

## **II.1 Introduction**

Les cristaux photoniques (CP) ou matériaux à Bande Interdite Photonique sont des structures dont le constant diélectrique varie de manière périodique à l'échelle de la longueur d'onde, sur une ou plusieurs directions de l'espace (BIP 1D, 2D et 3D).

L'objectif de ce premier chapitre est de présenter les concepts de base et la théorie fondamentale des cristaux photoniques et d'introduire les cristaux photoniques bidimensionnels qui nous intéressent dans notre travail. Tout d'abord, nous donnerons quelques définitions sur les cristaux photoniques, Nous verrons les différents types de réseaux, la forme du motif élémentaire et les différents types de défauts.

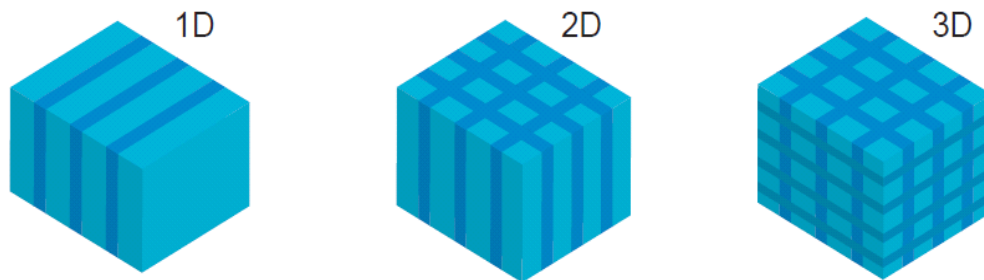
## **II.2 Généralités sur les cristaux photoniques**

### **II.2.1. Historique sur les cristaux photoniques**

Un cristal photonique est un matériau dont la constante diélectrique varie périodiquement dans une ou plusieurs directions de l'espace. Cette définition qui peut sembler très simple, a pourtant d'importantes conséquences. En effet, si la période de modulation de la constante diélectrique est de l'ordre de la longueur d'onde de la lumière utilisée, cette modulation conduit à l'apparition d'intervalles d'énergie ayant une densité de modes électromagnétiques nulle [25] c'est-à-dire qu'aucune radiation lumineuse (quelque soit sa polarisation et sa direction de propagation) ne peut s'y propager. Historiquement, cette idée a été proposée pour la première fois par Yablonovitch [26], donc la "date de naissance" des cristaux photoniques serait le 1987, ce qui en ferait une idée assez neuve. Pourtant, on sait que des matériaux dont l'indice varie périodiquement sont connus et utilisés depuis longtemps sous le nom de miroirs de Bragg. On n'est pas tort, car effectivement les miroirs de Bragg sont des cristaux photoniques à une dimension [26]. Mais la force de l'article de Yablonovitch était d'étendre cette idée, de faire des miroirs de Bragg un concept général en s'appuyant pour cela sur les idées développées en physique du solide. C'est en cela que Yablonovitch est considéré comme le "père" des cristaux photoniques.

### II.2.2. Définition

Les cristaux photoniques sont des matériaux dont l'indice de réfraction est modulé périodiquement à l'échelle de la longueur d'onde, selon une ou plusieurs dimensions de l'espace (figure II-1). Ces structures peuvent être obtenues par arrangement périodique de matériaux différents. Leur forme la plus simple est une structure périodique à une dimension composée d'un empilement de couche également appelé « miroir de Bragg ». Les cristaux photoniques ont la capacité d'inhiber la propagation de la lumière dans certaines directions pour une gamme de fréquences, il en résulte une bande interdite photonique (BIP). Cette particularité optique intervient lorsque la longueur de la maille du cristal est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde de la lumière dans le milieu. Ce phénomène est dans une certaine mesure analogue à celui de l'ouverture de bandes interdites électroniques dans des cristaux atomiques de matériaux semi conducteurs. On peut noter qu'il existe des cristaux photoniques naturels tels que les opales. [27]



**Figure II-1 :** Schéma de différents genres de cristaux photoniques, (1D) le cristal photonique est fait en alternant des couches de matériaux, (2D) cristal photonique bidimensionnel est fait par les circulaires colonnes. Un tridimensionnel (3D) le cristal photonique est fait par un arrangement des sphères diélectriques [27]

### II.2.3. Analogie électron photon

Les équations gouvernant la propagation de la lumière dans un cristal photonique sont les quatre équations de Maxwell.

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

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

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

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

Après simplification des équations et en appliquant un ensemble d'opérations, on obtient

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

L'équation (I-5) est l'analogue formel de l'équation de Schrödinger décrivant le mouvement des électrons dans le potentiel périodique d'un cristal,  $H(r)$  étant l'analogue électromagnétique de la fonction d'onde électronique  $\psi(r)$  et  $\varepsilon(r)$  l'analogue du potentiel atomique  $V(r)$  [28].

#### II.2.4. Les types des cristaux photoniques (matériaux à BIP) :

##### II.2.4.1. Périodicité à une dimension

Les matériaux à bandes photoniques interdites unidimensionnels (1D) possèdent une permittivité électrique périodique dans une direction et uniforme dans les deux autres directions. La figure II-2 montre qu'ils consistent en un empilement de deux couches alternées de matériaux homogènes ayant des constantes diélectriques  $\varepsilon$  différentes. Ces structures existent depuis longtemps et sont utilisées en optique pour obtenir des miroirs sans pertes (miroirs de Bragg) ou des filtres.[29]

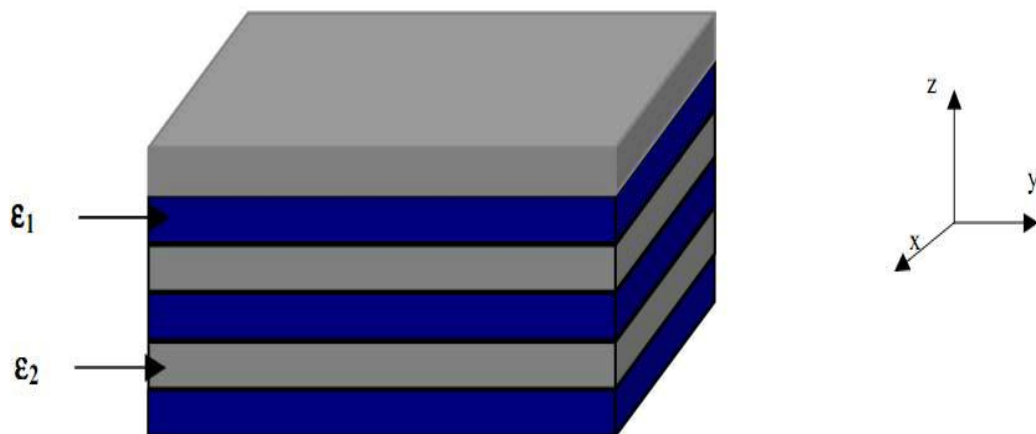


Figure II-2: BIP unidimensionnel, empilement de couches de permittivités différentes.[29]

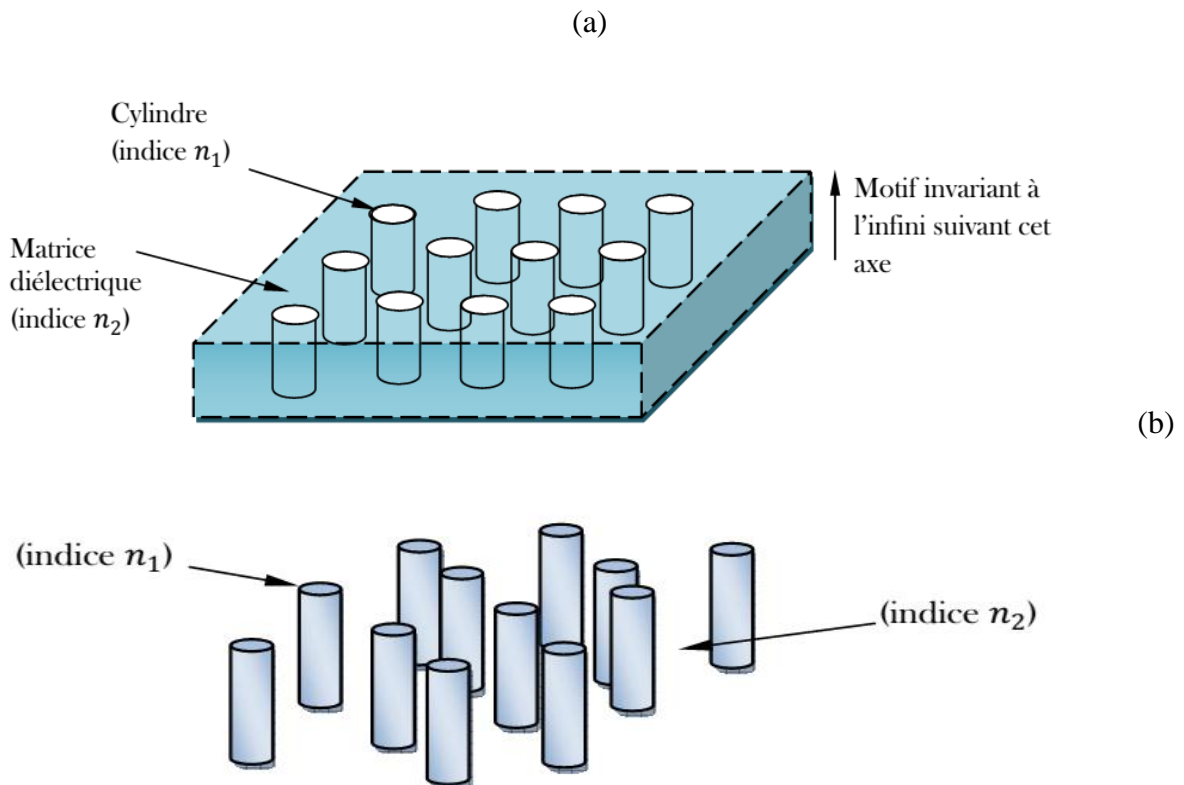
### II.2.4.2 Périodicité à deux dimensions :

Les structure des matériaux 2D sont des cristaux dont la constante diélectrique est structurée périodiquement dans les deux dimensions et reste homogène dans la troisième [30]. Il existe deux types de structures périodiques diélectriques :

**a-Les structures dites « connectées »** (figure II.3.a): les motifs élémentaires sont d'indice  $n_1$  inférieur à l'indice  $n_2$  de la matrice diélectrique.

**b-Les structures dites « déconnectées »** (figure II.3.b): les motifs élémentaires sont d'indice  $n_1$  supérieur à l'indice  $n_2$  de l'espace inter motifs. Elles sont constituées de tiges diélectriques ou métalliques alignées périodiquement dans l'air.

Il existe structure deux polarisations sont possibles pour les ondes électromagnétiques. La polarisation électrique (TE) correspond au cas où le champ électrique  $E$  est parallèle aux motifs de la structure considérée de longueur infinie, et la polarisation magnétique (TM) lorsque le champ magnétique  $H$  est parallèle aux motifs.



**Figure II.3 :** (a) Structure à deux dimensions 2D connectée (b) Structure à deux dimensions 2D déconnectée .[32]

### II.2.4.3. Périodicité à trois dimensions:

Les cristaux photoniques tridimensionnels sont des structures dont la permittivité diélectrique est structurée périodiquement dans les trois directions. Elles ont été les deuxièmes à être réalisées par **Yablonovitch** après les réseaux de Bragg. Son objectif était d'obtenir une bande interdite complète pour toutes les directions de l'espace afin d'inhiber l'émission spontanée de la lumière [25].

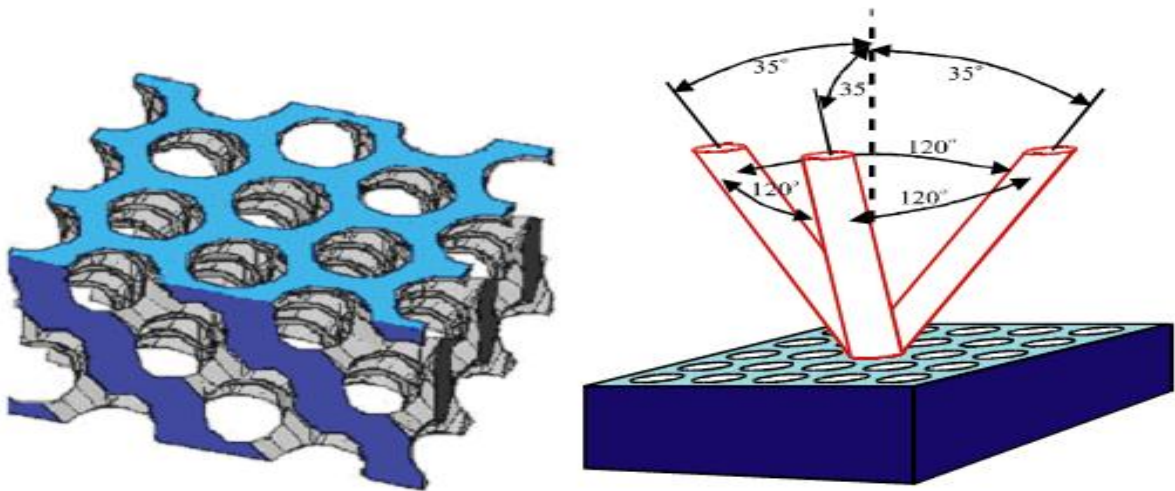


Figure II-4 : La première structure BIP 3D: la yablonovite. [25]

### II.2.5 Différentes familles de cristaux photoniques à deux dimensions :

Les réseaux périodiques à deux dimensions se regroupent principalement suivant trois Familles (figure II.4) [31].

**a- Le réseau carré :** Les nœuds du réseau sont situés sur un carré de côté «  $a$  » (Figure II.4.a).

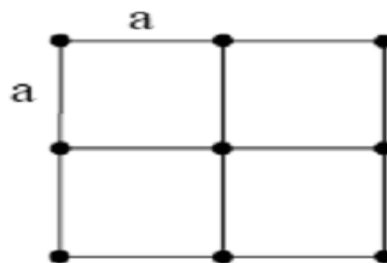
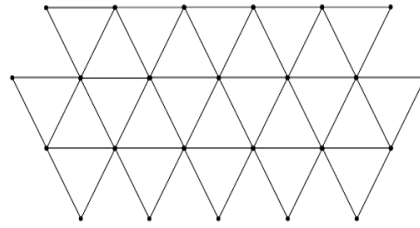


Figure II.4.a : réseau carré [3]

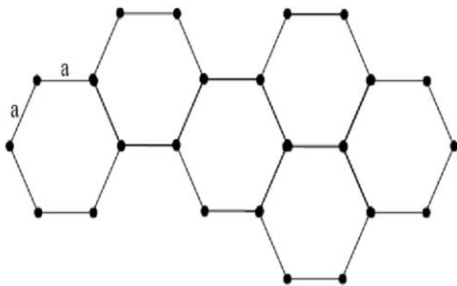
**b- Le réseau triangulaire :** Chaque nœud du réseau est espacé de son proche voisin d'une même distance «  $a$  » (Figure II.4.b).



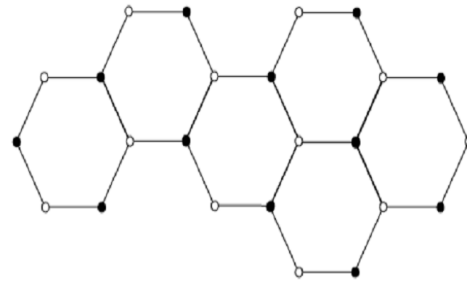
**Figure II.4.b :** réseau triangulaire [3]

**c- Le réseau hexagonal :** Sur un réseau hexagonal, si tous les nœuds sont identiques et espacés de «  $a$  » on a deux structures de réseau hexagonal :

La structure graphite (figure II.4.c) et la structure nitrure de Bore (figure II.4.d)



**Figure II.4.c :** La structure graphite [3]



**Figure II.4.d :** la structure nitrure de Bore [3]

## II.2.6. Caractéristiques géométriques et physiques d'un cristal photonique

Les cristaux photoniques sont caractérisés par : les différents matériaux qui le composent, le système cristallin selon lequel ces matériaux sont organisés et les volumes relatifs qu'ils occupent dans la cellule élémentaire du cristal. Les quantités représentatives de ces différentes caractéristiques sont :

### II.2.6.1. Le contraste d'indice $\delta$

Rapport entre les indices des deux matériaux, qui peut être comparé à la hauteur de la barrière de potentiel de la physique du solide.

$$\delta = n_h/n_1$$

Avec :  $n_h$  : l'indice de réfraction du matériau de haut indice.

$n_1$  : L'indice de réfraction du matériau de bas indice.

### II.2.6.2. Les périodes

Ces paramètres géométriques, choisis selon le domaine de fréquence étudié, influent sur les caractéristiques de la bande interdite photonique. par exemple pour un cristal photonique unidimensionnel, la période  $a = (a_1 + a_2)$  avec  $a_1$  l'épaisseur de la couche de permittivité  $\epsilon_1$  et  $a_2$  l'épaisseur de la couche de permittivité  $\epsilon_2$  (figure II.5)

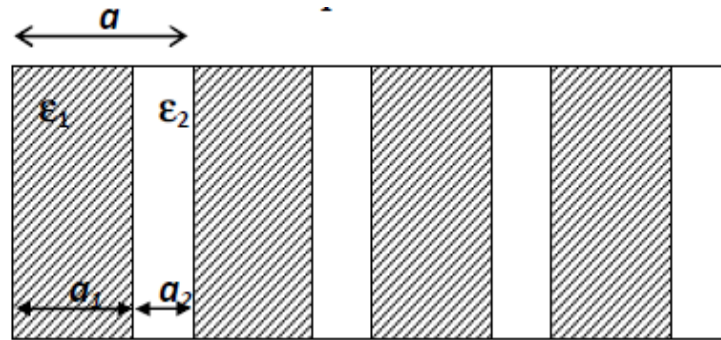


Figure II.5 : Les périodes d'un cristal photonique unidimensionnel

### II.2.6.3. Le facteur de remplissage f

Peut être comparé au largeur du potentiel périodique. S'il est pris pour le matériau de haut indice par exemple, il est défini comme le rapport entre le volume occupé par ce matériau dans la cellule élémentaire du cristal et le volume de cellule de cette dernière. L'influence de ces différents paramètres sur le comportement d'une structure photonique peut être comprise par analogie avec un potentiel périodique induit de l'arrangement des atomes dans un semi-conducteur.

### II.2.7. Les type de défauts de cristaux photoniques :

Les cristaux photoniques ne permettront de réaliser de véritables fonctions optiques et de contrôler les flux de lumière que si l'on y introduit des défauts.

Comme pour les cristaux solides, il existe deux principaux types de défauts : les défauts ponctuels et les défauts étendus. Les premiers associés à une rupture locale de périodicité, se traduisent par la présence de modes électromagnétiques à des fréquences discrètes, analogues aux défauts électroniques. Les seconds, que l'on peut considérer comme analogues aux dislocations, peuvent donner lieu à des bandes permises de propagation, là où se trouve une bande interdite dans le cristal idéal.

### II.2.7.1. Les défauts ponctuels

Il existe de multiples manières de créer des défauts ponctuels dans les cristaux photoniques. On peut aussi procéder au retrait, à l'ajout ou à la modification d'un ou plusieurs motifs du cristal. Pour reprendre la terminologie de la physique du solide, on réalise alors des défauts lacunaires ou de substitution (Figure II-6). Dans tous les cas de figure, on crée des cavités optiques dont les modes de résonances vont venir se positionner en énergie au sein des

bandes interdites du cristal. (figure II-7) présente le spectre de transmission calculé d'un cristal 2D de symétrie hexagonale et formé de tiges diélectriques, où le défaut est dû à une tige manquante. Si le spectre de transmission reste, pour une grande part, identique à celui du cristal sans défaut avec une bande interdite comprise entre  $0.9$  et  $1.3\mu m$  de longueur d'onde, la présence du défaut se traduit par un pic de transmission étroit et unique à  $1.1\mu m$ . On a donc affaire, dans ce cas, à une cavité uni modale, pour autant que l'on puisse se restreindre à un système bidimensionnel. Le caractère uni modal n'a tout son sens que dans le cas tridimensionnel [32].

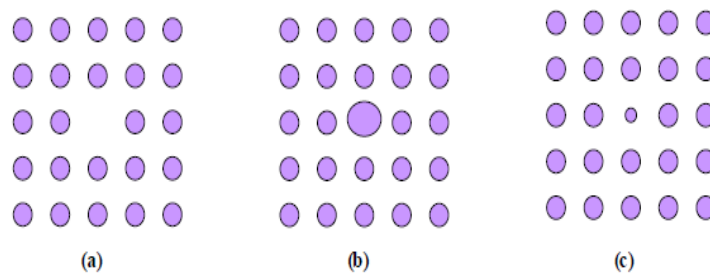


Figure II-6: (a) Défaut lacunaire ; (b) et (c) Défauts de substitutions. [32]

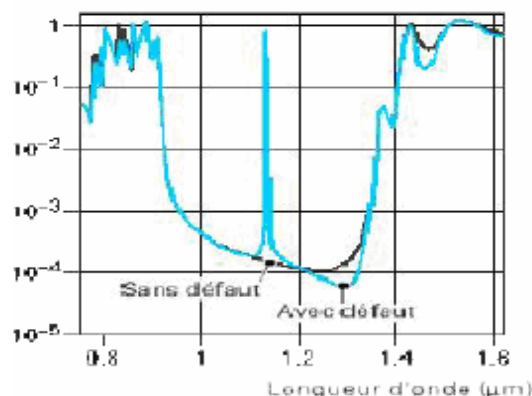


Figure II-7 : Spectre de transmission d'un cristal hexagonal de tiges diélectriques avec ou sans défaut lacunaire [32]



### II.2.7.2. Les défauts étendus

Les défauts étendus, de dimension 1, 2 ou 3, ne peuvent évidemment être obtenus que dans les cristaux de dimension au moins équivalente. Parmi ces défauts, les défauts 1D (W1) (Figure II-8), sont certainement ceux qui ont suscité le plus grand nombre d'études car ils ont vocation à être utilisés comme guides de lumière au sein d'un cristal donné. On peut d'ailleurs imaginer des défauts 2D (W2) ou 3D (W3) constitués d'une suite de guides W1, mis bout à bout et orientés dans les directions différentes, de façon à véhiculer la lumière sur tous les chemins possibles à l'intérieur du cristal. Une façon de réaliser un tel guide consiste à placer des défauts ponctuels, couplés et régulièrement espacés, dans une direction du cristal 2D. Le couplage entre une infinité de résonateurs conduit à une bande de propagation permise dans la direction de l'alignement. Ce type de guide à résonateurs couplés a été proposé en 1999 [25].

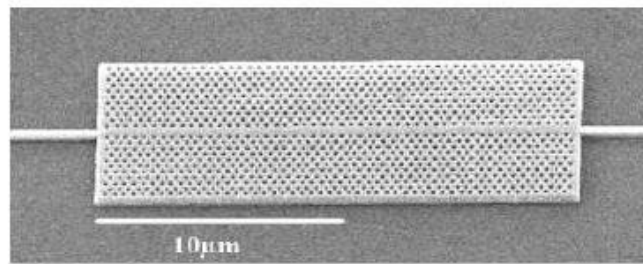


Figure II-8 : Exemple de guide W1 à cristal photonique hexagonal de trous d'air sur un substrat de silicium sur isolant [26]

## II.3. Guides d'ondes

Le développement d'une optique intégrée à base de cristaux photoniques 2D passe par la conception et la réalisation de guides optiques performants. La première idée des guides d'ondes est apparue en 1994 sous l'impulsion de Joannopoulos, Meade et al, mais les premières réalisations sont été effectuées cinq à six ans plus tard [33].

### II.3.1. Différents types des guides d'ondes

#### a-Guide d'onde linéique

Les guides à cristaux photoniques sont obtenus en créant un défaut linéique dans le cristal. Au sein de ces défauts, des modes ayant une fréquence appartenant à la bande interdite photonique peuvent exister. Pour des cristaux photoniques bidimensionnels, un guide à cristal photonique peut être créé en retirant (ou modifiant) directement une ou

plusieurs rangées de motifs du cristal photonique [34]. Les guides formés de l'omission d'une ligne de trous sont appelés W1, ceux de deux lignes de trous W2, etc. ...

Deux exemples sont rapportés sur la figure II-9 dans le cas d'un cristal 2D hexagonal.

-Le premier exemple (Figure II-10 (a)) représente un défaut obtenu en retirant une rangée de motifs dans la direction  $\Gamma M$ .

-Le deuxième exemple (Figure II-10(b)) correspond à un défaut obtenu en retirant une rangée de motifs dans la direction  $\Gamma K$ .

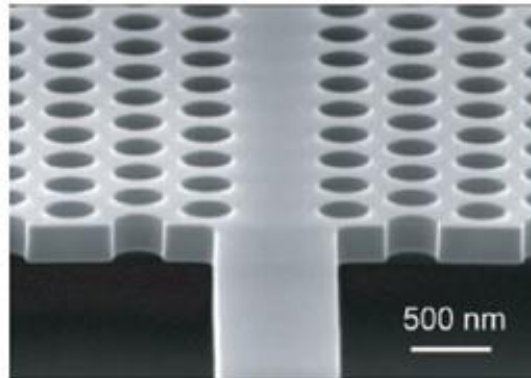
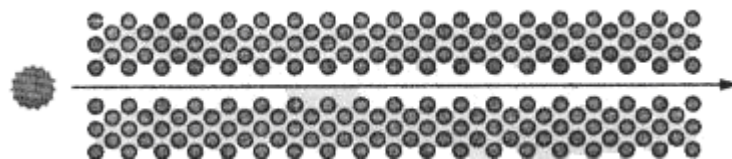
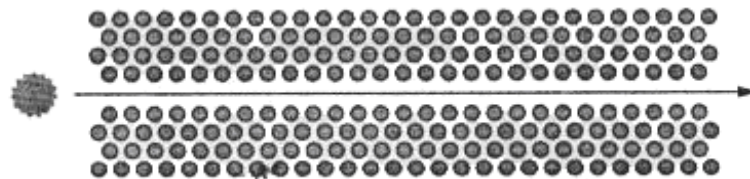


Figure II-9: Représentation réelle d'un guide d'onde de largeur  $W$  à base d'un CP2D



(a) guide obtenu par retrait d'une rangée de motifs dans la direction  $\Gamma M$ .



(b) guide obtenu par retrait d'une rangée de motifs dans la direction  $\Gamma K$ .

Figure II-10: Exemple de guides d'ondes dans un cristal photonique hexagonal.

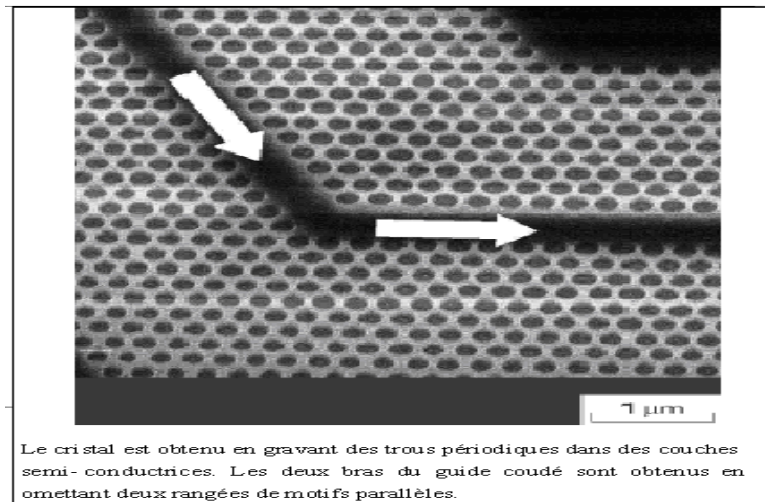
L'enjeu principal de ces guides d'ondes concerne les pertes. Pour les guides larges (plusieurs rangées de trous omises), les pertes sont considérables

### b-Guide d'onde courbée

Les guides courbés constituent également un domaine d'application privilégié des cristaux photoniques car ils permettent théoriquement de réaliser des virages avec des

rayons de courbure de l'ordre de la longueur d'onde (figure II- 11). Dans le guide virage il y a des problèmes de réflexion et les pertes subsistent, ces virages peuvent être réalisés simplement en omettant de graver des trous dans les directions de symétrie du cristal (virages à 60 et 120°). Dans le cas des virages simples à 60°, les meilleurs résultats mesurés ont été des transmissions d'environ 80 à 90 % pour un guide étroit (W1) [33].

Le virage peut-être amélioré en ajoutant ou supprimant des trous ou encore en modifiant la topologie du coude.



**Figure II-11 : Virage réalisé dans un cristal photonique bidimensionnel [33].**

La démonstration expérimentale du guidage dans des virages a été réalisée rapidement, mais des problèmes de réflexion et de pertes subsistent. Dans le cristal photonique hexagonal ou triangulaire, ces virages peuvent être réalisés simplement en omettant de graver des trous dans les directions de symétrie du cristal virage. Dans le cas des virages simples, les meilleurs résultats mesurés sont été des transmissions d'environ 80 à 90 % pour un guide étroit (une rangée de trous omise) et de 78 % pour un guide plus large [35].

## II.4. Les cavités en cristaux photoniques

### II.4.1. définition

Une cavité optique se définit comme un résonateur électromagnétique où la lumière est confinée spatialement et spectrale ment. Ces résonateurs fonctionnent comme des « pièges à photons ». En effet, lorsque la cavité résonne, la lumière effectue un grand nombre d'allers retours et se retrouve ainsi temporairement bloquée. Deux types de confinement sont mis en œuvre dans la littérature.

Dans un premier cas la lumière est confinée par la réflexion totale interne qui découle des lois de Snell-Descartes. A l'interface entre deux matériaux et pour un angle d'incidence inférieur à un angle critique fonction de la différence d'indice entre les deux matériaux la lumière est totalement réfléchi. Cette même approche dérivée de l'optique géométrique permet aussi de décrire la propagation de la lumière dans un guide d'onde.

Des exemples de confinement par réflexion totale interne sont donnés par les résonateurs à mode de galerie comme les micro-disques, microsphères, micro-tores et micro-anneaux.

Dans le second cas le confinement est obtenu par réflexion sur un miroir périodique ou miroir de « Bragg ». Ce genre de miroir se retrouve dans les lasers à émission verticale (Vertical Cavity Surface Meeting Laser ou VCSEL), ce sont des cristaux photoniques à une dimension. On peut aussi imaginer des cavités à cristaux photoniques de dimension supérieure. Ces cavités utilisant la réflexion par une structure périodique sont assimilables à des cavités Fabry-Pérot.

#### II.4.2. Les différents types de cavités

Il existe plusieurs types de cavités, elles dépendent de la forme de réseau (triangulaire, hexagonale ou carré), et de nombre de défauts (omission d'un ou plusieurs sites); parmi Ces cavités nous citons :

##### II.4.2.1. Cavité hexagonale

Dans un cristal triangulaire, les cavités hexagonales, dont les côtés sont les rangées denses, constituent une série de cavités canoniques. Il est commode de les nommer par le nombre de périodes le long de chaque côté. Ainsi, un seul trou manquant correspondra à  $H_1$ , sept trous manquants à  $H_2$ , etc. (figure II -12). Les cavités de type  $H_n$ , de forme hexagonale, n'étant le nombre de rangées manquantes par côté de l'hexagone sont les plus étudiées [36].

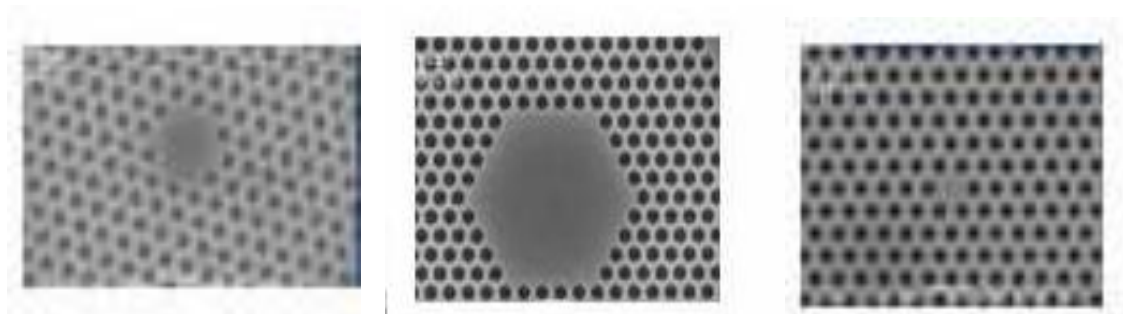
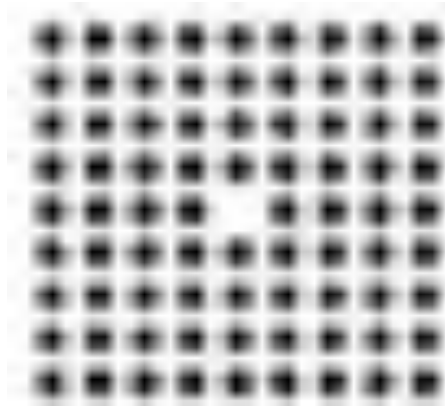


Figure II-12: Les différents types de cavités [37].

### II.4.2.2. Cavity carré

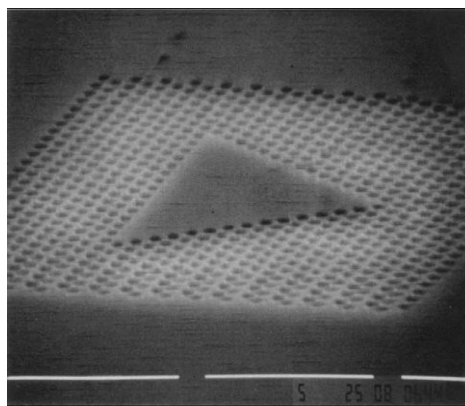
Dans un réseau bidimensionnel carré, les cavités sont de type  $S_n$ , de forme carrée, n'étant le nombre de lignes et de rangées manquantes du carré. Par exemple la cavité S1 est constituée en omettant une ligne et une rangée.



**Figure II -13 :** *Exemple de cavité carrée dans un cristal photonique carré avec un paramètre de maille 600nm [38].*

### II.4.2.3. Cavity triangulaire

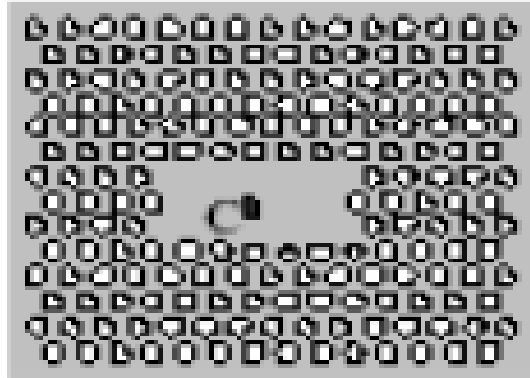
La Figure II-14 représente la cavité triangulaire, cette cavité est obtenue en omettant plusieurs trous dans un réseau triangulaire de trous d'air de section circulaire ( $r = 200 \text{ nm}$ ) plonge dans une matrice diélectrique ( $\epsilon=8.12$ ).



**Figure II-14:** *Exemple de cavité triangulaire dans un cristal photonique triangulaire avec un paramètre de maille 600nm. [39]*

#### II.4.2.4. Cavity rectangulaire

Le réseau CP2D triangulaire est défini par les paramètres suivant : paramètre de maille  $a=560\text{nm}$ , La figure II-15 représente une cavité rectangulaire correspondant à l'omission de 3 rangées finies de trous dans le CP.



**Figure II-15:** *Exemple de cavité rectangulaire dans un cristal photonique triangulaire avec un paramètre de maille 560nm [40].*

#### II.5.Conclusion :

Les cristaux photoniques sont des matériaux dont l'indice diélectrique varie de manière périodique à l'échelle de la longueur d'onde, sur une ou plusieurs directions de l'espace. Cette variation périodique de l'indice optique suivant les différentes directions entraîne l'apparition de gammes de fréquence pour laquelle la lumière ne peut alors plus se propager.

L'objectif de ce chapitre est d'étudier les notions théoriques des cristaux photoniques. Nous avons étudié les différents types des cristaux photoniques et les types de défauts créés pour réaliser les composants optiques en particulier les cavités à cristaux photoniques, les différents types de cette dernière et les guides d'ondes.