Gauss électrique

Avec :  $\vec{E}$  et  $\vec{H}$  sont des champs électriques et magnétiques macroscopiques respectivement,  $\vec{D}$  et  $\vec{B}$  sont les inductions électrique et magnétique,  $\rho$  et  $J$  sont la densité de charge libre et la densité de courant respectivement, tels que on définit  $\vec{D}$  et  $\vec{B}$  comme suite :

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

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

On remplace (I-2) dans (I-1) et on considère que le milieu est sans sources (sans charge et sans courants) les équations de *Maxwell* devient :

$$\begin{cases} \text{div} \vec{H} = 0 & \overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} + \mu_0 \cdot \mu(\vec{r}) \frac{\partial H(\vec{r}, t)}{\partial t} = 0 \\ \text{div} \vec{E} = 0 & \overrightarrow{\text{rot}} \vec{H} - \varepsilon_0 \cdot \varepsilon(\vec{r}) \frac{\partial H(\vec{r}, t)}{\partial t} = 0 \end{cases} \quad (\text{II-3})$$

À partir des équations de *Maxwell Faraday* et *Maxwell Ampère* on détermine les équations de propagation du champ électrique et induction magnétique :

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

$$\vec{\nabla} \times \left( \frac{1}{\varepsilon(\vec{r})} \times \vec{\nabla} \times \vec{H}(\vec{r}) \right) = \left( \frac{\omega}{c} \right) \times \vec{H}(\vec{r})$$

(II-5)

Avec :

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \times \mu_0}}$$

(II-6)

Nous avons identifié  $\bar{\theta}$  comme l'opérateur différentiel qui est donné par :

$$\bar{\theta} \times \vec{H}(\vec{r}) = \left( \frac{\omega}{c} \right)^2 \times \vec{H}(\vec{r})$$

(II-7)

Avec :

$$\bar{\theta} = \vec{\nabla} \times \left( \frac{1}{\varepsilon(\vec{r})} \times \vec{\nabla} \right)$$

(II-8)

Ainsi le champ électrique  $\vec{E}$  et le champ magnétique  $\vec{H}$  peuvent s'écrire sous la forme exponentielle et peut être exprimé par [34] :

$$\vec{H}(\vec{r}, t) = \vec{H}(\vec{r}) e^{i\omega t}$$

(II-9)

(II-10)

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}(\vec{r}) e^{i\omega t}$$

## 2) Étude électrique

L'équation de Schrödinger est une équation aux dérivées partielles, c'est une loi fondamentale de la mécanique quantique qui décrit l'évolution de l'onde d'un électron en régime stationnaire dans un potentiel  $V(r)$  et peut être exprimé par :

$$H\psi = E\psi \quad (\text{II-11})$$

Avec :

$$H = -\frac{\hbar^2 \nabla^2}{2m} + V(r) \quad (\text{II-12})$$

$$E = \frac{p^2}{2m} + V(r) \quad (\text{II-13})$$

À partir des équations (I-11), (I-12) et (I-13) on trouve l'équation fondamentale de la mécanique quantique [35] :

$$\Delta\psi(r) + \frac{2m(E - v(r))}{\hbar^2} \psi(r) = 0 \quad (\text{II-14})$$

Avec :

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} \quad (\text{II-15})$$

## II.6. Caractéristique de cristaux photonique

Les cristaux photoniques sont caractérisés par plusieurs paramètres [36] :

- **La dimensionnalité**

Celle-ci est déterminée par la périodicité de l'indice de réfraction, la périodicité d'un CP peut s'étendre à une, deux ou trois dimensions (1, 2, 3D).

- **La symétrie**

La position des briques d'un CP détermine la symétrie du réseau. Par exemple, pour un CP 3D de particules sphériques une symétrie cubique, hexagonale compacte (hc) ou cubique à face centrée (cfc) peut être obtenue .

- **La topologie**

La topologie rend compte de l'architecture, de la compacité du matériau. Un réseau d'une symétrie donnée peut présenter des topologies différentes (cas de briques constitutives interpénétrées, en contact ou isolées) .

- **Le paramètre du réseau**

C'est la distance fondamentale entre deux briques constitutives. Il détermine la région spectrale où le CP interagit avec l'onde électromagnétique.

- **L'indice de réfraction effectif**

Il s'écrit simplement en fonction des indices de réfraction des deux matériaux composant le cristal, pondérés par les volumes respectifs occupés :

$$n_{eff} = \sqrt{(\varphi \cdot n_1 + (1 - \varphi) \cdot n_2)}$$

(II-16)

Où  $\varphi$  est la fraction volumique en briques élémentaires.

- **Le contraste d'indice de réfraction**

Ce paramètre est défini comme le rapport  $n_1/n_2$  entre les indices de réfraction des briques et de la matrice. Il offre une idée générale de la force de diffusion des deux matériaux composants du CP.

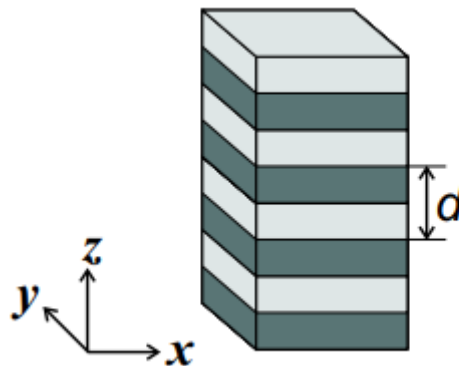
## II.7. Les types de cristaux photoniques

Les cristaux photoniques existent sous une multitude de formes. Il existe néanmoins trois principales catégories : unidimensionnel, bidimensionnel et tridimensionnel. Ces dimensions représentent le nombre de directions dans lesquelles il y a une périodicité de la constante diélectrique [37].

### II.7.1 Les cristaux photonique unidimensionnel

Le cristal photonique le plus simple consiste en une structure dont la constante diélectrique est périodique suivant une seule dimension (figure II.6). Ce milieu est constitué d'une alternance de couches d'électriques de permittivités différentes  $\epsilon_1$  et  $\epsilon_2$ . Cette structure porte le nom de miroir de Bragg,

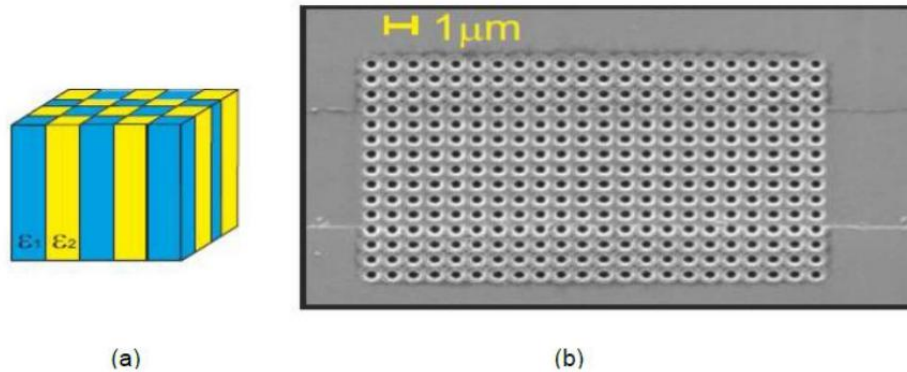
Pour décrire la propagation de la lumière dans un miroir de Bragg, considérons une onde plane qui se propage avec un vecteur  $\vec{k}$  à incidence normale. Le miroir de Bragg est constitué d'une alternance de couches d'épaisseurs  $a_1$  et  $a_2$  et de permittivités  $\epsilon_1$  et  $\epsilon_2$  ( $\epsilon_1 > \epsilon_2$ ). La période est  $a = a_1 + a_2$  dans la direction de l'empilement [38].



**Figure II.6:** Schéma d'un cristal photonique unidimensionnel constitué d'un empilement de couches diélectriques de période  $d$  [22].

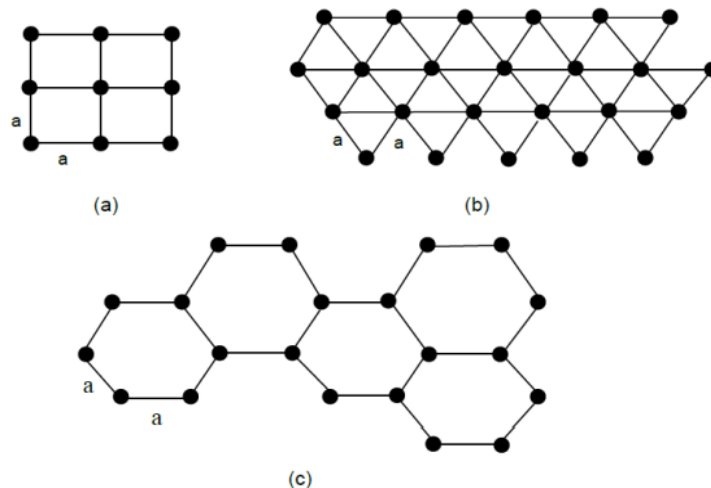
### II.7.2 Les cristaux photonique bidimensionnel

Un cristal photonique bidimensionnel est une structure qui présente une modulation périodique de la permittivité diélectrique suivant deux directions de l'espace, et homogène dans la troisième.



**Figure II.7:** (a) Cristal photonique 2D. (b) Matrice de trous d'air réalisée sur un substrat de Niobate de Lithium avec une période  $a = 825$  nm et un rayon  $r = 206$  nm

Les cristaux photoniques 2D se regroupent principalement suivant trois familles qui sont les réseaux carrés, triangulaires et hexagonal



**Figure II.8 :** Structures 2D : a) Structure carrée, (b) Triangulaire et (c) Hexagonale. Les propriétés optiques des structures bidimensionnelles sont fortement dépendantes de la polarisation de l'onde électromagnétique.

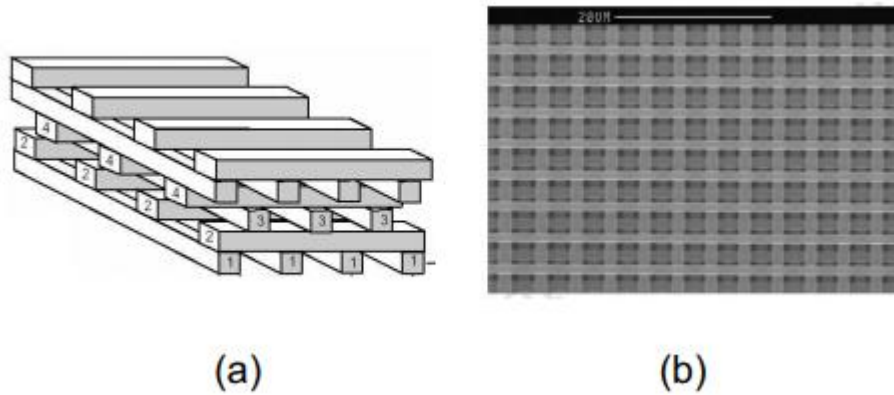
Il existe plusieurs façons de réaliser ces structures bidimensionnelles. Par exemple, on peut placer des tiges diélectriques dans l'air ou encore dans un autre diélectrique. Afin d'ouvrir des bandes interdites larges, il faut un contraste d'indice suffisamment grand. Un CP bidimensionnel peut aussi être constitué d'un ensemble de trous percés dans un diélectrique. Un CP 2D parfait est donc un cristal périodique dans le plan (O, X, Y) et infiniment long dans la direction (Oz) [39].

### II.7.3 Les cristaux photonique tridimensionnel

Les CP tridimensionnels se sont avérés être les structures CP les plus difficiles à fabriquer. Alors que la recherche 2D CP a tiré un avantage significatif de la technologie de traitement des couches minces et des semi-conducteurs 1D CP bien établie, comme le dépôt plasma et la lithographie par faisceau d'électrons, la fabrication de CP 3D a nécessité le développement de techniques entièrement nouvelles. Pour cette raison, il a fallu plus de trois ans après la proposition initiale de matériaux à bande interdite 3D [20, 21] pour qu'une structure soit calculée pour présenter une bande interdite pour toutes les directions et toutes les polarisations [40]. La conception consistait en des sphères diélectriques positionnées aux sommets d'un réseau de diamant. Diélectriques de contraste à haut indice.

Depuis ces premières études, une large gamme de géométries 3D CP présentant des bandes interdites complètes a été démontrée à la fois en théorie et en expérience.

Par exemple, un CP 3D « tas de bois » est illustré à la Fig. II.9. En raison des défis liés à la fabrication de structures de haute qualité avec des caractéristiques à l'échelle des longueurs d'onde optiques, les premières expériences sur les cristaux photoniques ont été réalisées à des fréquences micro-ondes et infrarouges moyennes [41-42]. Avec l'amélioration des méthodes de fabrication et de traitement des matériaux, des structures plus petites sont devenues réalisables, et en 1999 le premier CP 3D avec une bande interdite aux fréquences de télécommunications a été signalé [43]. Depuis lors, diverses géométries de réseau ont été signalées pour fonctionner à des fréquences similaires [44-45].



**Figure II.9** : Un exemple d'une structure de pile de bois 3D

(a) Schéma d'une pile de bois idéale CP. (b) Image SEM d'un vrai tas de bois 3D [41].

## II.8. Diagramme de bandes

Pour calculer les diagrammes de bandes il faut considérer pour chaque cristal, toutes les directions de propagation possibles. Comme en physique du solide, on montre que pour certaines symétries du cristal, on peut limiter l'étude aux vecteurs d'ondes  $k$  situés à l'intérieur d'une zone restreinte appelée zone de Brillouin irréductible. Le vecteur  $k$  varie le long des directions de hautes symétries de cette zone qui fait partie du réseau réciproque [30].

### II.8.1 le réseau direct

Nous avons vu que le milieu cristallin se caractérise par sa périodicité dans trois directions, il est déterminé à partir d'un motif cristallin formé d'un ensemble bien défini d'atomes, qui se répète par des translations périodiques dans trois directions non-coplanaires. On peut ainsi définir le cristal par son motif et son réseau qu'on qualifie de direct [46].

### II.8.2 le réseau réciproque

Le réseau réciproque est défini directement à partir du vecteur de base du réseau direct, c'est la définition la plus courante des vecteurs de base du réseau réciproque [46]. Nous construisons les axes vectoriels  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$  de réseau réciproque :

$$\begin{cases} b_1 = 2\pi \left( \frac{a_2 \cdot a_3}{a_1 \cdot a_2 \cdot a_3} \right) \\ b_2 = 2\pi \left( \frac{a_3 \cdot a_1}{a_1 \cdot a_2 \cdot a_3} \right) \\ b_3 = 2\pi \left( \frac{a_1 \cdot a_2}{a_1 \cdot a_2 \cdot a_3} \right) \end{cases} \quad (\text{II-17})$$

Si  $a_1, a_2, a_3$  sont les vecteurs primitifs du réseau direct ;  $b_1, b_2, b_3$  sont les vecteurs primitifs du réseau réciproque, chaque vecteur défini par 1 est orthogonal à deux vecteurs de réseau cristallin [47].

$$b_i a_j = 2\pi S_{ij}$$

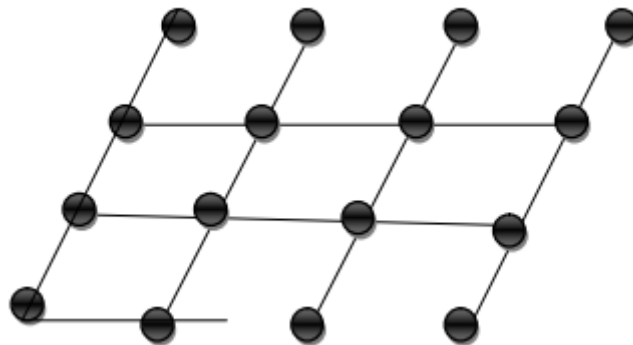
(II-18)

Où  $b_i a_j$  sont des vecteurs des réseaux direct et réciproque respectivement et  $S_{ij}$  est le symbole de Kronecker.

$$S_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{si } i \neq j \\ 1 & \text{si } i = j \end{cases}$$

(II-19)

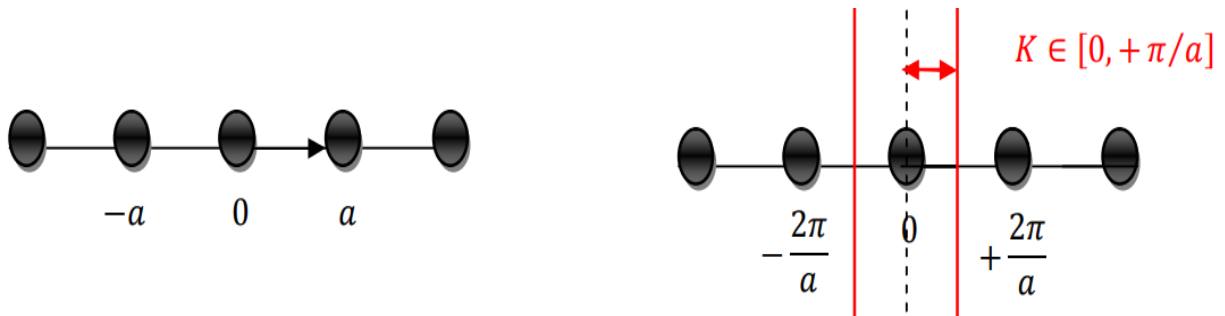
Nous considérons une structure périodique à deux dimensions représentées dans la figure (II.10) qui est sous forme de neuf mailles élémentaires, l'ensemble de ces mailles construit un réseau direct (la figure (II.10)) [48].



**Figure II.10** : Réseau direct.

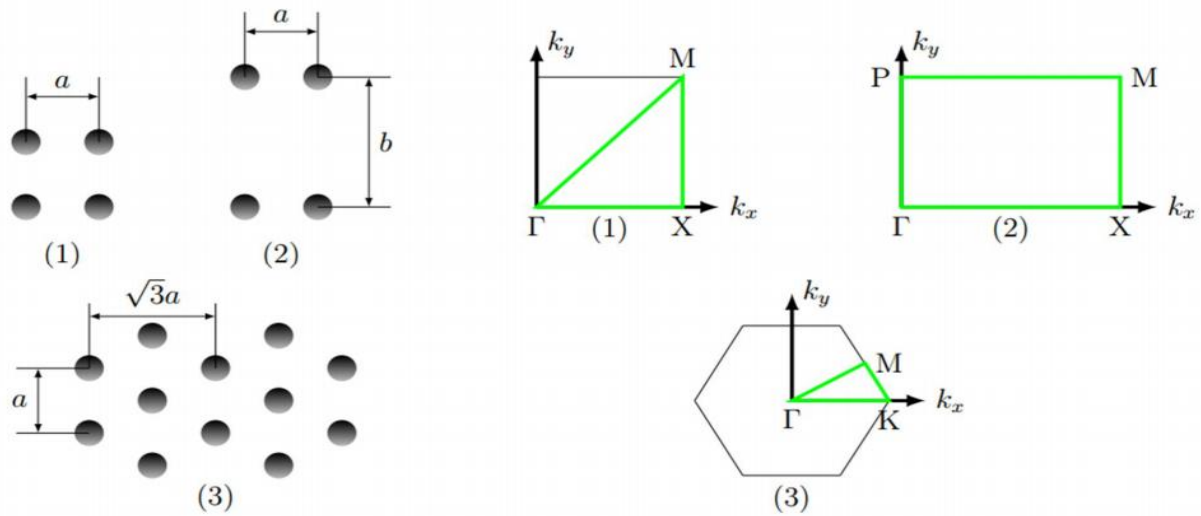
### II.8.3 La zone de Brillouin irréductible

La première zone de Brillouin est la cellule élémentaire de l'espace réciproque où les points sont plus proches de l'origine que de tous les autres nœuds du réseau périodique, les figures (II.11) et (II.12) montrent les différents exemples de cristaux photoniques et les zones de Brillouin ainsi que la zones de Brillouin irréductibles correspondantes dans les cas 1D et 2D[49].



**Figure II.11** : Cristal photonique unidimensionnel (à gauche) et zone de Brillouin correspondante (à droite). L'intervalle  $\left[-\frac{\pi}{a}; +\frac{\pi}{a}\right]$  est la première zone de Brillouin et  $\left[0; +\frac{\pi}{a}\right]$  la zone de Brillouin irréductible [50].

On définit la zone de Brillouin (BZ) qui représente la symétrie complète du réseau dans l'espace réciproque. On appelle aussi Zone de Brillouin Irréductible (IBZ) est la plus petite région au sein de la BZ pour laquelle les caractéristiques de dispersion du réseau ne sont pas liées par symétrie [51].



**Figure II.12** : Cristaux photoniques bidimensionnels à symétries (1) Carrée, (2) Rectangulaire et (3) Triangulaire avec leurs zones de Brillouin irréductibles correspondantes (en trait vert) [50].

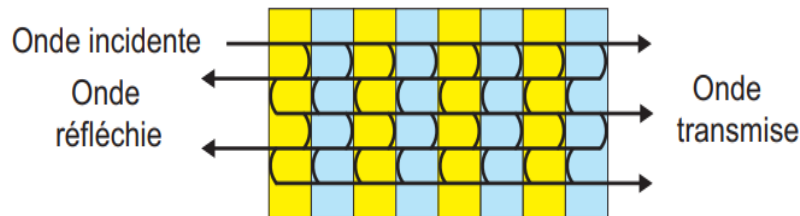
La première zone de Brillouin s’obtient en traçant les médiatrices (cas D1 et D2) du segment joignant l’origine aux nœuds les plus proches du réseau réciproque à partir du domaine ainsi délimité. On peut couvrir tout l’espace réciproque grâce aux translations de vecteurs  $G \in G$  autrement dit, il suffit de faire évoluer  $k$  dans ce domaine pour représenter l’ensemble des courbes de dispersion du cristal. Ce domaine d’évolution de  $k$  peut encore être réduit en mettant à profit les symétries du cristal [33].

- Dans le cas 1D la symétrie du cristal par rapport à l’origine a pour conséquence évidente que si une onde de vecteur  $k$  et de fréquence  $\omega$  est la solution du problème, alors l’onde se propageant en sens opposé de vecteur  $-k$  et de même fréquence, on peut aussi restreindre l’intervalle d’étude à  $\left[0; +\frac{\pi}{a}\right]$  au lieu de  $\left[-\frac{\pi}{a}; +\frac{\pi}{a}\right]$  [49].
- Le cristal bidimensionnel à symétrie carré de la figure (II-12), cette structure réalisée à partir des tiges diélectriques supposées infinies, comporte quatre axes de symétrie qui se déduisent les uns des autres, le réseau réciproque est aussi un réseau carré et la première zone de Brillouin est définie par [49] ;  $-\frac{\pi}{a} \leq K_x \leq \frac{\pi}{a}$  ;  $-\frac{\pi}{a} \leq K_y \leq \frac{\pi}{a}$

- Dans le cas d'un cristal bidimensionnel à symétrie rectangulaire de longueur  $a$  et de largeur  $b$ , le réseau réciproque est également un réseau rectangulaire et la première zone de Brillouin est un rectangle dont la longueur est de  $\frac{\pi}{a}$  et la largeur  $\frac{\pi}{b}$ , les sommets sont habituellement désignés par  $\Gamma(0;0)$ ,  $X\left(\frac{\pi}{a};0\right)$ ,  $M\left(\frac{\pi}{a},\frac{\pi}{b}\right)$  et  $\left(0;\frac{\pi}{b}\right)$  [33].
- Dans le cas d'un cristal bidimensionnel à symétrie hexagonale, le réseau réciproque est aussi un réseau hexagonal et la première zone de Brillouin est un hexagone, dans ce cas, on a six axes de symétrie qui se déduisent les uns des autres par des rotations de  $\frac{\pi}{6}$  avec une invariance par rotation de  $\frac{\pi}{3}$ . On montre que la zone de Brillouin irréductible est demi-triangle équilatéral dont les sommets sont habituellement désignés par  $\Gamma$ , K et M [50].

#### II.8.4 Diagramme de bandes – unidimensionnelle

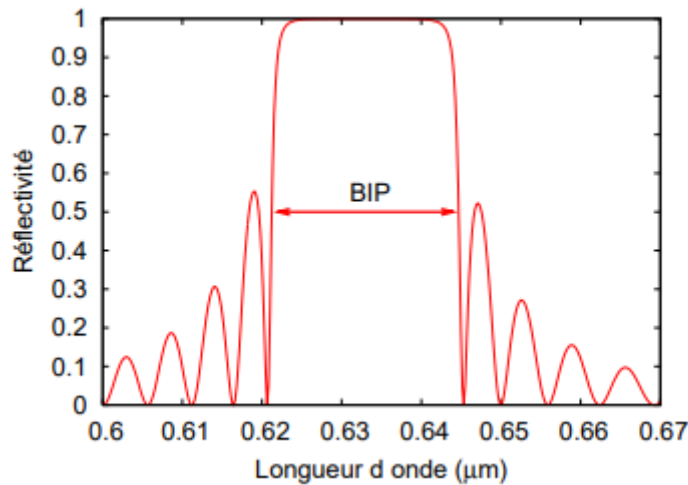
Le composant de base qui sera utilisé pour cette étude est un miroir de Bragg (illustré sur la figure II.13).



**Figure II.13** : Principe de fonctionnement d'un miroir de Bragg

Son principe repose sur le phénomène d'interférences multiples, une onde se propageant dans la structure va subir une réflexion sur chaque face. Lorsque l'épaisseur optique de ces couches est de  $\lambda/4$ , les réflexions sur les différentes couches interfèrent constructivement. Un bon dimensionnement (épaisseur suffisante, différence d'indice entre les deux couches) peut mener à une réflectivité de 100% (correspondant à la bande interdite) sur une plage spectrale conséquente. En holographie, un réseau en volume en réflexion est un miroir de Bragg. Son indice de réfraction est sinusoidal et est donné par :  $n(z) = n_0 + \Delta n \cos\left(\frac{2\pi z}{\lambda}\right)$ . La réponse

spectrale d'un tel réseau en réflexion est illustrée sur la figure II.14 ci-dessous. L'épaisseur du réseau est de  $20\ \mu\text{m}$ , la période de  $208\ \text{nm}$  et la modulation d'indice de  $0.05$  [52].

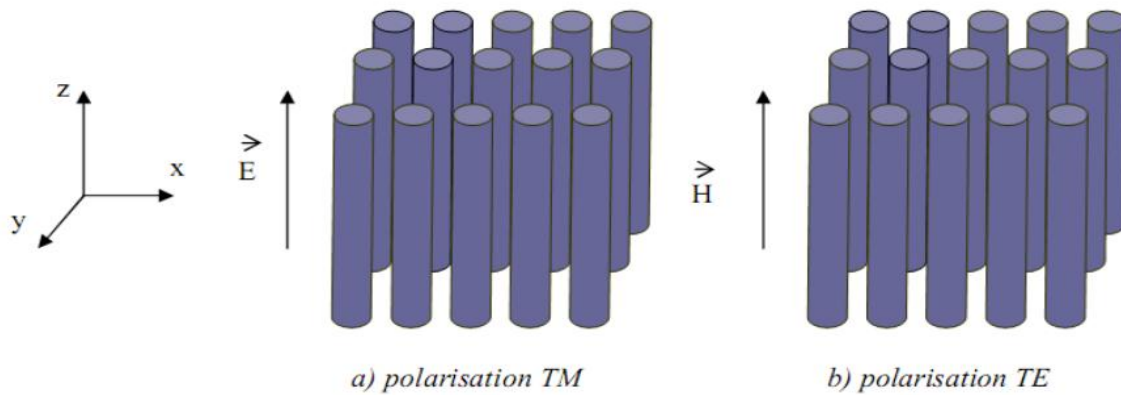


**Figure II.14:** Réponse spectrale d'un réseau holographique en réflexion et illustration de la bande interdite photonique (BIP) [52].

### II.8.5 Diagramme de bandes – Cristal photonique 2D

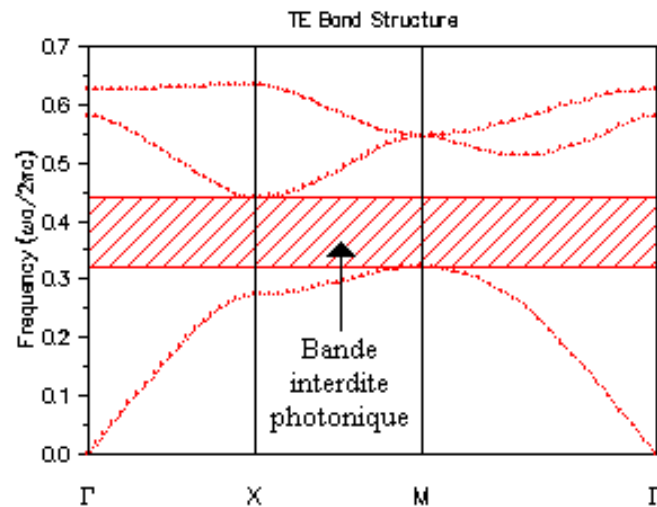
Un cristal BIP bidimensionnel est une structure dont la permittivité diélectrique est modulée périodiquement dans deux dimensions et reste homogène dans la troisième. Ces structures périodiques sont par exemple composées de cylindres diélectriques parallèles. Elles présentent une relative simplicité géométrique qui facilite les modélisations théoriques et les études expérimentales.

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  $E$  est parallèle aux cylindres infinis. Alors que celle magnétique TM correspond au cas où  $E$  leur est perpendiculaire (figure II.15) [30].



**Figure II.15** : Représentation des polarisations TE et TM dans un BIP 2D [30].

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. Elle empêche ainsi la propagation de l'onde incidente quelle que soit sa polarisation. Nous présentons sur la figure II.16, l'exemple d'un diagramme de bande d'un cristal photonique 2D en polarisation TE. En réalité, nous ne pouvons obtenir théoriquement une bande interdite complète que dans le cas des structures 3D, où il n'y a aucune propagation de l'onde incidente quelle que soit la polarisation et la direction de l'onde incidente [30].



**Figure II.16** : Diagramme de bande d'un cristal photonique 2d à maille carrée (polarisation TE)

[53].

### II.9.L'indice de phase et de groupe

La vitesse de la lumière dans le vide est une valeur constante ( $c = 299\,792\,458\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) et est limitée par les lois de la physique. Cependant, il n'y a pas de limite inférieure à la vitesse de lumière [54].

- **La vitesse de phase**

La vitesse de phase de la lumière est la vitesse à laquelle les fronts de phase se propagent dans un milieu. Il est lié au nombre d'onde et à la fréquence optique (angulaire) :

$$v_{ph} = \frac{\omega}{k} \quad (\text{II-20})$$

Dans le vide, la vitesse de phase est  $c = 299\,792\,458\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , indépendante de la fréquence optique, et égale la vitesse du groupe. Dans un milieu, la vitesse de phase est généralement plus petite d'un facteur  $n$ , appelé indice de réfraction, qui dépend de la fréquence (dispersion chromatique). Dans la région spectrale visible, les cristaux transparents typiques et les verres optiques ont des indices de réfraction compris entre 1,4 et 2,8. Les semi-conducteurs ont normalement des valeurs plus élevées [55].

- **La vitesse de groupe**

La vitesse de groupe est la vitesse à laquelle l'enveloppe d'une impulsion se propage dans un milieu, en supposant une longue impulsion avec une bande passante étroite (de sorte que la dispersion chromatique d'ordre supérieur n'est pas pertinente) et l'absence d'effets non linéaires

La vitesse de groupe de la lumière dans un milieu est définie comme l'inverse de la dérivée du nombre d'onde par rapport à la fréquence angulaire

$$v_g = \left(\frac{\partial k}{\partial \omega}\right)^{-1} = c \left(\frac{\partial}{\partial \omega}(\omega \cdot n(\omega))\right)^{-1} = \frac{c}{n(\omega) + \omega \frac{\partial n}{\partial \omega}} = \frac{c}{n_g(\omega)}$$

(II-21)

Où  $n(\omega)$  est l'indice de réfraction et  $n_g$  est appelé l'indice de groupe. Le nombre d'onde  $k$  peut être considéré comme le changement de phase spectrale par unité de longueur [56].

- **L'indice de réfraction**

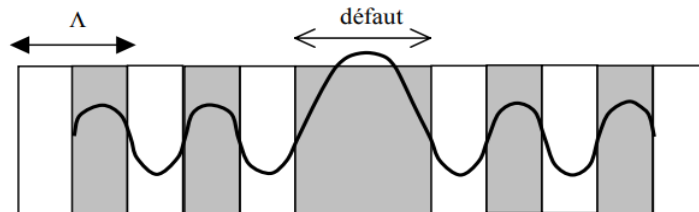
L'indice de réfraction d'un milieu optique transparent est le facteur par lequel la vitesse de phase  $v_{ph}$  est diminuée par rapport à la vitesse de la lumière dans le vide [57] :

$$v_{ph} = \frac{c}{n} \quad (\text{II-22})$$

### II.10. Les défauts dans les cristaux photoniques

Le fait d'introduire un défaut ou de rompre la périodicité d'une structure permet, par exemple, d'autoriser la propagation d'une onde de fréquence  $\omega_0$  comprise dans la bande interdite photonique. Des filtres très sélectifs peuvent être ainsi réalisés. Une simple couche plus épaisse que les autres dans la structure, peut constituer ce défaut (figure II.17).

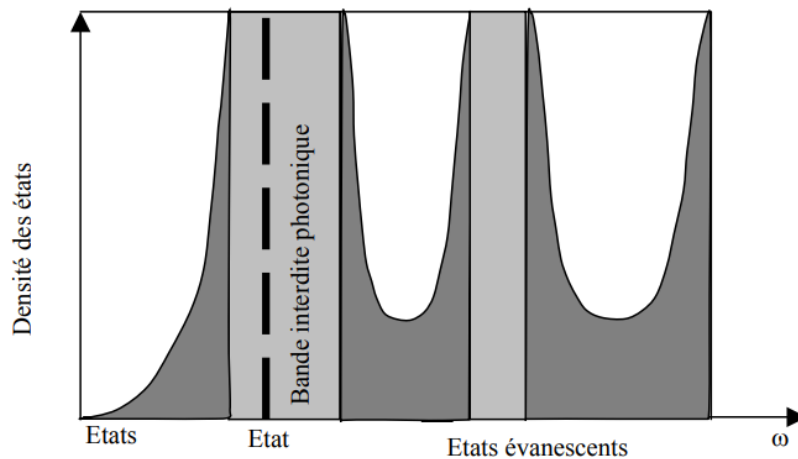
Pour étudier l'influence d'un défaut, on se restreint à l'axe de propagation et on considère un mode dont la fréquence  $\omega$  appartient à la bande photonique interdite. Il n'y a pas de modes propagatifs à la fréquence  $\omega$  dans le réseau périodique même si un défaut est introduit dans la structure. La rupture de périodicité nous empêche de décrire les modes du système avec le vecteur d'onde  $k$ , mais il est possible de déterminer si une certaine fréquence peut supporter des états propagatifs dans le reste du cristal.



**Figure II.17 :** Défaut dans une structure périodique unidimensionnelle, formé par l'élargissement d'une couche. Ce défaut peut être considéré comme une interface entre deux réseaux unidimensionnels parfaits. On notera l'élargissement du champ dû au défaut [58].

Dans ce cas, on peut diviser en espaces de fréquence les régions dans lesquelles les états sont propagatifs ou évanescents, ce qui est illustré figure II.18

Les défauts permettent à des modes localisés d'exister, avec des fréquences incluses dans la bande interdite photonique [58].



**Figure II.18:** Division de l'espace des fréquences dans les états propagatifs et évanescents. Dans ce schéma, la densité d'états (nombre de modes permis par unité de fréquence) est nulle dans les bandes interdites du cristal (zone gris clair). Les modes ne peuvent exister dans ces régions que s'ils sont évanescents, et si la périodicité est rompue par un défaut (trait pointillé). [58].

### II.11. Domaines d'application des cristaux photoniques 2D

Les applications des CP 2D sont nombreuses, beaucoup plus portés à l'intérêt aux domaines des télécommunications en utilisant des fréquences optiques mais aussi adaptées au domaine des micro-ondes tels que les antennes.

### II.12. Fréquence optique

#### a) Les micro-résonateurs

Les guides d'ondes comme les micro-résonateurs sont obtenus en incluant des défauts ponctuels linéairement répartis dans la structure à cristaux photoniques qu'on appelle un défaut ponctuel linéaire ou avec virage qu'on appelle guide coudé. Les premières études sur les micro-résonateurs avec des structures bidimensionnelles ont été réalisées en 1997 par Labilloy. Les

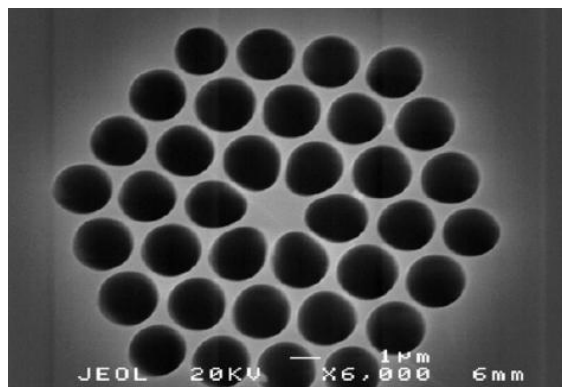
guides d'onde : l'idée de réaliser les guides d'onde est apparue en 1994 et les premières réalisations sont arrivées en 1999. Les guides linéiques présentent beaucoup de pertes.

### b) Filtres et multiplexeurs

Pour multiplexer plusieurs sources on fait varier les longueurs d'ondes émises afin de pouvoir les extraire à la sortie. Le multiplexeur en longueur d'ondes en anglais Wavelength Division Multiplexing d'où les initiales WDM est fabriqué à base de cristaux photoniques. On trouve ce genre de réalisation dans les liaisons entre les entreprises, ou dans les grandes artères sur des longues distances dans les liaisons internationales qui passent sous la mer ; il existe deux types de multiplexeurs, le CWDM pour les écarts de longueur d'ondes de 20nm ou DWDM pour les écarts plus faibles.

### c) Les fibres optiques

La fibre à base de cristaux photoniques appelé aussi fibre micro-structurées, fibres à trous, fibre à bandes interdites photoniques ou encore fibre PCF (photonic crystal fibers) à été une révolution de la fibre optique normale basée sur la réalisation d'un arrangement périodique de trous d'air autour d'un cœur de silice (figure II.19). Cette fibre était approuvée théoriquement en 1987 et conçue par le groupe d'Optoélectronique de l'Université de Bath qu'en 1996 [59].



**Figure II.19:** Section d'une fibre microstructure (MOF.) [60].

Les caractéristiques qui distinguent la fibre PCF sont nombreuses parmi eux, on trouve :

- Permet un seuil de puissance élevé pour les non-linéarités de fibre.
- Puissance de crête élevée du mode de guidage avant dépassement du seuil de rupture des matériaux.
- Accès aisé pour le remplissage du cœur ou du gainage (gaz ou liquides).
- Réflexion de Fresnel réduite à partir de la surface de la fibre
- Vaste plage de valeurs de dispersion disponible (fortement négative à fortement positive). Fibres quasiment insensibles à la courbure y compris après enroulement sur des bobines de diamètre inférieur au centimètre.

### II.12.1. Fréquences micro-ondes

Les premières expériences visant à exploiter les cristaux photoniques diélectriques comme substrat d'antennes ont été menées par E.R. Brown et al. Ainsi les cristaux photoniques 2D sont aussi utilisés dans la réalisation des circuits micro-ondes tels que les filtres planaires, les guides, les multiplexeurs. Ils sont aussi utilisés pour l'amélioration du rendement des antennes par utilisation des substrats à base des cristaux photoniques ultra réfractifs. Les BIPs peuvent être utilisés pour améliorer la directivité des antennes pour les surfaces à haute impédance [60].

### II.12.2. La photonique pour le photovoltaïque

L'émergence des cellules en couche mince, et les limitations optiques qui y sont associées, ont fait de la (nano) photonique une boîte à outil incontournable pour la réalisation de dispositifs à haut rendement. Bien que son application aux cellules solaires PV soit relativement récente, les concepts mis en jeu sont majoritairement une adaptation d'effets déjà utilisés pour d'autres composants optoélectroniques tels que les photos détectrices, les diodes électroluminescentes ou les lasers.

Le développement accéléré des moyens de simulation numérique et de fabrication de nanostructures a constitué un creuset favorable pour de telles études, ce qui a donné lieu à une littérature prolifique [53]. En conséquence, il est impossible de décrire de manière exhaustive l'ensemble de ces études. Dans la suite, nous nous concentrerons donc sur les configurations ou les effets principaux exploités afin de contextualiser le travail présenté dans ce manuscrit.

**II.13. Conclusion**

Les cristaux photoniques sont des matériaux où la constante diélectrique varie périodiquement à l'échelle de la longueur d'onde, sur une ou plusieurs dimensions de l'espace

Dans ce chapitre, nous avons rappelé les phénomènes physiques clés qui régissent les bases Théoriques des cristaux photoniques,

Nous avons conclu que les cristaux photoniques unidimensionnels et bidimensionnels sont les plus utilisés à cause de leurs facilités de fabrication que les cristaux photoniques tridimensionnels qui sont plus difficiles et ils ont besoin des nouvelles technologies pour développer ce type de cristaux photoniques.

## Chapitre III

### Présentation du logiciel RSoft CAD

#### III.1 Introduction

Les cristaux photoniques à structure périodique semblent très prometteurs puisqu'ils permettent une amélioration des performances de nombreux systèmes existants (fibre optique, antennes, photovoltaïque).

Dans ce chapitre on va présenter le logiciel Rsoft CAD et en particulier les modules DiffractMOD et FullWave. Le développement des méthodes de modélisation optique précise et rapide reste donc primordial pour l'étude de ces structures [61]. Les méthodes étudiées dans ce module est la méthode de RCWA (*Rigorous Coupled Wave Analysis*) et La méthode FDTD (*différences finis temporel domaine*), nous avons appliqué ces méthodes à des structures à base de cristaux photoniques gravés dans des empilements de couches minces.

#### III.2 Présentation du logiciel Rsoft CAD

##### III.2.1 Environnement de CAD

Le RSoft CAD est un programme de base de RSoft Photonique, il permet aux chercheurs et ingénieurs de créer des systèmes pour la conception des différents dispositifs tels que : des guide d'ondes, des cavités résonantes, des circuits optiques et d'autres dispositifs photoniques. Cette logiciel calcule la réflexion, l'absorption et l'efficacité de transmittance de diffraction à tout ordre de diffraction sous la forme d'un la réflexion ou la transmittance de spectre.

Comme la dernière addition à la suite de conception de niveau du composant de la Rsoft, qui comprend également BeamPROP, Full ave, BandSOLVE, GratingMOD et Laser MOD, DiffractMOD partage également la même interface de mise en page Rsoft photonique CAD que les autres outils de composants. L'interface de CAD conviviale permet la définition précise d'un profil arbitraire sans limites associées à une approximation par morceaux. Résultats optimisés peuvent être trouvés rapidement le processus de conception et de modélisation est entièrement paramétrable permettant des simulations de lots. Un avantage important d'une interface de CAD partagée est qu'une fois que les concepteurs de créer et d'analyser la structure de diffraction dans DiffractMOD, la même disposition de conception peut être directement simulé en double alternance et FullWave pour d'autres aspects de la même structure - comme réponse dans le domaine temporel avec finie temps de différence de

méthode de domaine ou l'analyse de structure de bande avec la méthode d'extension d'onde plane.

### III.2.2 le simulateur «DiffractMOD»

DiffractMOD est un outil de conception et de simulation pour les structures optiques diffractifs tels que des éléments de diffraction optiques, structures périodiques, et des cristaux photoniques de bande interdite. Il est basé sur la technique couplée analyse rigoureuse de la vague (RCWA) qui a été mis en œuvre en utilisant des algorithmes avancés, y compris la factorisation de Fourier rapide et généralisée formulation de ligne de transmission. L'outil a des applications étendues dans un large éventail de domaines, y compris la fabrication de semi-conducteurs et l'optique ondulatoire. La méthode RCWA utilise le concept d'une cellule de l'unité pour gérer des structures périodiques à la fois en 2D, et est spécialement conçu pour les structures multicouches [62].

### III.2.3 Le simulateur «FullWave»

Les simulations numériques ont été effectuées avec le logiciel Fullwave qui est un logiciel de simulation électromagnétique, basé sur la méthode des différences finis dans le domaine temporel FDTD.

Ce logiciel peut simuler des structures (limitées, infinies ou périodiques), formées par différents matériaux qui peuvent être métalliques ou diélectriques. L'utilisation de Fullwave nécessite de définir les matériaux qui composent la structure à l'aide de la permittivité électrique. Il faut aussi définir l'environnement de la structure et donc les conditions aux limites. Pour cela il faut disposer de conditions absorbantes aux abords du domaine de discrétisation (calcul) qui permet d'éviter les réflexions parasites engendrées aux bords de la fenêtre du calcul FDTD afin de simuler un milieu ouvert

## III.3 Méthode de modélisation

Il existe de nombreuses méthodes numériques permettant de résoudre les équations de Maxwell. Ces méthodes peuvent être classées suivant différents critères, comme le domaine dans lequel elles opèrent, temporel ou fréquentiel, ou encore le nombre de dimensions de l'espace qu'elles discrétisent.

Les méthodes numériques utilisées dans ce travail est une méthode modale fréquentielle utilisant une discrétisation bidimensionnelle (2D) suivie d'une intégration analytique dans la troisième direction, cette méthode est la méthode modale de Fourier, dite aussi *Rigorous*

*Coupled Wave Analysis* (RCWA) bien connue et très utilisée pour le calcul de la diffraction et l'absorption par des objets périodiques.

La méthode FDTD (Finite Difference Time (Domain), une des méthodes numériques les plus répandues, opère dans le domaine temporel en discrétisant les trois directions (3D) de l'espace.

### III.3.1 La méthode des différences finis dans le domaine temporel (FDTD)

La méthode FDTD repose sur la résolution des équations de Maxwell dans un domaine discrétisé spatialement et temporellement. Il permet de suivre l'évolution du champ EM au cours du temps en tout point de la structure. On peut ainsi obtenir les cartographies du champ EM à n'importe quel endroit et n'importe quel moment. La connaissance de l'évolution du champ en fonction du temps permet également d'obtenir des informations sur la réponse spectrale de la structure [62].

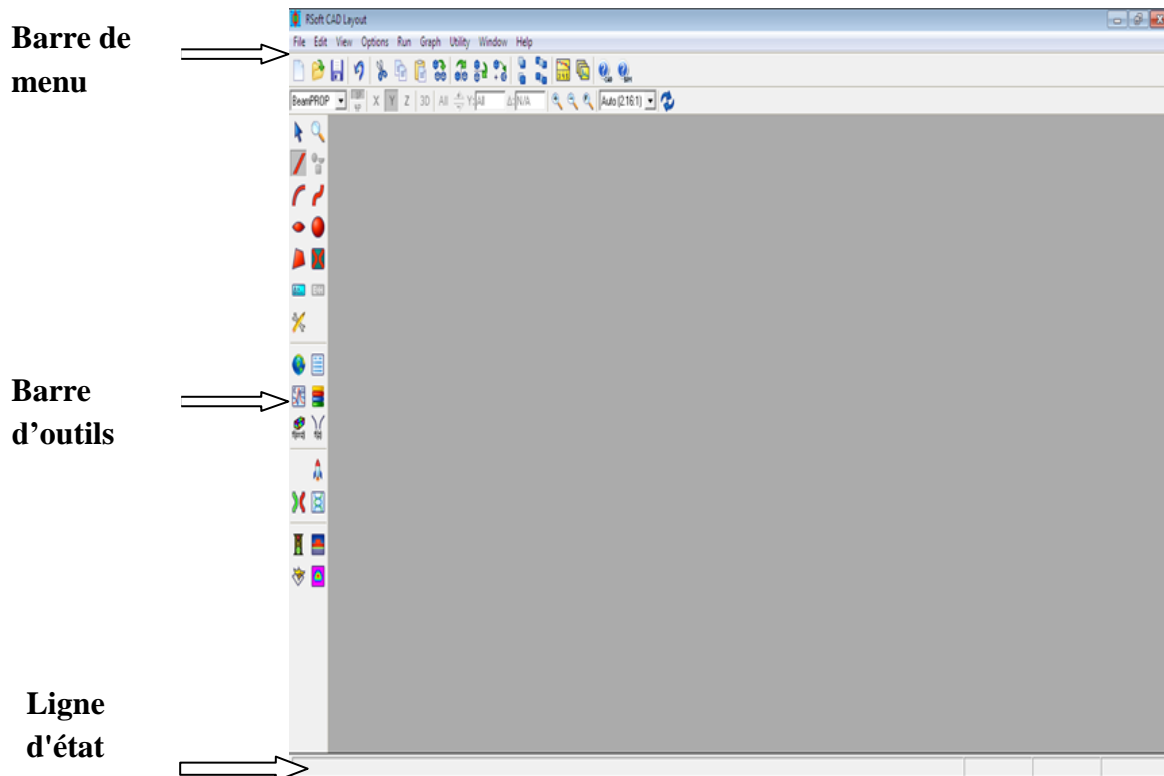
### III.3.2 Méthode modale de Fourier (RCWA)

La méthode modale de Fourier permet de résoudre le problème de la diffraction par une structure périodique en calculant les modes de la structure et leurs échanges d'énergie aux interfaces. Les modes sont calculés en développant en série de Fourier le champ électromagnétique ainsi que la permittivité et la perméabilité de la structure. Cette méthode, qui porte également dans la littérature le nom de RCWA (Rigorous Coupled Wave Analysis), a été développée initialement vers la fin des années 70 pour l'analyse électromagnétique des réseaux de diffraction. Parallèlement, elle a été utilisée dans le domaine des cristaux photoniques pour le calcul des diagrammes de bande, sous le nom de méthode des ondes planes. Cette méthode peut être généralisée au calcul de la diffraction. Cette extension du domaine d'application de la méthode est basée sur une périodisation de l'objet couplée à l'utilisation de couches absorbantes

Pour exposer les grandes lignes de la méthode modale de Fourier, nous considérons la diffraction par le réseau unidimensionnel (1D) multicouches du cas plus général d'un réseau 2D n'apporte pas de difficultés supplémentaires autres que des difficultés d'ordre calculatoire [63].

## III.4 Les étapes de simulation


La fenêtre de programme de Rsoft CAD comporte une barre de menus en haut de la fenêtre, une barre des outils qui porte plusieurs icônes et la ligne d'état (voir figure. III.1)

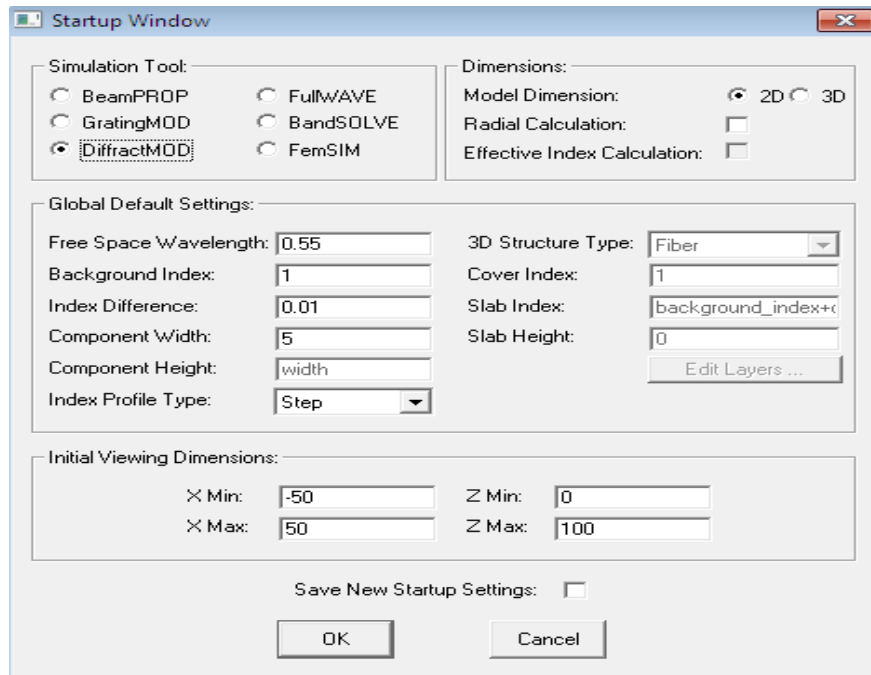


**Figure.III.1:** Fenêtre principale du programme CAD

Les menus permettent l'accès au divers dossier standard et les opérations d'édition. La ligne d'état fournit des informations sur le mode courant de disposition, avec l'affichage du même rang pendant le dessin

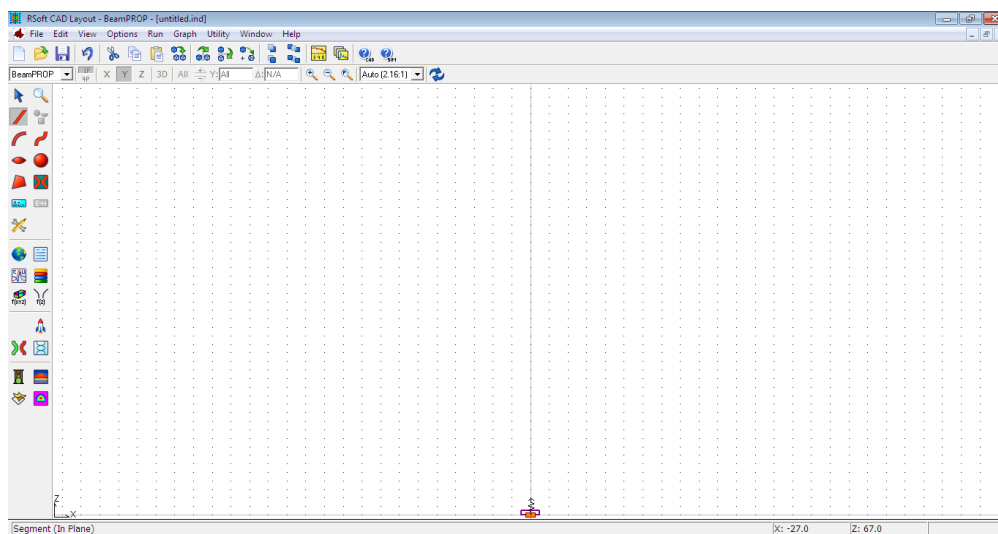
#### III.4.1 Création d'un nouveau circuit

Pour créer un nouveau circuit on va cliquer sur l'icône New circuit  dans la barre d'outils supérieur. Alternativement, nous allons choisir **File /New** du menu. Le dialogue de démarrage de la figure III. 1 va apparaître figure.III.2 [62].



**Figure III.2 :** La fenêtre de démarrage (startup Window).

Il faut remplir la différence d'indice (Index différence), qui est la différence d'indice par défaut entre la couche guidant et l'indice de substrat (Background index), d'autre part, il faut choisir le type de la polarisation (Mode TE ou Mode TM). On peut aussi par cette option choisir le module de simulation parmi les six modules existants dans le logiciel RSoft bandSOLVE, FullWave, BeamPROP/BPM ou GratingMOD. Après l'introduction des informations dans la fenêtre de démarrage on va cliquer sur OK pour obtenir la fenêtre de la figure III.3 [62].



**Figure III.3:** Nouvelle fenêtre pour réaliser un nouveau composant ou nouveau circuit.

III.4.2 Création de la structure dans le CAD Rsoft

Pour créer le composant diffractif, il suffit de tracer un segment dans l'interface de CAD en déplaçant la souris vers la recherché position de départ, appuyer et maintenir le bouton gauche de la souris, déplacer la souris à la position de fin souhaitée, et en appuyant sur le bouton de la souris. Dans cet exemple, nous n'utiliserons un segment à créer la structure. Bien sûr, plus des structures complexes peuvent être réalisées grâce à l'utilisation de segments supplémentaires.

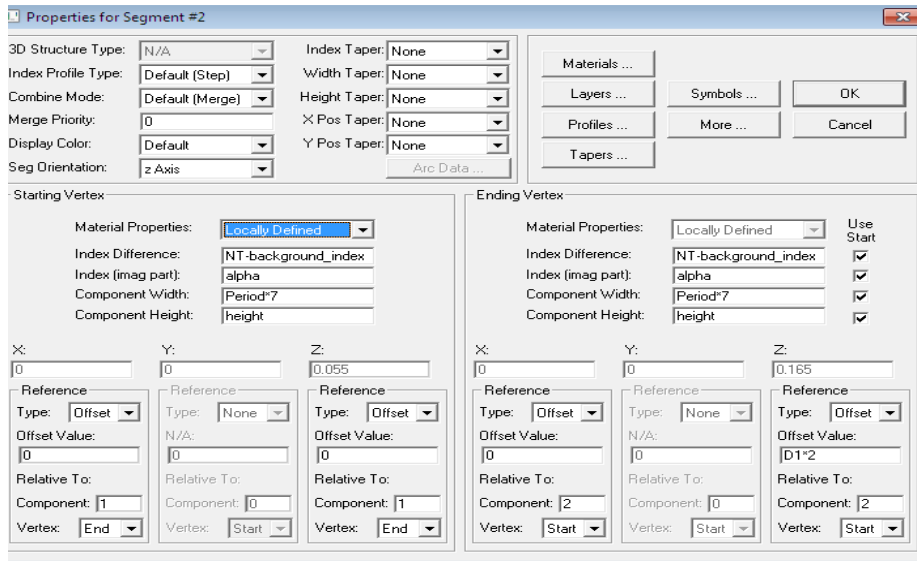


Figure III.4 : Propriétés sectoriels pour l'objet de guide d'ondes créé.

Après l'introduction des différentes données (type de réseau, forme de motif, le nombre de rangés et le nom du circuit) on clique sur le bouton OK pour obtenir la structure du cristal photonique qui apparaît sur la figure III.5.

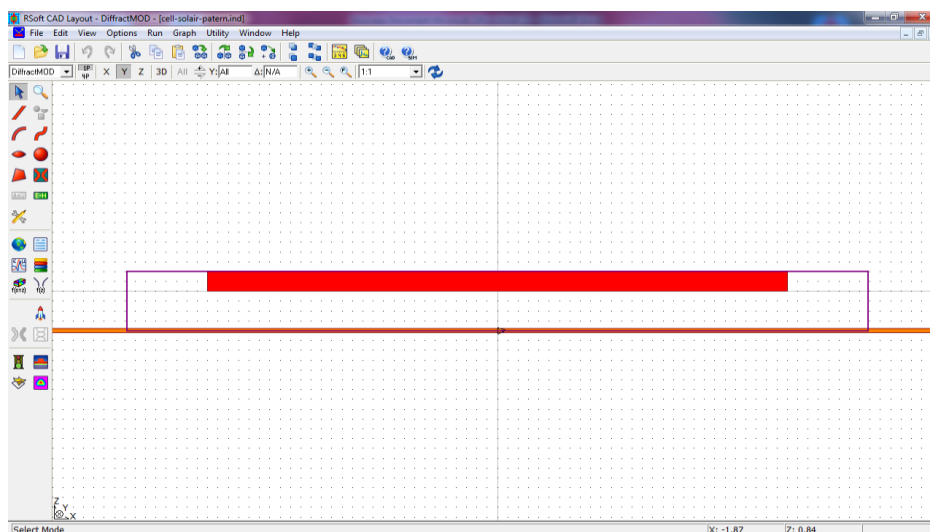

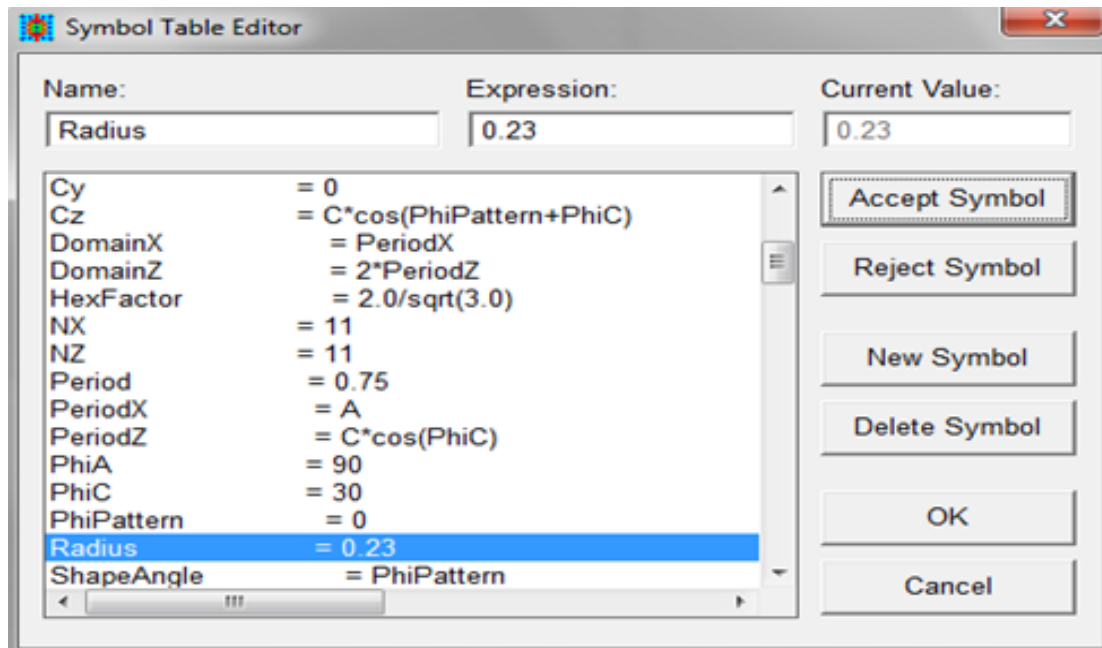


Figure III.5: Disposition de configuration nom structure.

### III.4.3 Définition des variables

Cliquer sur l'icône  (Edit symboles) dans la fenêtre de CAD, le tableau de symbole (Table editor) s'ouvre (Figure III.6). Ce tableau de symboles permet à l'utilisateur de créer ou modifier à la fois et intégrer les variables définies par l'utilisateur, ces variables peuvent être utilisées pour définir pratiquement n'importe quel paramètre de la structure (le rayon, la période, l'indice de réfraction, nombre de rangés).



**Figure III.6:** L'éditeur du Tableau de symboles.

Ces symboles correspondent aux arrangements faits dans le nouveau circuit (New Circuit) de la boîte de dialogue ci-dessus. Pour définir un nouveau symbole (par exemple Nhole=1), on clique sur new symbole puis on va entrer le nom et la valeur du symbole

III.4.4 Vérification de la structure

Pour vérifier notre structure, nous avons simulé le profil de la constante diélectrique dans le plan de périodicité (plan XZ).

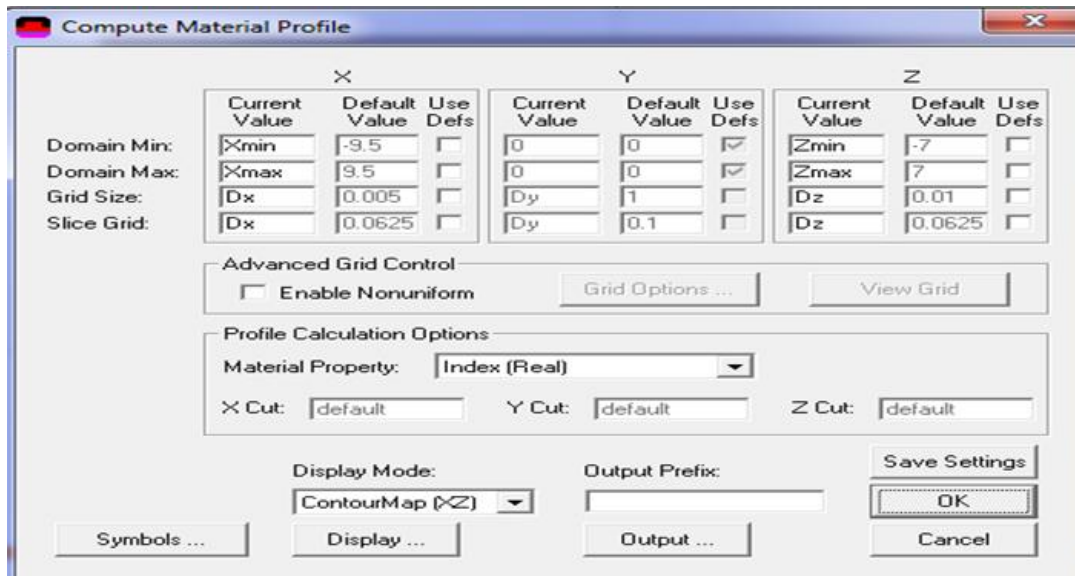


Figure III.7 : Arrangements de calcul de profil d'index.

Appuyez sur OK pour afficher le profil d'indice comme le montre la figure III.8.

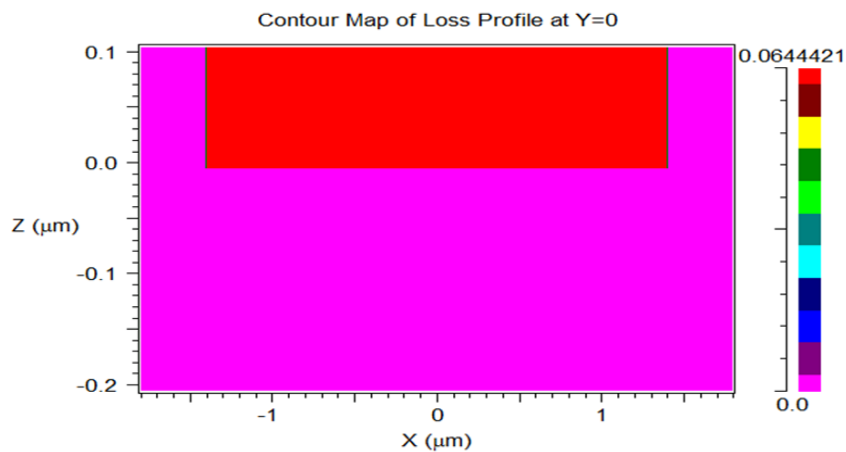

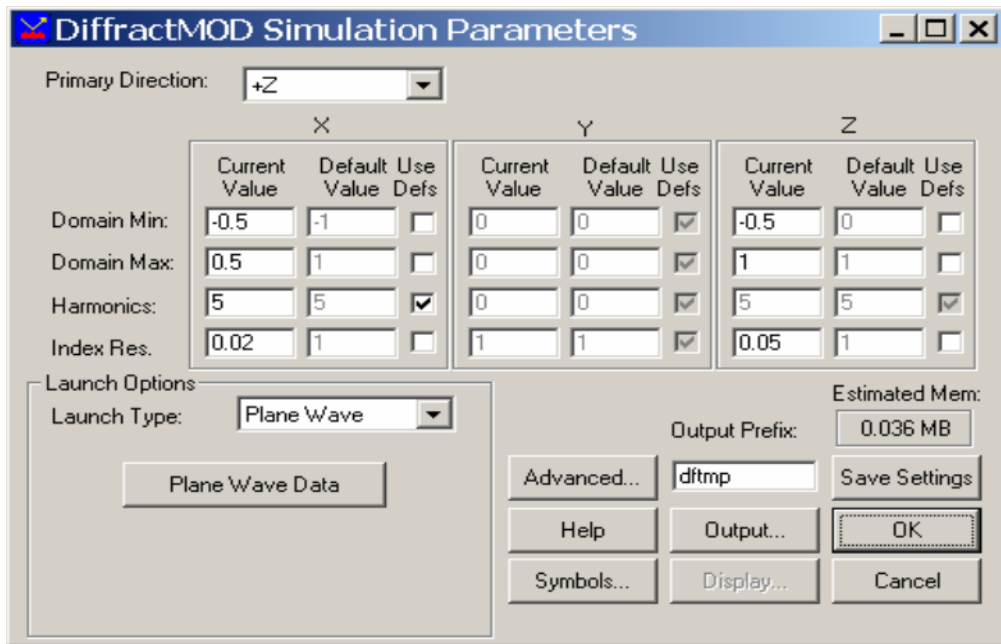


Figure III.8: Distribution d'index pour la configuration nom structure (référence).

Maintenant que nous avons créé la structure, nous pouvons définir les paramètres de simulation. Appuyez sur la simulation icône Effectuez (**Perform simulation**)  à ouvrir la boîte de dialogue Paramètres de simulation DiffractionMOD le montre la figure III.9



**Figure III.9:** La boîte de dialogue Paramètres de simulation DiffractionMOD où les paramètres de simulation sont contrôlés

Dans cette fenêtre, nous pouvons mettre en place tous les paramètres de simulation primaires tels que l'angle de lancement et nombre d'harmoniques à être utilisés. Cependant, puisque c'est un cas simple, nous utiliserons toutes les valeurs par défaut. Toutes les options de simulation seront discutées en détail dans les sections suivantes [64].

#### III.4.5 Configuration du paramètre simulé (Réflexion, transmittance, absorption)

Appuyez sur le bouton de **Output** pour ouvrir la boîte de dialogue Options de sortie (Output) où l'on peut sélectionner le type(s) de la production que nous voulons produire. Définir le type de tracé en fonction de la longueur d'onde, le Min, Max, et les valeurs Step à 0,7, 1,5 et 0,001. Sélectionnez le Total normalisé puissance réfléchi et le total transmis normalisés options d'alimentation. Appuyez sur OK pour revenir à la DiffractionMOD dialogue Paramètres de simulation [62].

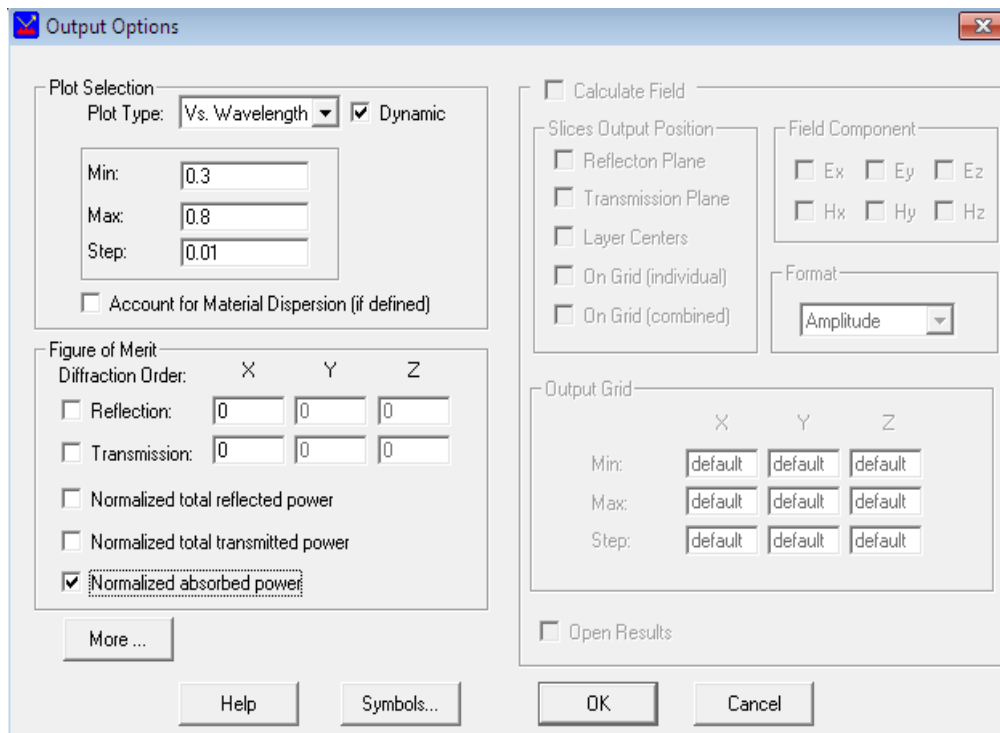


Figure III.10: Output Options.

### III.4.6 L'exécution de la simulation

Appuyez sur le bouton OK pour lancer la simulation. Après la simulation est terminée, le résultat se affiche comme indiqué dans Figure III.10.

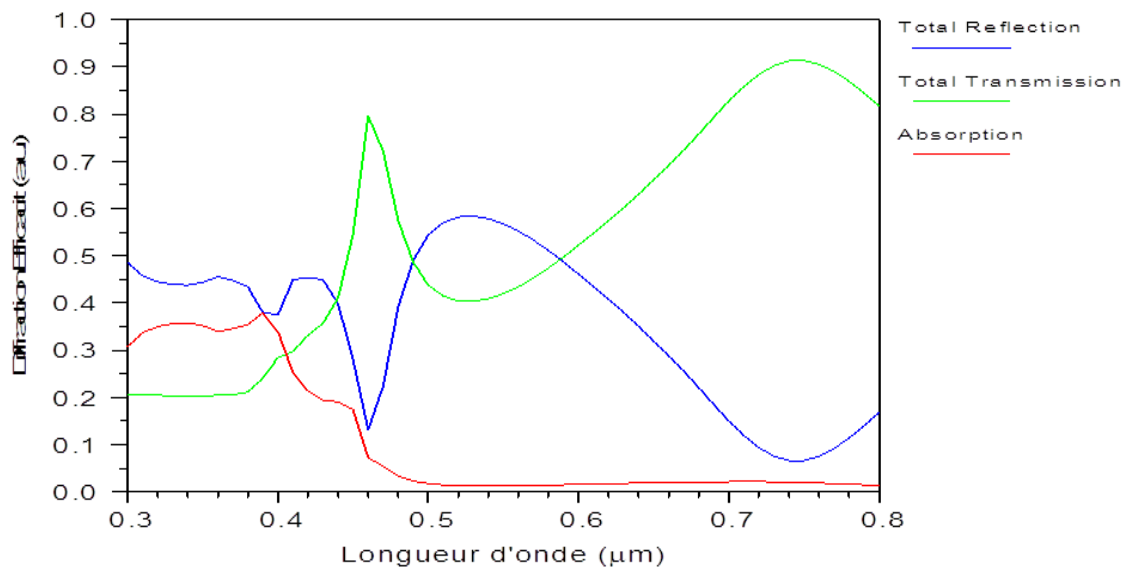



Figure III.11: Résultats de la simulation [62].

### III.4.7 La lecture des résultats

Afin de regarder ou imprimer les résultats de simulation, on clique sur l'icône  de WinPLOT dans la barre des outils supérieure de la fenêtre de CAD, et on choisit le graphe désiré à partir du dialogue qui est présenté.

### III.5 Autres options de Rsoft CAD



**Edit Launch Field** (Editer Le Champ De Lancement) : Cette option ouvre la boîte de dialogue de **LaunchParameters** (paramètres de lancement) où l'utilisateur peut indiquer le champ initial pour une simulation.



**Edit layer table** (Editer Le Tableau De Couche) : Cette option ouvre **layer table Editor** (l'éditeur), il est utilisé pour définir les structures **3D** multicouche (multilayer).



**Perform Simulation** (Effectuer La Simulation) : Cette option ouvre la boîte de dialogue de Simulation Paramètre (paramètres de simulation) où l'utilisateur peut indiquer des paramètres de simulation avant de l'effectuer.



**Edit Global Settings** (Editer Les Arrangements Globaux) : Cette option ouvre la boîte de dialogue de Global Settings (globale d'arrangements) où les arrangements par défaut du circuit peuvent être placés. Elle est équivalente à la nouvelle boîte de dialogue de circuit.



**Launch DataBrowser** : Cette option ouvre le Rsoft Data Browser.



**Edit Pathways** (Editer Les Voies) : Cette option permet à l'utilisateur de définir des pathways, qui sont utilisés pour définir des positions de lancement pour l'analyse.

### III.6 Conclusion

Nous avons présenté dans ce Chapitre logiciel RsoftCAD, avec les simulateurs DiffractMOD et Fullwave, les grandes lignes de la méthode numérique qui a été utilisée dans ce travail et les étapes de simulation. Ces méthodes originales sont basées sur les méthodes (RCWA) et (FDTD) respectivement.

## Chapitre IV

### Résultats et discussions

#### IV. Introduction

Dans ce chapitre on fera l'étude et la conception d'une structure de piégeage de la lumière afin d'améliorer l'efficacité des cellules pour les cellules avec des couches actives de silicium très fines (généralement 2 à 10  $\mu\text{m}$ ). La structure présente une absorption considérablement améliorée dans la gamme de longueurs d'onde de 400 à 1100 nm, conduisant à une amélioration remarquable de l'efficacité globale.

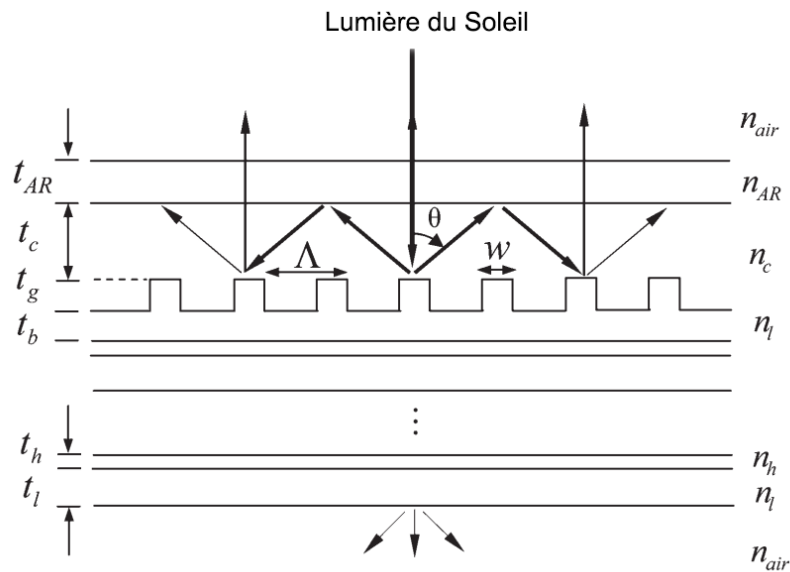
Cette partie sera consacrée à l'étude du rôle de chaque partie de la structure de piégeage de la lumière, et nous allons montrer que la couche antireflet (AR) et le réseau de diffraction contribuent le plus de manière significative à améliorer l'efficacité de la cellule.

#### IV.1. Présentation de la structure étudiée

Un diagramme schématique de la structure de piégeage de lumière présentée est montré sur la figure IV.1.

La structure se compose d'une couche AR, d'une couche centrale en silicium et d'un réflecteur arrière qui combine un réseau de réflexion diffractive avec un DBR. Les empilements DBR sont constitués de huit paires de Si/ SiO<sub>2</sub> (indices de réfraction  $n_h / n_l = 3,5 / 1,46$ ) avec une épaisseur d'un quart de longueur d'onde du matériau, c'est-à-dire  $t_{h,l} = \lambda_0 / 4n_{h,l}$  où  $\lambda_0$  est la longueur d'onde centrale du réseau de Bragg (distributed Bragg reflector DBR) à choisir par optimisation. Il existe une couche tampon entre le réseau de diffraction et le DBR, que l'on suppose être SiO<sub>2</sub> ( $n_b = 1,46$ ) d'épaisseur  $t_b = t_l$ .

Dans notre simulation, la partie réelle de l'indice de réfraction de la couche centrale de silicium est fixée à  $n_c = 3.5$ .



**Fig. IV. 1 :** Schéma de principe de la cellule solaire au silicium avec piégeage de la lumière structure [65].

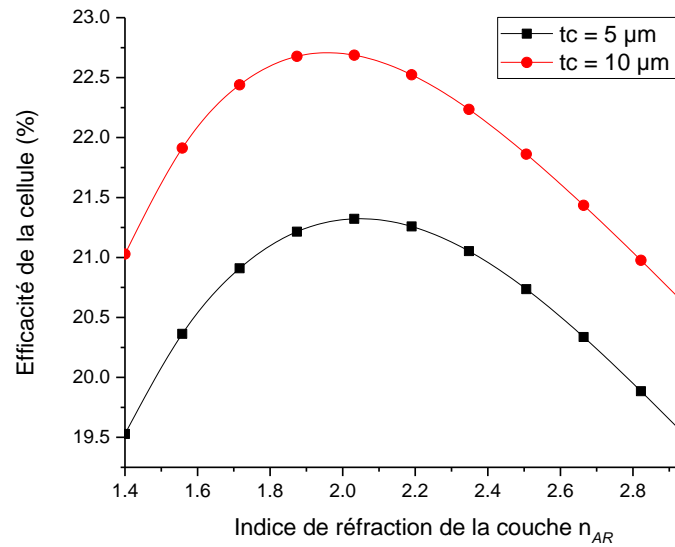
## IV.2. Optimisation Structurelle

La structure de piégeage de la lumière que nous avons montrée sur la figure. IV.1 a récemment été démontré expérimentalement pour une cellule très épaisse (c'est-à-dire 675  $\mu\text{m}$ ) .Dans cette section, nous présenterons une étude complète de la structure et de son efficacité pour les couches minces d'applications dans le domaine des cellules solaires. Nous démontrerons que l'efficacité cellulaire peut être considérablement améliorée grâce au processus d'optimisation.

## IV.3. Etude de l'efficacité globale de la cellule

### IV.3.1. L'effet de la couche Antireflet (AR)

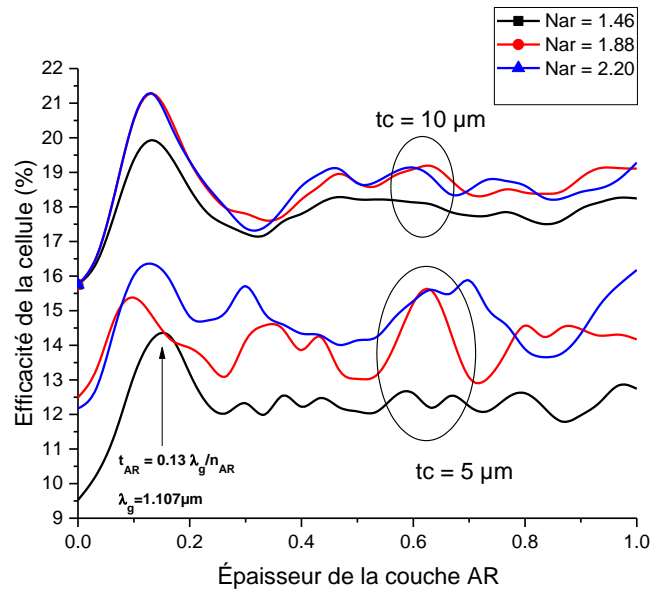
Pour plus de spécificité sans perdre de généralité, On se concentrera sur la structure avec couche AR. Il est bien connu que la structure de couche (AR) a une réflexion nulle à sa longueur d'onde centrale  $\lambda_c$  lors de la sélection de l'épaisseur du couche (AR)  $t_{AR} = \lambda_c/4n$  et l'indice de réfraction du matériau de monocouche  $n_{AR} = \sqrt{n_c}$ , où  $n_c = 3.5$  est l'indice de réfraction de la couche de silicium. Le RCWA est utilisé pour simuler la structure montré sur la figure. IV.1, et l'efficacité globale des cellules est calculée comme fonction de l'indice de matériau de couche (AR), comme le montre la figure IV.2. (a).



**Fig. IV.2. (a) :** Illustration de l'efficacité globale de la cellule  $\eta$  en fonction de l'indice de réfraction de la couche  $n_{AR}$

Dans la simulation, nous avons fixé la période de réseau de la structure arrière à  $\Lambda = 0.72 \lambda_g$  et la profondeur de réseau à  $t_g = 0.18 \lambda_g$ ,  $\lambda_g = 1,107 \mu\text{m}$  est la longueur d'onde de bande interdite du silicium. La longueur d'onde centrale du DBR est  $\lambda_d = 0.85 \mu\text{m}$ , et l'indice de réfraction couche  $n_{AR} = 1.88$ .

Comme nous nous y attendions, la valeur est très proche du plan analytique  $n_{AR} = \sqrt{3.5} = 1.87$ . Ça peut être considéré comme une bonne validation de notre simulation. Puisque nous avons affaire à un problème de bande extrêmement large (300–1200 nm), il n'est pas possible d'avoir une faible réflectivité sur toute la bande de longueur d'onde. Par conséquent, le choix de la longueur d'onde centrale  $\lambda_c$  sera cruciale pour obtenir des réflectivités dans une certaine gamme de longueurs d'onde d'intérêt et atteindre l'efficacité maximale des cellules. Jusqu'au centre la longueur d'onde est concernée, il est nécessaire d'étudier l'effet de l'épaisseur du couche  $t_{AR}$  sur l'efficacité de la cellule car il est devrait être l'épaisseur quart d'onde (longueur d'onde centrale).



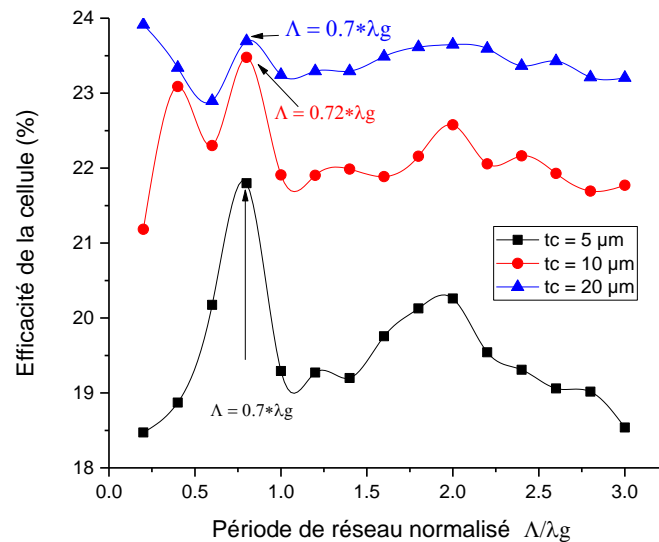
**Fig. IV.2. (b) :** Illustration de l'efficacité globale de la cellule  $\eta$  en fonction de l'épaisseur  $t_{AR}$  de la couche AR.

Dans la figure IV.2.(b) nous représentons l'efficacité des cellules en fonction de l'épaisseur de couche  $t_{AR}$  pour plusieurs épaisseurs de cellules. Les résultats avec différents matériaux de couche sont également présentés à titre de comparaison. L'épaisseur optimale du couche se révèle être  $t_{AR} = 0.13 \lambda_g / n_{AR}$  avec  $n_{AR} = 1.88$ , ce qui correspond à la longueur d'onde centrale  $\lambda_c = 0,576 \mu\text{m}$ . Comme par rapport à la structure sans couche (AR), plus de 30% une augmentation relative de l'efficacité des cellules peut être obtenue en utilisant ce couche (AR) optimisé. Il montre également une tendance plus la couche centrale de silicium est épaisse, plus l'efficacité est grande augmente en raison du couche (AR).

### IV.3.2. L'effet de réseau de diffraction (DBR)

Dans le cadre de la structure du réflecteur arrière, le réseau de diffraction joue un rôle très important dans le mécanisme de piégeage de la lumière pour notre cellules solaires. Il est conçu pour diffracter la lumière sous certains angles basé sur différents ordres de diffraction. Avec une conception optimisé, il est possible de réaliser la plupart de ces angles de diffraction supérieurs à l'angle critique au silicium – air interface (avec la couche AR) de sorte que la plupart des l'énergie sera à nouveau réfléchi dans la couche de silicium (comme illustré à la Figure. IV.1), ce qui conduit par conséquent à l'optique amélioration de la longueur du trajet.

De l'image intuitive de la Figure. IV.1 de prise de lumière, il est évident que le réseau de diffraction est l'élément clé pour améliorer la longueur du chemin. Le DBR seul peut au maximum augmenter la longueur du trajet deux fois en raison du manque de mécanisme de flexion de la lumière dans la structure [65,66].



**Fig. IV.3. (a)** Illustration de l'efficacité globale de la cellule  $\eta$  en fonction de la Période de réseau normalisé.

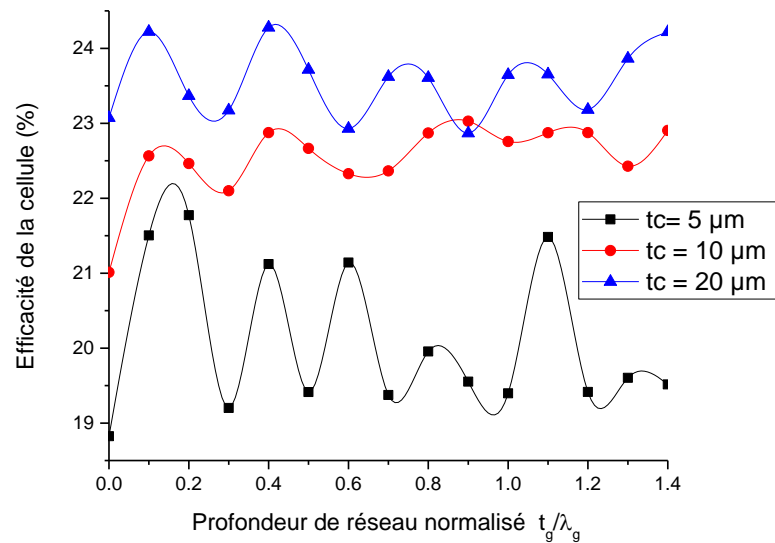
Pour concevoir le réseau de diffraction, trois paramètres doivent être considérés :

- 1- La période de réseau  $\Lambda$ .
- 2- L'épaisseur du réseau  $t_g$ .
- 3- Le rapport cyclique de réseau  $w$ .

Sur la figure IV.3.(a) nous montrons les résultats de simulation de l'efficacité des cellules en fonction de la période de réseau  $\Lambda$ . Dans la simulation, nous avons défini la profondeur de réseau à  $t_g = 0,18\lambda_g$  et le rapport cyclique doit être  $w = 0,5\Lambda$ ; les deux sont des valeurs optimales, comme nous le montrerons plus tard. La structure de monocouche (AR) optimale est utilisée. On constate qu'il y a deux pics appréciables à  $\Lambda = 0,36\lambda_g$  et  $\Lambda = 0,72\lambda_g$  lors du balayage de la période de réseau, comme nous pouvons voir sur la figure IV.3. (a). Cette dernière valeur donne une cellule plus grande efficacité. On pense que ces deux maximums d'efficacité cellulaire sont produits par le réseau de diffraction. Selon notre image

intuitive de piégeage de la lumière, la plus petite période avec un angle de flexion plus grand devrait conduire à une plus grande amélioration d'efficacité cellulaire.

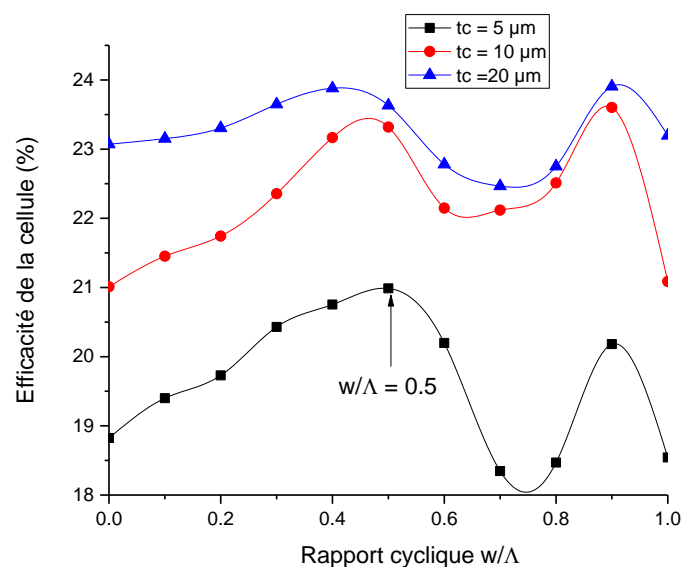
Outre la période de réseau  $\Lambda$ , la profondeur de réseau est un autre paramètre important à optimiser. La figure IV.3.(b) illustre la cellule efficacité en fonction de la profondeur de réseau  $t_g$  lorsque le réseau est fixée à  $\Lambda = 0,72\lambda_g$ . Les résultats obtenus que la profondeur de réseau optimale est à  $t_g = 0,18\lambda_g$  pour les trois épaisseurs de cellule.



**Fig.IV.3 (b) :** Illustration de l'efficacité globale de la cellule  $\eta$  en fonction de la profondeur de réseau normalisé  $t_g$  pour ( $\Lambda = 0,72\lambda_g$ )

L'efficacité des cellules montre une tendance similaire pour différentes épaisseurs. Pour une épaisseur de cellule comprise entre 5 et 20  $\mu\text{m}$ , la variation relative de l'efficacité cellulaire se situe à moins de 18% lorsque la gravure change de profondeur, si nous observons les figures IV.3 (a) et (b) très précisément. C'est principalement parce que le DBR peut fournir une référence de l'efficacité des cellules en tant que réflecteur arrière, même sans réseau. Il s'observe que l'épaisseur du réseau a un effet plus important sur la cellule efficacité pour les cellules plus minces. Dans l'étude suivante, nous allons démontrer que le réseau de diffraction joue un rôle plus important que le DBR dans les cellules à film plus mince et moins dans les cellules plus épaisses.

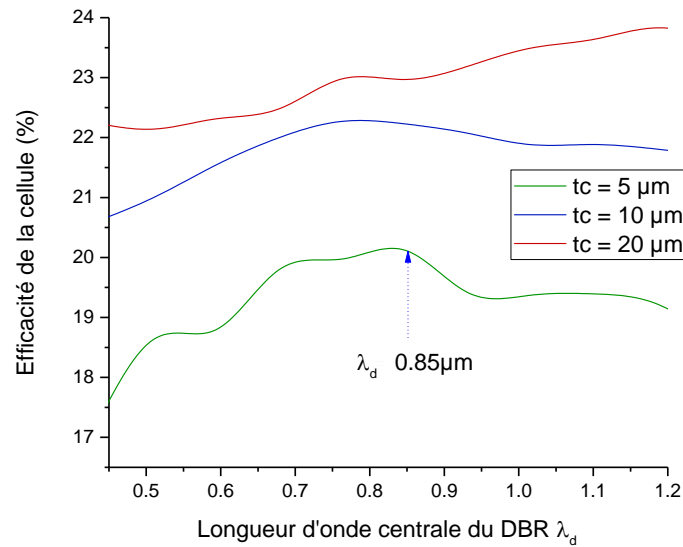
Le dernier paramètre pour le réseau de diffraction est le cycle  $w / \Lambda$ , qui est défini par le rapport de la largeur de la dent (sommet plat) à la période de réseau. La figure IV.3.(c) illustre la relation entre l'efficacité des cellules et le rapport cyclique du réseau lorsque les autres paramètres de réseau optimaux sont appliqués. Le maximum d'efficacité cellulaire a été trouvée à  $w = 0,5\Lambda$ . C'est intéressant pour trouver qu'à  $w \approx 0,88\Lambda$ , il y a une valeur de crête qui n'est que légèrement inférieure à la valeur à  $w = 0,5\Lambda$ . Cependant, l'efficacité de cellule chute rapidement lorsque le rapport cyclique dépasse  $0,9\Lambda$ . Cela indique que les performances de la cellule sont trop sensibles au changement de rapport. Par conséquent, l'occupation de 50% est évidemment un meilleur choix dans cette conception.



**Fig. IV.3. (c) :** Illustration de l'efficacité globale de la cellule  $\eta$  en fonction de rapport cyclique  $W/\Lambda$

### IV.3.3. L'effet de réseau de Bragg (DBR)

Le DBR en tant que partie du réflecteur arrière peut à lui seul améliorer la longueur du chemin optique jusqu'à deux fois selon la théorie des rayons. Comme nous l'avons montré précédemment, il s'agit d'un élément très important structure de piégeage de la lumière et fournit la réflexion de base par recycler la lumière transmise par le réseau de diffraction. La conception de Les DBR sont plutôt simples. Les épaisseurs des paires DBR sont définies comme étant le quart de longueur d'onde des matériaux.



**Fig. IV.4 :** Illustration de l'efficacité globale des cellules  $\eta$  en fonction de la longueur d'onde centrale  $\lambda_d$  du DBR.

Dans notre structure, le DBR empile huit paires de Si / SiO<sub>2</sub>. Le seul paramètre à déterminer est la longueur d'onde centrale  $\lambda_d$ . La figure IV.4 illustre l'effet de la Longueur d'onde centrale DBR. On observe que la sélection de la longueur d'onde centrale est plus importante pour les cellules plus fines que les plus épaisses. Pour les cellules épaisses, la majorité des photons peuvent être absorbé dans une seule longueur de trajet; par conséquent, seule une petite longueur d'onde la portée (proche de la longueur d'onde de la bande interdite) de la lumière devra être améliorée par la longueur du trajet pour améliorer l'absorption. C'est pourquoi on observe que la sélection de la longueur d'onde centrale DBR est moins importante pour les cellules épaisses, comme le montre La figure IV.4. On le trouve que la longueur d'onde centrale  $\lambda_d = 0,85 \mu\text{m}$  peut fournir les meilleures performances pour tous les cas d'épaisseur dans notre étude (5–20  $\mu\text{m}$ ).

#### IV.4. Conclusion

En conclusion, nous avons présenté une optimisation complète de la conception d'une structure de piégeage de la lumière très efficace pour les cellules solaires en silicium cristallin à couche mince. La structure présente une capacité remarquable d'améliorer l'efficacité globale de la cellule jusqu'à deux fois pour les cellules avec une couche de silicium très mince (généralement 2 à 10  $\mu\text{m}$ ). Nous avons étudié les rôles de chacun des éléments de la structure pour contribuer à l'amélioration de l'efficacité.

On constate que le réseau de diffraction est l'élément clé de la combinaison de réflecteurs arrière et est responsable de l'augmentation significative de l'efficacité des cellules solaires à couches minces.

### Conclusion générale

Les cellules photovoltaïques (cellules solaires) sont des composants optoélectroniques qui exposé à la lumière, produit de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque.

Afin d'aboutir vers la parité réseau et de faciliter l'intégration des cellules solaires photovoltaïques dans notre environnement, des absorbeurs en couches minces ont été développés, donnant naissance aux cellules dites de 2ème génération. Aujourd'hui, cet effort de réduction des coûts se poursuit, ce qui se traduit notamment par un amincissement des couches actives. Le rendement de ces cellules ultraminces souffre néanmoins de la faible absorption de la lumière, en particulier pour les longueurs d'onde situées près du gap du matériau absorbant considéré.

Pour traiter ce problème nous avons étudiés une structure qui présente une capacité remarquable d'améliorer l'efficacité globale de la cellule jusqu'à deux fois pour les cellules avec une couche de silicium très mince.

Le réseau de diffraction est l'élément clé de la combinaison de réflecteurs arrière et est responsable de l'augmentation significative de l'efficacité des cellules solaires à couches minces.

## Références

- [1 ] <https://dspace.univouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/15243/1/Belalem-Sandali.pdf>
- [2] ANNE LABOURET, PASCAL CUMUNEL, JEAN-PAUL BRAUN, BENJAMIN FARAGGI, « Cellules Solaires : les bases de l'énergie photovoltaïque », 5ème édition, France, 2010.
- [3] Chapin D.M, Fuller C.S.and Pearson G.L, «A new silicon pn junction photocell For converting solar radiation into», Electrical power J.Appl; phys, vol, 25,
- [4] B. Mounir, D. Laid, « modélisation et simulation d'une cellule solaire en couche mince à base de diséléniure de cuivre, d'indium et de gallium « CIGS » », mémoire de mastre, Université Kasdi Merbah-Ourgla, 2012. Pp.676-677, 677, (1954).
- [5] Wenham S. R., Green M. A. And Watt M. E, «Applied Photovoltaic», Bridge
- [6] Bernard Grehant, « Cours de physique des semiconducteurs », Eyrolles, 1987.
- [7] [https://helloenergie.com/media/wysiwyg/composition\\_d\\_une\\_cellule\\_photovoltaique.jpg](https://helloenergie.com/media/wysiwyg/composition_d_une_cellule_photovoltaique.jpg)
- [8] STEPHANE COUTANSON, « Etude du dopage laser en phases solide et liquide : Application à la formation de jonctions ultra-minces dans le silicium », Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur , Strasbourg I, 2008.
- [9] BOUGUENNA IBRAHIM FAROUK, « Modélisation et Optimisation d'une Cellule Solaire Tandem a-Si:H/a-SiGe », Mémoire de magister, Université Abou-Bekr BELKAÏD ,Tlemcen, 2012.
- [10] RAHMOUNI MAWAHIB, « Etude des cellules photovoltaïques HIT en vue d'améliorer leur rendement », Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf d'Oran, 2010.
- [11] F. A. Rubinelli, J. K. Rath and R. E. I. Schropp, J. Appl. Phys. 89, 4010 (2001).
- [12] J.K.Rath et al., Proceedings of the 18 European Photovoltaic. Solar Energy Conference, 1995
- [13] J.Tauc (1972) Optical Properties of Solids, edited by Abeles.F, 277
- [14] M.Vanecek, I.Kocka, J.Stuchl et A. Trista, solid State comm.39 1981

## Références

---

- [15] Salaheddine Bensalem, « Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires », Thèse magister, université FERHAT ABBAS – SETIF, 2011
- [16] M. Sablier, “Spectrométrie de masse - Principe Électricité photovoltaïque marchés et appareillage Par : Électricité photovoltaïque Matériaux et marchés,” *Renewable Energy*, 2015.
- [17] MECHERI ABDESLEM , SANDALI ABD ELAZIZ, « Simulation d’une cellule solaire photovoltaïque à base d’hétérojonction : a-Si:H(n)/c-Si(p) », Mémoire de master, Université Kasdi Merbah de Ouargla, 2015.
- [18] A. Parker, « *In the blink of an eye: the most dramatic event in the history of life* », (Free press, London, 2003).
- [19] H. A. Macleod, « *Thin film optical filters* », 3rd ed. (Institute of Physics, London, 2001).
- [20] E. Yablonovitch, « *Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics* », *Phys. Rev. Lett.* 58, 2059–2062 (1987).
- [21] S. John, « *Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices* » ,*Phys. Rev. Lett.* 58, 2486–2489 (1987).
- [22 ] <https://ses.library.usyd.edu.au/bitstream/handle/2123/924/02whole.pdf>
- [23] FILALI Meryem, « *Etude et Conception d’un démultiplexeur 8 canaux à cristaux photoniques bidimensionnels* », mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf - M’sila 2018.
- [24] [https://www.researchgate.net/figure/Representation-schematique-dun-cristal-photonique-1D-2D-ou-3D\\_fig7\\_301570255](https://www.researchgate.net/figure/Representation-schematique-dun-cristal-photonique-1D-2D-ou-3D_fig7_301570255)
- [25] [http://live.iop-pp01.agh.sleek.net/2015/01/09/natural-photonics/pugpig\\_index.html](http://live.iop-pp01.agh.sleek.net/2015/01/09/natural-photonics/pugpig_index.html)
- [26] [http://www.uvm.edu/~dahammon/Structural Colors/Structural Colors/Opals And Photonic Crystals.html](http://www.uvm.edu/~dahammon/Structural%20Colors/Structural%20Colors/Opals%20And%20Photonic%20Crystals.html)
- [27] O. Graydon, G.J. Parker, and R. Sambles. « *Nature’s nanostructures colour wings and stones* ». *Opto and Laser Europe*, 51 :31–36, Jun 1998
- [28] FEDAOUCHE Amal, « *Application de la Méthode des Différences Finies dans le Domaine Temporel FDTD-2D pour l’Analyse et l’Optimisation de Composants à base des*

## Références

---

*Cristaux Photoniques Bidimensionnels CPs-2D pour l'Optique Intégrée* »,Thèse de doctorat ,  
Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen, 2018

[29] M. Pomarède, *la couleur des oiseaux*, *Pour la Science*, n° 261,p.92, juillet 1999

[30] Benaïssa Fatima, « *Etude et Simulation de la Propagation des Ondes Electromagnétiques dans les guides à Cristaux Photoniques-Application aux Fibres Optiques* » , mémoire de magister, L'université Abou-Bakr Belkaïd – TLEMCEM, 2013

[31] <https://ricochets.info/2016/11/14/la-vie-est-bleue-comme/>

[32] Xiaoming Tao, « *Wearable photonics based on integrative polymeric photonic fibers*,2005

[33] BENMANSOUR Amel, « *Modélisation et simulation de la propagation d'une onde Électromagnétique (EM) dans les cristaux photoniques* », mémoire de master, Université Abou-Bekr Belkaid – Tlemcen,2017

[34] JOANNOPOULOS John D., JOHNSON Steven G., WINN Joshua N., et al. « *Photonic crystals: molding the flow of light* ». Princeton university press, second édition, (2008)

[35] BENACHOUR Yassine. « *Optimisation de cristaux photoniques pour l'optique non linéaire* ». Thèse de doctorat. Université Paris Sud-Paris XI, (2008)

[36] Pascal Massé, « *Cristaux photoniques colloïdaux d'architecture contrôlée* »,Thèse de doctorat, L'université Bordeaux I ,2008

[37] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Cristal\\_photonique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Cristal_photonique)

[38] Barbara WILD, « *étude expérimentale des propriétés optiques des cristaux photoniques bidimensionnels et de leur accordabilité* »,thèse de doctorat, école polytechnique fédérale de lausanne ,2006

[39] ZAKARIYA OULMANE, AMMAR BELHOUL, « *Réalisation d'une interface graphique pour le calcul des bandes interdites dans les cristaux photoniques 2D* », mémoire de master, Université Mohamed Seddik Benyahia – JIJEL,2019

[40] K. M. Ho, C. T. Chan, and C. M. Soukoulis, « *Existence of a photonic gap in periodic dielectric structures* », *Phys. Rev. Lett.* 65, 3152–3155 (1990).

## Références

---

- [41] E. Yablonovitch, T. J. Gmitter, and K. M. Leung, « *Photonic band structure: the face-centered-cubic case employing non-spherical atoms* », *Phys. Rev. Lett.* 67, 2295–2298 (1991).
- [42] S. Y. Linn, J. G. Fleming, D. L. Hetherington, B. K. Smith, R. Biswas, K. M. Ho, M. M. Sigalas, W. Zubrzycki, S. R. Kurtz, and J. Bur, « *A three-dimensional photonic crystal operating at infrared wavelengths*, » *Nature* 394, 251–253 (1998).
- [43] J. G. Fleming and S. Y. Lin, « *Three-dimensional photonic crystal with a stop band from 1.35 to 1.95  $\mu\text{m}$* , » *Opt. Lett.* 24, 49–51 (1999).
- [44] S. Noda, K. Tomoda, N. Yamamoto, and A. Chutinan, « *Full three-dimensional photonic bandgap crystals at near-infrared wavelengths* », *Science* 289, 604–606 (2000).
- [45] M. O. Jensen and M. J. Brett, « *Square spiral 3D photonic bandgap crystals at telecommunications frequencies* », *Opt. Express* 13, 3348–3354 (2005).
- [46] LEFAUCHEUX Françoise, CECILE Malgrange, CHRISTIAN Ricolleau, « *Symétrie et propriétés physiques des cristaux* », (2011)
- [47] KITTE Charles. « *Introduction to solid state. John Wiley & Sons* », *Eighth.édition*, (2005)
- [48] LABBANI Amel. « *Matériaux BIP à base de nanoparticules métalliques et semi conductrices : étude des propriétés optiques par FDTD* ». *Thèse de doctorat. Saint-Etienne, 2009*
- [49] LOURTIOZ Jean-Michel et BENISTY Henri. « *Les cristaux photoniques ou la lumière en cage. Hermes-Science* », (2003)
- [50] GAUFILLET Fabian. « *Cristaux photoniques à gradient : dispositifs et applications.* » *Thèse de doctorat. Université Paris Sud, (2014)*
- [51] 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)*
- [52] Sébastien MASSENOT, “*Study, modelling and realization of diffractive components: Contribution to the study of tunable materials and applications to holographic recordings of*

## Références

---

*resonant optical filters*”, thèse de doctorat , L’ecole Nationale Supérieure Des Telecommunications De Bretagne, 2006

[53] G. Gomard, « *Cristaux photoniques pour le contrôle de l’absorption dans les cellules solaires photovoltaïques silicium ultraminesces* », Thèse de doctorat, École Centrale de Lyon, octobre 2012

[54] Chirag Murendranath Patil, « *Experiments on Glide-Symmetric Photonic-Crystal Waveguides* », Thèse de doctorat, Université de Copenhague, 2020

[55] [https://www.rp-photonics.com/phase\\_velocity.html](https://www.rp-photonics.com/phase_velocity.html)

[56] [https://www.rp-photonics.com/group\\_velocity.html](https://www.rp-photonics.com/group_velocity.html)

[57] [https://www.rp-photonics.com/refractive\\_index.html](https://www.rp-photonics.com/refractive_index.html)

[58] Sandrine MASSY, « *Contribution à la réalisation de fonctions optiques à base de cristaux photoniques sur LiNbO<sub>3</sub>* », thèse de doctorat, Université de Limoges, 2004

[59] L. Peres, « *Cristaux photoniques bidimensionnels pour l’absorption de La lumière dans les cellules solaires organiques* ». *Électronique, French., NNT : 2014BORD0377, tel-01147134, Université de Bordeaux, 2014.*

[60] D. Imad-Eddine, « *simulation et optimisation d’un diviseur 1x8 à base de cristaux photoniques bidimensionnels. Modélisation par la méthode ftdt-2d* » *Mémoire de Master, Université de Tlemcen ,2014*

[61] A. Abderrahmane « *Etude et modélisation de la bande interdite photonique dans les cristaux photoniques bidimensionnels : cas d’une structure connectée* », *Mémoire de Master, Université de m’sila 2010.*

[62] R soft Design Group, diffractmod.

[63] C. Sauvan, « *Etude de la propagation et du confinement la lumière dans des nanostructures* », These Docteur, Université Paris xiorasay, 13 octobre 2005.

[64] Graydon, *Natures nanostructures color wings and stones*, Opto Lser Europe, 51, pp.31-36, Joan 1998.

## Références

---

[65] M. Z. Shvarts, O. I. Chosta, I. V. Kochnev, V. M. Lantratov, and V. M. Andreev, “Radiation resistant AlGaAs/GaAs concentrator solar cells with internal Bragg reflector,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 68, no. 1, pp. 105–122, Apr. 2001.

[66] D. C. Johnson, I. Ballard, K.W. J. Barnham, D. B. Bishnell, J. P. Connolly, M. C. Lynch, T. N. D. Tibbits, N. J. Ekins-Daukes, M. Mazzer, R. Airey, G. Hill, and J. S. Roberts, “Advances in Bragg stack quantum well solarcells,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 87, no. 1–4, pp. 169–179, 2005.