

I.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).

Le premier chapitre a pour objet de présenter brièvement les notions de base concernant les cristaux photoniques, les cavités à cristaux photoniques. Nous commencerons par une présentation générale des cristaux photoniques, en insistant sur la notion de bande interdite photonique, les différents types des cristaux photoniques et les différentes stratégies de défaut dans les CP.

I.2. Généralités sur les cristaux photoniques

I.2.1. Historique sur les cristaux photoniques

C'est en 1987 qu'Eli Yablonovitch et Sajeev John, en cherchant à réduire l'émission spontanée de lumière dans les lasers et les semi-conducteurs, proposent un nouveau moyen de construire un miroir de Bragg, proposé par W. L. Bragg depuis la fin du XIX^e siècle, à plusieurs dimensions. L'idée consiste à réaliser une structure périodique à trois dimensions par un assemblage régulier de sphères, de cylindres et/ou de poutres [2].

Une première réalisation fonctionnant aux longueurs d'onde centimétriques a été présentée par Yablonovitch en 1991. La structure proposée, la Yablonovite, Il s'agit d'un bloc de plexiglas usiné dans trois directions différentes séparées de 120° permettant de reproduire la structure cristalline du diamant. En réalité, le matériau BIP ainsi réalisé est une extension tridimensionnelle aux fréquences micro-ondes des miroirs de Bragg. Etant construit à partir d'un empilement périodique de couches diélectriques d'indices de réfraction différents dans une seule direction de l'espace, ces derniers ne permettent de contrôler la lumière que dans cette même direction. Au contraire, les matériaux BIP tridimensionnels peuvent réaliser une bande interdite complète dans toutes les directions de propagation et pour toutes les polarisations possibles de l'onde [3].

C'est en cela que Yablonovitch est considéré comme le "père" des cristaux photoniques [4].

I.2.2.Définition

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. La périodicité peut être unidimensionnelle 1D (miroir de Bragg), bidimensionnelle 2D ou encore tridimensionnelle 3D (Figure I.1). 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. C'est l'analogie entre la propagation d'une onde électromagnétique dans ces milieux et la propagation des électrons dans un cristal photonique qui a mené à l'appellation de ces bandes de fréquences «Bandes interdites Photoniques». La réalisation d'une périodicité sur toutes les directions de l'espace permet de réfléchir une onde lumineuse quelque soit son angle d'incidence ou sa polarisation [5]

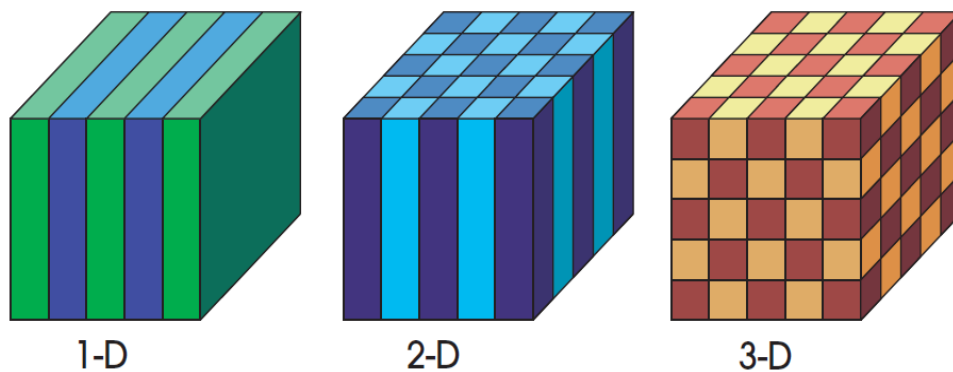


Figure I-1 :Représentation schématique de cristaux photoniques unidimensionnels (1D), Bidimensionnels (2D) et tridimensionnels (3D).

I .2.3. Les cristaux photoniques naturels

Les cristaux photoniques existent également à l'état naturel à l'intérieur de complexes minéraux tels que les opales, et à l'intérieur de systèmes biologiques tels que les yeux de certains céphalopodes sous forme de réseaux périodiques de bâtonnets, les plumes de paon faites de cristaux de kératines ou encore les ailes de certains papillons et insectes. En effet, la nature présente des structures périodiques auto-organisées qui ne possèdent pas un contraste d'indices suffisant: c'est le cas de l'opale minérale naturelle. L'opale est une roche constituée de microbilles de silice réparties selon un arrangement plus ou moins

régulier. De fait, c'est un cristal photonique naturel, même si celui-ci n'a pas de bande interdite complète.[6]

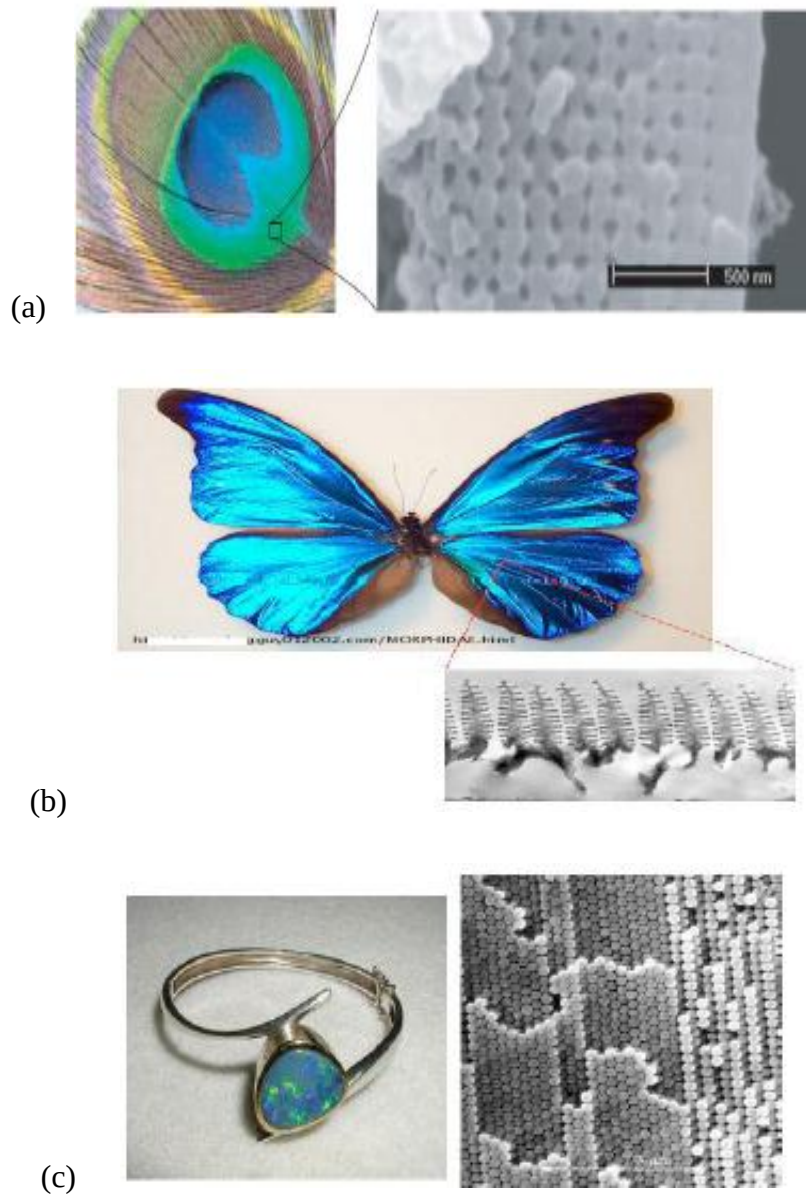


Figure I-2 : Cristaux photoniques naturels : (a) Plume de paon. L'encadré de droite est une image prise au microscope électronique à balayage (MEB) de la coupe d'une barbule verte. La structure de cristal photonique 2D est composée de piliers de mélanine liés par de la kératine ainsi que de trous d'air, (b) Papillon Morpheus (c) Bracelet monté d'une opale naturelle quasi-périodique de silice [7]

I.2.4. Analogie électron- photon :

Les notions de « gap de photon » ou de « bandes interdites photoniques » sont issues de l'analogie entre électrons et photons ou, plus exactement, de celle entre fonction d'onde électronique et champ électromagnétique.

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

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

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

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

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

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

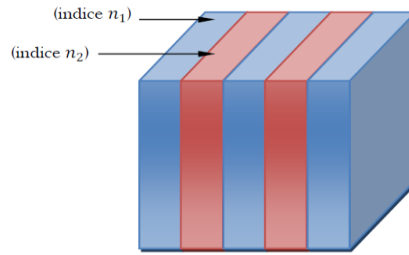
$$\nabla \times \left(\frac{1}{\varepsilon(r)} \nabla \times H(r) \right) = \frac{\omega^2}{c^2} H(r) \quad \text{I-5}$$

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.[6]

I.4. Les types des cristaux photoniques

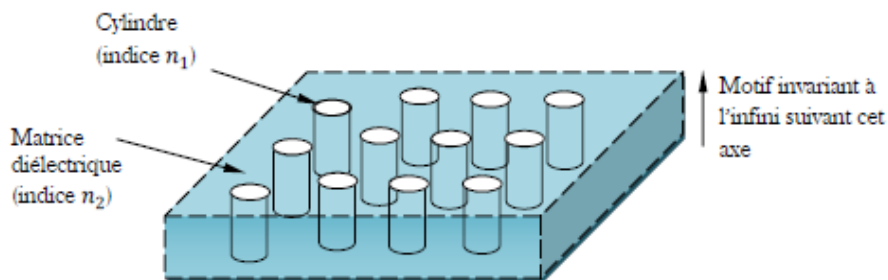
I.4.1. Les cristaux photoniques unidimensionnels

Ces structures sont couramment utilisées sous le nom de réseau de Bragg [21]. Elles sont généralement réalisées par un empilement de couches d'indice de réfraction différent et d'épaisseur optique $\lambda/4$, λ étant la longueur d'onde guidée autour de laquelle le matériau doit interdire la propagation des ondes électromagnétiques sous une incidence normale. Les réseaux de Bragg ont prouvé leur utilité dans de nombreuses applications : convertisseurs de modes pour fibres optiques, filtres sélectifs de longueur d'onde, multiplexeurs [8].

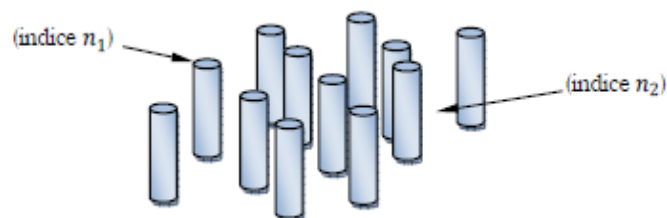
Figure I-3 : *Structure unidimensionnelle.*[8]

I.4.2. Les cristaux photoniques bidimensionnels

Les cristaux photoniques à trois dimensions posent encore de nombreux problèmes de fabrication. Pour cette raison, nous nous sommes intéressés aux cristaux photoniques à deux dimensions qui peuvent être fabriqués facilement. A deux dimensions, les cristaux photoniques sont composés d'un réseau périodique de piliers diélectriques dans l'air (structure déconnectée) ou de trous d'air percés dans une matrice diélectrique (structure connectée)(Figure I. 4).[8]



(a)



(b)

Figure I-4 : *Structures bidimensionnelles : (a) connectée, (b) déconnectée* [7]

I.4.2.1. Différentes familles de cristaux photoniques bidimensionnelles

Les réseaux périodiques à deux dimensions se regroupent principalement suivant trois familles (figure I-5):

- Le réseau carré : Les nœuds du réseau sont situés sur un carré de côté « a » (figure I-5-a)
- Le réseau triangulaire : Chaque nœud du réseau est espacé de son proche voisin d'une même distance « a » (figure 5-b)
- Le réseau hexagonal : si tous les nœuds sont identiques et espacés de « a » il ya deux structures :
La structure graphite (figure I-5-c) et la structure nitrure de Bore.

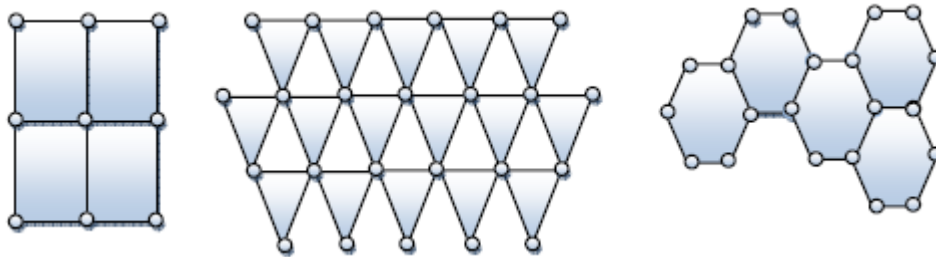


Figure I-5: Différentes familles de cristaux photoniques bidimensionnels : (a) réseau carré (b) réseau triangulaire (c) réseau hexagonal (La structure graphite) [8]

I.4.3. Les cristaux photoniques tridimensionnels

Les cristaux photoniques tridimensionnels (3D) suscitent encore beaucoup d'intérêts. Ce sont des structures tridimensionnelles périodiques suivant les trois directions de l'espace. Il existe un grand nombre de structures possibles. Le premier cristal photonique tridimensionnel a été fabriqué par S. Y. Lin et al [26]. Il était formé de sphères de silicium arrangées selon une structure diamant. En 1993, E. Yablonovitch fabriquait un cristal photonique 3D en perçant chaque trou dans un bloc de plexiglas selon trois angles azimutaux séparés de 120° (Figure I. 11). Ce cristal photonique s'appelle d'après son inventeur "la Yablonovite" [27]. Avec ce cristal photonique, le concept de la bande interdite photonique a été démontré expérimentalement pour la première fois. De

nombreuses méthodes de fabrication des cristaux photoniques tridimensionnels ont été proposées[8].

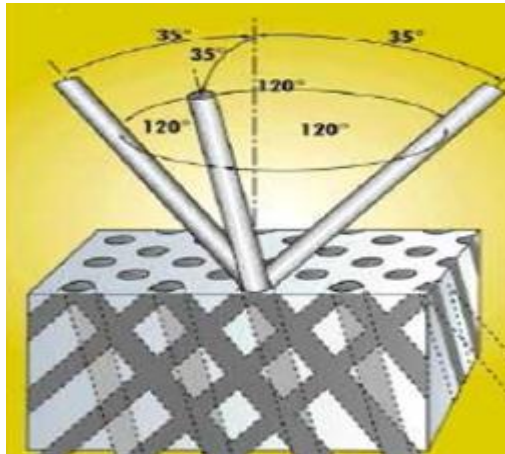


Figure I-6 : Structure « La Yablonovite ».[8]

I.5.Caractéristiques géométriques et physiques d'un cristal photonique

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

I.5.1. Le contraste d'indice Δn

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

$$\Delta n = n_h - n_l$$

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

n_l : L'indice de réfraction du matériau de bas indice.

I.5.2. 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 ε_1 et a_2 l'épaisseur de la couche de permittivité ε_2

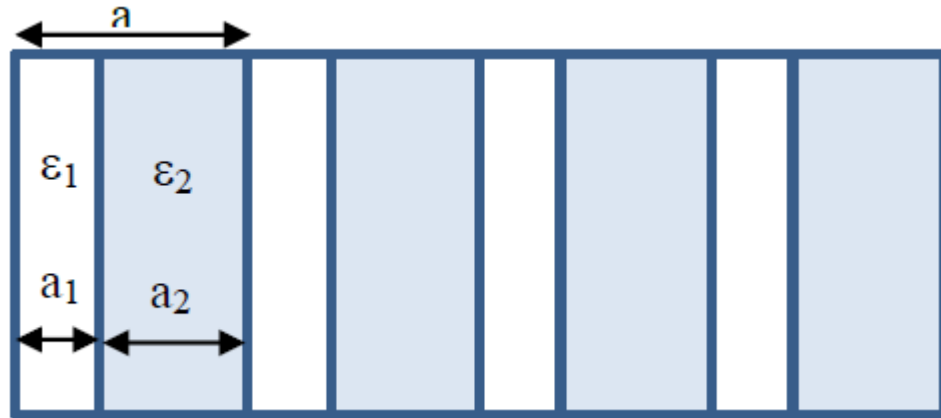


Figure I.7 : *Les périodes d'un cristal photonique unidimensionnel*

I.5.3. 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.

I.6. Les stratégies de défaut dans CP

Comme pour les semi-conducteurs, l'existence d'un défaut dans la périodicité du cristal va entraîner l'apparition de niveaux permis, appelés modes de défauts, dans la bande interdite. La création d'un défaut consiste à briser localement la périodicité du réseau en ajoutant ou enlevant localement un peu de matière diélectrique. Dans le cas d'un réseau de trous, le défaut consiste en l'omission d'un ou de plusieurs trous. On peut aussi créer des défauts en modifiant le rayon des trous. Il existe deux types de défauts :

I.6.1. 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 (Figure I-8)

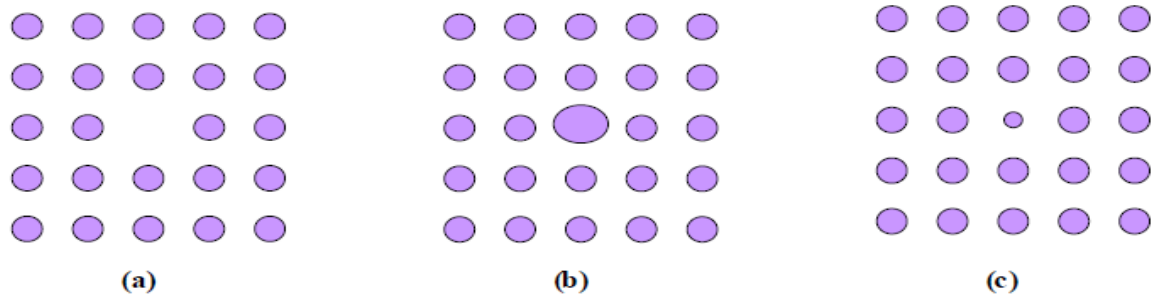


Figure I-8: (a) Défaut lacunaire ; (b) et (c) Défauts de substitutions [1].

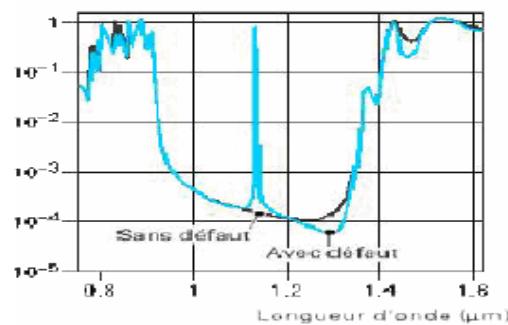


Figure I-9 : Spectre de transmission d'un cristal hexagonal de tiges diélectriques avec ou sans défaut lacunaire [9].

I.6.2. 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 I-10), 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 [10].

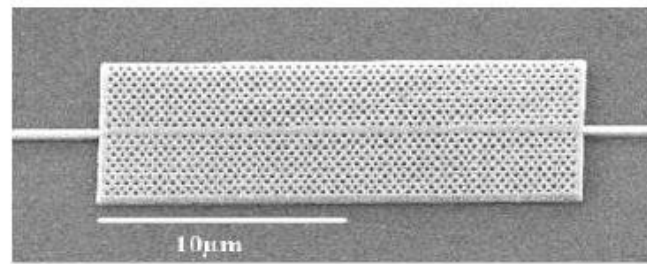


Figure I-10: Exemple de guide W1 à cristal photonique hexagonal de trous d'air sur un substrat de silicium sur isolant [11].

I.7.Cristal photonique 2D - Diagramme de bandes

Un cristal BIP bidimensionnel [10,11] 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 I-11).

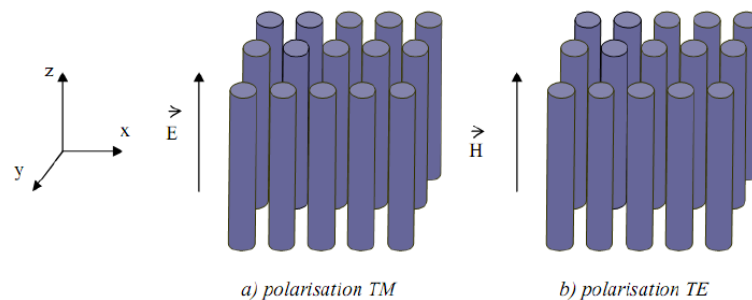


Figure I-11 : Représentation des polarisations TE et TM dans un BIP 2D

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 I-12 l'exemple d'un diagramme de bande d'un cristal photonique 2D en polarisation TE et TM. 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. Les diagrammes de la figure I-8 représentent:

- en abscisse, le parcours fait par le vecteur d'onde lorsqu'il décrit le contour formé par

les points de haute symétrie Γ , M, K de la première zone de Brillouin.

- en ordonnée, les fréquences des modes calculés

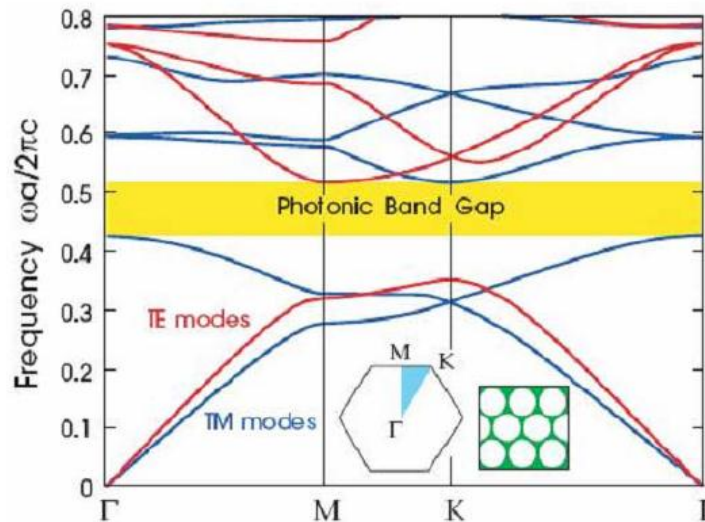


Figure I-12: Diagramme de bande d'un BIP 2D en polarisation TM et TE [12]

I.8. Les applications des cristaux photoniques

Il y a deux types d'utilisations :

- 1) Celles qui utilisent le cristal photonique à des longueurs d'onde dans le gap.
- 2) Celles qui font à propriété plus particulière du diagramme de bandes du cristal.

La majorité des applications qui repose sur la bande interdite photonique sont réalisées en introduisant des défauts dans la structure.

I .8.1.Les applications les plus utilisées

a) .Guides d'ondes

Les guides d'onde sont réalisés en créant un multi défaut (défaut linéaire) qui consiste à

en lever une rangée ou plus dans le cristal photonique. Le processus de guidage dans les guides a cristal photonique est différent de celui des guides classiques a réfraction (guidage par indice) puisqu'ils reposent majoritairement sur l'existence d'une bande interdite omnidirectionnelle dans le plan (guidage par bande).

Les guides coudés (courbés) permettent théoriquement de réaliser des virages avec des rayons de courbure de l'ordre de longueur d'onde sans pertes , mais expérimentalement des problèmes de réflexion et de pertes subsistent à cause du couplage dans le virage vers les modes de fuite dans le cône de lumière.

La figure I-13 donne la structure d'un guide photonique droit et d'un autre coudé

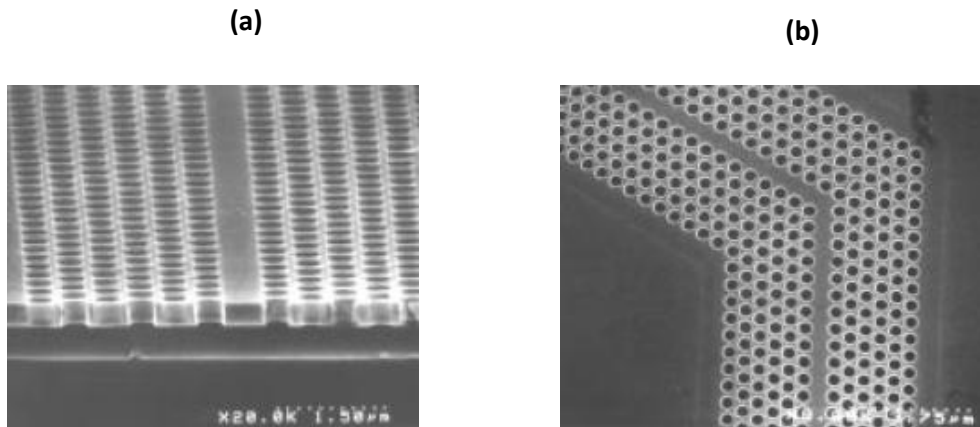


Figure I-13:guides d'onde à cristaux photoniques, (a)droit, (b)coudé.

b). Cavités

Les premières cavités avec des cristaux photoniques bidimensionnels sont réalisées en 1996, ces cavités sont élaborées en incluant des mono défauts sur le réseau cristallin photonique.

Il est montré que ce dispositifs présentent un facteur de qualité élevé pour les modes résonants grâce à l'excellente propriété de réflexion du cristal, tout cela sur des cavités à grande dimension possédants plusieurs modes.

Les cavités sur membrane suspendue (entourée d'air semblent donner les meilleurs résultats) avec des dimensions très petites, sont illustrées dans la figure I-14, une cavité triangulaire et une autre hexagonale plongées dans un cristal photonique triangulaire.

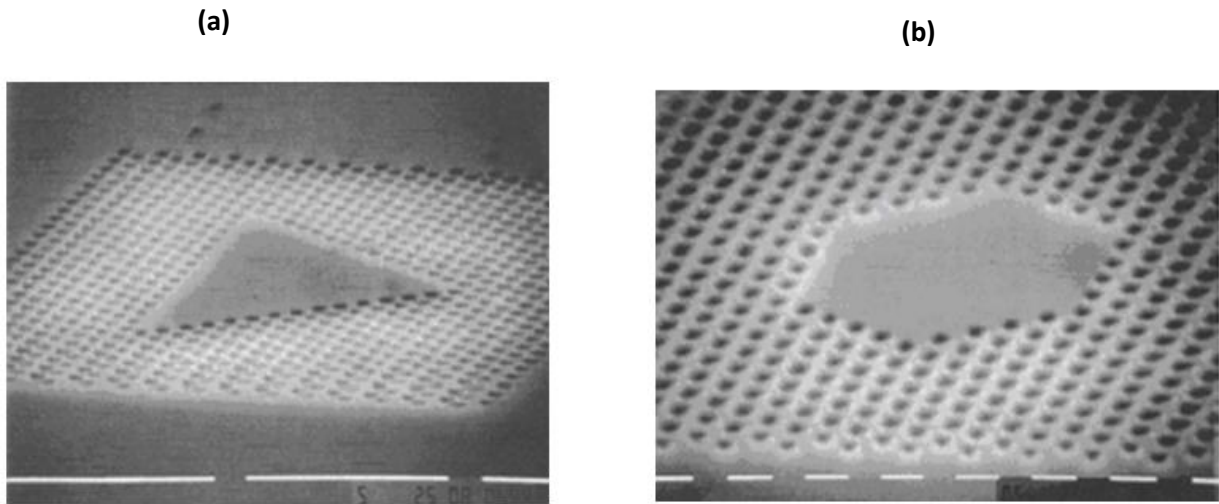


Figure I-14: *cavités sur membrane suspendue [7], (a)cavité triangulaire (b)cavité hexagonale,*

Entourées par un cristal photonique triangulaire.

I .9. Analyse numérique des cristaux photonique

I .9.1.Méthode des ondes planes

Dans les cristaux photoniques, la méthode des ondes planes est la méthode de référence pour le calcul des bandes interdites. Elle est bien adaptée pour des structures périodiques de dimensions infinies pour la détermination des modes propres et du diagramme de dispersion de la structure. La méthode des ondes planes permet de calculer la densité d'états et elle permet aussi de calculer, pour chacun des modes dans la structure, la distribution des champs magnétiques et électriques. En pratique, on définit la structure d'un réseau périodique par une cellule de base et l'on répète cette cellule suivant les directions voulues pour former un cristal photonique parfait exempts de défauts de périodicité qui couvre l'espace entier. Dans le cas du cristal infini avec défauts (ponctuel ou linéaire), le calcul par la méthode des ondes planes est possible en introduisant la périodicité brisée par le défaut lui-même. En effet, on place le défaut au centre d'une cellule de dimension plus grande que celle débrasse comprenant plusieurs rangées du cristal, cette cellule est appelée super cellule. Si on répète cette super cellule dans l'espace suivant les directions du cristal d'origine on se ramène donc à un arrangement périodique de défauts séparés par des régions de cristal photonique parfait (cas des cavités ou guides d'onde).[14]

I .9.2. La méthode FDTD (Finité Différence Time Domain)

Elle a été proposée pour la première fois par Yee en 1966[9]. Cette méthode ne nécessite aucune hypothèse de départ sur la forme possible des solutions ou des ondes se propageant dans la structure, ce qui la rend indépendante de la géométrie du système simulé. Un autre avantage réside dans sa faculté à couvrir un large spectre de fréquences avec une seule simulation en ayant recours à la transformée de Fourier. C'est une méthode numérique populaire et très répandue pour la résolution des problèmes de l'électromagnétisme, pouvant être appliquée aux milieux conducteurs comme elle peut être appliquée aux milieux diélectriques. Cette méthode est particulièrement intéressante pour connaître la réponse spectrale d'un système non nécessairement périodique et pour calculer les distributions de champ dans des structures de dimensions finies [23,24]. L'inconvénient majeur de cette méthode, qui tend cependant à s'estomper avec les évolutions des capacités informatiques, est qu'elle exige des ressources de calculs importantes. Nous nous sommes donc limités à une utilisation purement bidimensionnelle de cette méthode [13].

Conclusion

Les cristaux photoniques sont des structures périodiques de matériaux diélectriques présentant une variation périodique d'indice optique. Cette variation d'indice optique se comporte comme une barrière de potentiel périodique pour les photons. Ainsi, comme dans le cas d'un électron se déplaçant dans le potentiel périodique créé par les atomes, une structure de bande apparaît, avec des bandes spectrales où la propagation est permise et d'autres où elle est interdite. En d'autres termes, on a une structure qui réfléchit la lumière pour certains intervalles de fréquence, et la laisse passer pour d'autres, dans la suite des différents types de cavités CP, présentons théoriquement des guides d'onde, démultiplexeurs.