

II.1 Introduction

La notion de "cristaux photoniques" a été proposée pour la première fois en 1987. Le premier cristal photonique a été réalisé en 1991. Les cristaux photoniques sont des structures dont l'indice de réfraction varie périodiquement dans une, deux ou trois dimensions. Ce milieu périodique produit sur la lumière qui se propage dans le cristal photonique un effet analogue à celui du potentiel périodique sur les électrons dans un cristal.

De même qu'il existe pour des électrons des bandes d'énergie permises et des bandes interdites, il existe des bandes photoniques d'états permises et des bandes photoniques interdites. Une bande photonique correspond à un mode qui se propage dans le cristal photonique. Une bande interdite photonique correspond à un intervalle d'énergie où la propagation de la lumière est interdite dans certaines directions du cristal photonique. Les cristaux photoniques offrent la possibilité de contrôler la propagation de la lumière et ceci, sur la dimension de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde dans le matériau. C'est notamment cette propriété qui les rend intéressants pour de nombreuses applications [7].

II.2 Propriétés optiques des principales structures utilisées pour le piégeage de la lumière incidente

Dans cette section, nous allons introduire les caractéristiques optiques des principales structures exploitées pour le piégeage de la lumière dans des couches de faible épaisseur. L'intérêt de ces structures réside dans la possibilité d'augmenter fortement l'absorption sur certains intervalles de longueurs d'onde, en particulier près du gap des matériaux absorbants. Comme nous le vérifierons dans l'état de l'art, elles ne peuvent bénéficier des approches d'optiques géométriques « classiques », comme des structurations anti-reflet pyramidales, mais doivent utiliser des approches d'optique ondulatoire. Le concept le plus simple est celui du réseau de diffraction ; des concepts plus élaborés sont les cristaux photoniques et les plasmons de surface. Ils sont représentés schématiquement sur la Figure II.1

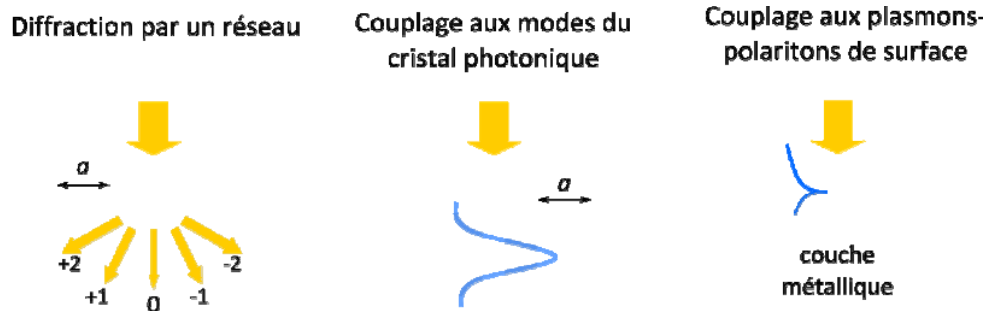


Figure II.1 : Principales structures étudiées pour le piégeage de la lumière. Les deux premiers ordres sont représentés pour le réseau de diffraction. La période du réseau de diffraction et du CP est notée « a » [6].

Dans un premier temps, nous chercherons à décrire ces effets séparément à l'aide de diagrammes de dispersion types, rassemblant l'essentiel de leurs propriétés physiques. Ils permettent en effet de visualiser la relation existant entre la pulsation (ω) et la norme de la composante parallèle du vecteur d'onde (notée $k_{\parallel}$). Nous les utiliserons pour comprendre les propriétés de couplage de ces différentes structures, dans le but d'augmenter l'absorption de la lumière incidente.

II.2.1 Diffraction de la lumière par un réseau

Le diagramme de dispersion d'un réseau de diffraction est représenté sur la Figure II-2 pour les deux premiers ordres de diffraction. On remarque sur cette figure la présence de plusieurs « lignes de lumière » (lignes en pointillés) définissant des « cônes de lumière » (zones en gris). Ces cônes se répètent périodiquement tout les $2\pi/a$ (a étant la période du réseau), ce qui correspond aux différents ordres de diffraction. Les ondes possédant un $k_{\parallel}$ situé dans le cône de lumière peuvent interagir avec les modes du réseau. Ainsi, pour une incidence q_0 de la lumière (cf. ligne noire sur Figure II-2), l'ordre 0 se propage quelle que soit la fréquence considérée car $k_{\parallel}$ est toujours compris dans le cône de lumière centré en 0. Les ordres plus élevés (s'ils existent) apparaissent pour des fréquences croissantes : ω_1 pour l'ordre 1 et ω_2 pour l'ordre 2.

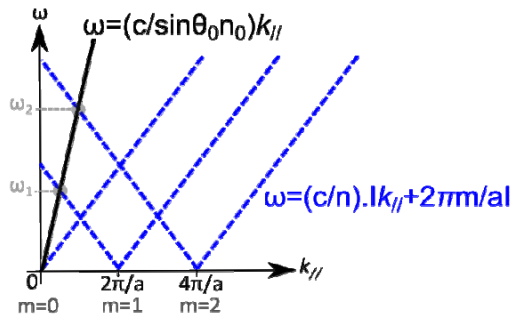


Figure II.2 : Diagramme de dispersion schématisé d'un réseau de diffraction représenté pour les ordres de diffraction $m=0,1$ et 2 et $k_{//} > 0$. L'angle d'incidence de la lumière noté q_0 est considéré ici non nul [6].

Pour une application de piégeage de la lumière, l'objectif est alors de favoriser le couplage des ondes incidentes avec les ordres diffractés transmis ($m > 0$) afin d'allonger leur chemin optique dans la couche de matériau actif située sous le réseau de diffraction. En diminuant l'épaisseur de cette couche jusqu'à ce qu'elle soit de l'ordre de la longueur d'onde, on quantifie les états optiques dans le matériau actif.

On se rapproche alors davantage d'une configuration de type cristal photonique membranaire. Ce changement progressif de configuration s'accompagne d'une modification du diagramme de dispersion et des effets physiques exploités pour le piégeage de la lumière [6].

II.2.2 Couplage de la lumière avec les modes d'un cristal photonique

Avant de s'intéresser au diagramme de bande d'un cristal photonique, il convient de définir au préalable ce terme. Il s'agit en général de milieux diélectriques structurés dont la permittivité est modulée périodiquement selon une, deux ou trois directions. En pratique, la plupart des structures à CP sont réalisées au sein d'une couche mince d'indice de réfraction élevée et ayant une épaisseur de l'ordre de la longueur d'onde. Il est donc préférable d'employer le terme de « cristal photonique membranaire », qui correspond à un CP intégré au sein d'un guide d'onde plan, ce qui permet un confinement réfractif de la lumière dans l'épaisseur de la couche. Le contrôle latéral de la lumière est assuré par un effet diffractif dans une ou deux directions de l'espace, selon le type de structuration considéré (voir Figure II.3).

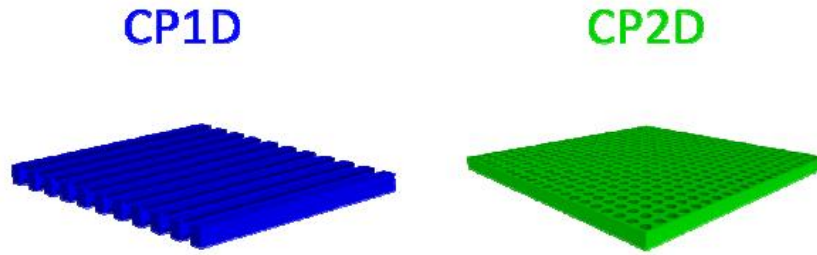


Figure II.3 : Schémas de cristaux photoniques 1D et 2D membranaires [6].

On distingue quatre genres de cristaux photoniques, les plus parfaits sont les cristaux photoniques naturels trouvés généralement dans l'opale qui est une roche minérale constitué de microbilles de silice répartie selon un arrangement plus au moins régulier (figure II.4 (a)).

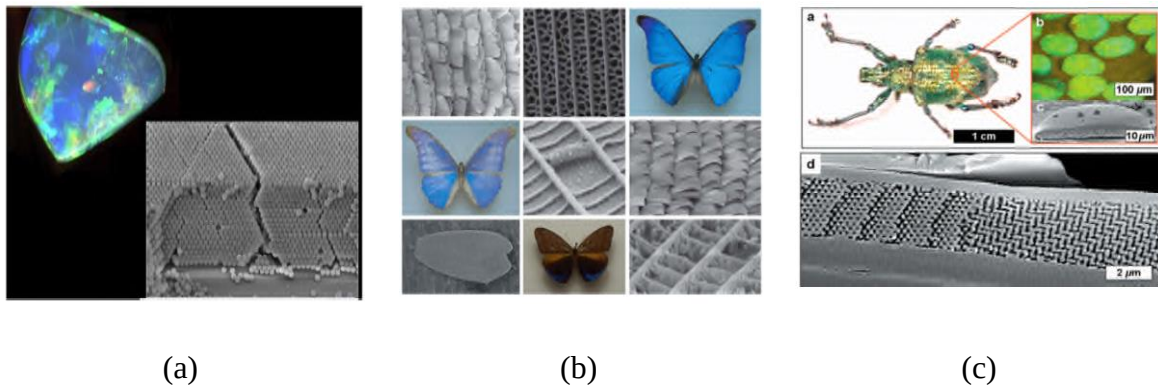


Figure II.4: une vue microscopique d'une structure de cristal photonique naturel : (a) opale, (b) papillons, (c) cétoine [6].

D'autre part l'homme s'est inspiré de la nature pour créer des cristaux photoniques qui obéissent à nos besoins. Que ce soit dans les minéraux ou chez les vivants, les cristaux photoniques qui les constituent absorbent toute les couleurs et reflète la couleur qui apparait (figure II.5).

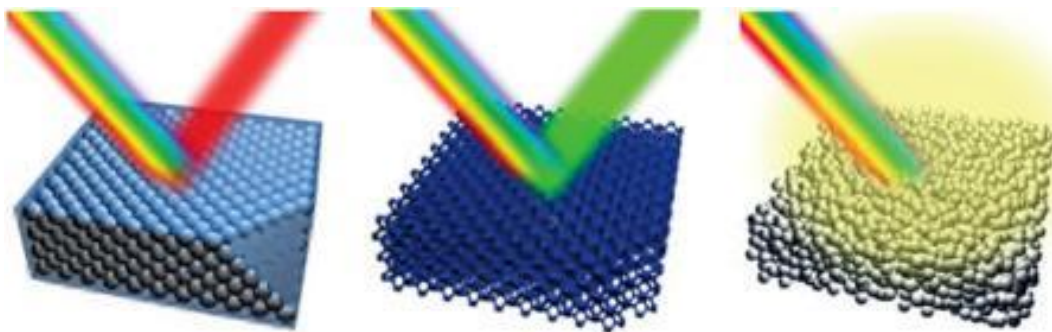


Figure II.5 : principe de réflexion de la lumière dans un cristal photonique naturel [6].

II.3 Définition des cristaux Photoniques

La première structure périodique à connaître est le matériau à bande interdite photonique (B.I.P.) que l'on appelle plutôt en hyperfréquences « matériau à bande interdite électromagnétique ». D'une manière générale, on les nomme familièrement «cristaux photoniques » car sa structure se rapproche de la structure cristalline et qu'ils agissent sur les photons. L'intérêt des chercheurs pour le thème des cristaux photoniques est important, surtout depuis la fin des années 90, car ces matériaux périodiques artificiels ont été promis à révolutionner le domaine des télécommunications. En effet, depuis des années, la recherche scientifique pense pouvoir contrôler la propagation de la lumière grâce à ces matériaux afin de remplacer la communication classique à courant électrique. Ceci entraînerait un gain énorme en termes de rapidité de la communication.

II.4 Propriétés de base des cristaux photoniques

II.4.1 Le cristal photonique unidimensionnel (1D)

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 1 montre qu'ils consistent en un empilement de deux couches alternées de matériaux homogènes ayant des constantes diélectriques ϵ différentes. Ces structures existent depuis longtemps et sont utilisées en optique pour obtenir des miroirs sans pertes (miroirs de Bragg) ou des filtres [8].

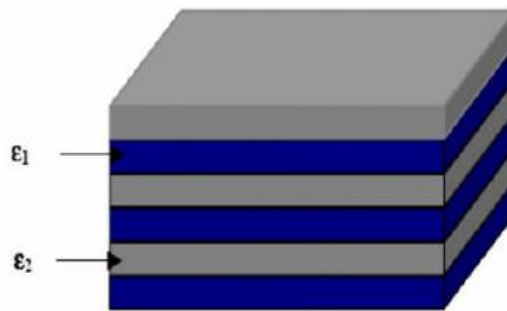


Figure II.6 : *schéma d'un miroir de Bragg constitué d'un milieu diélectrique périodique fini [8].*

II.4.2 Le cristal photonique bidimensionnel (2D)

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. Les propriétés optiques des structures bidimensionnelles (ainsi que les

structures unidimensionnelles en incidence non normale) 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 (différence entre les indices du milieu et des tiges) suffisamment grand [9]. Un BIP bidimensionnel peut aussi être constitué d'un ensemble de trous percés dans un diélectrique. Les réponses optiques de ces structures dépendent de la polarisation et peuvent ne pas posséder une bande interdite complète. On parle d'une bande interdite complète lorsque la structure interdit la propagation pour toutes les directions dans le plan de la périodicité, quelle que soit la polarisation.

II.4.3 Le cristal photonique tridimensionnel (3D)

La structure des cristaux photoniques 3D permet d'avoir une bande interdite omnidirectionnelle, le premier cristal photonique a été conçu à base de sphères de silicium arrangées sur une structure diamant. Il existe un grand nombre de structure possible, Auguste Bravais a établis un classement de différents familles de CP, il à montré qu'ils peuvent se répartir en sept types de maille (7ième cristallins) et 14 types de réseaux (réseaux de Bravais). La figure II.7 montre quelques types de structure de CP artificiel 3D



Figure II.7 : quelque type de CP 3D artificiel : (1) cubique, (2) tas de bois, (3) structure multi couches, (4) opales ou opales inversées et (5) Yablonivite [10].

➤ Structure Tas de bois

La structure tas de bois est obtenue en superposant des rubans de silicium polycristallin successivement par couches ; la silice sera enlevé à la fin pour obtenir un CP 3D Si/air dont le contraste est suffisant pour obtenir une bande interdite dans toute direction de l'espace (figure II.7 (2)) [10] .

➤ Structure de l'opale

L'opale est obtenue chimiquement par auto-organisation. La première opale a été obtenue par sédimentation de sphères de silice en solution: par sédimentation ces sphères s'arrangent selon un réseau cubique à faces centrées. Le nombre important de défauts dans les premières opales a été fortement réduit grâce à des techniques de croissance auto-organisées proposées par Y.A. Vlasov (Figure II.7). La plupart de ces cristaux colloïdaux ne présentent pas de bandes d'énergies interdites, à cause du faible contraste d'indice.

Cependant, ces structures servent d'empreinte pour la réalisation d'opales inverses à partir de l'infiltration d'un matériau de haut indice. Les sphères initiales sont ensuite dissoutes pour aboutir à la structure finale de sphères d'air dans une matrice de haut indice [10].

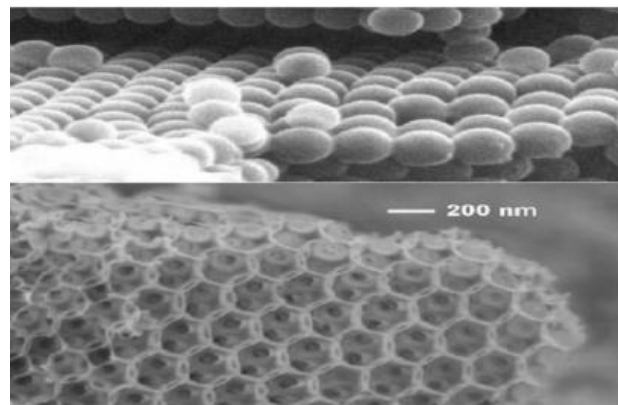


Figure II.8 : *La structure de l'opale : en haut les opales directe, en bas les opales inverse [10].*

II.5 Le cristal photonique 2D

Un cristal photonique 2D appelé aussi le réseau de trous est une structure présentant une périodicité de l'indice dans deux directions de l'espace définissant ainsi un plan de périodicité. De la même façon que pour le CP 1D, les ondes incidentes dont la fréquence est située dans la bande interdite sont réfléchies tandis que les autres sont transmises. Nous distinguons deux types de structures CP 2D : la première appelée structure déconnectée formée d'un réseau de piliers de diélectriques dans l'air (figure II.9 (b)) tandis que l'autre structure est appelée connectée, composée de trous d'air percés dans une matrice diélectrique (figure II.9 (a))

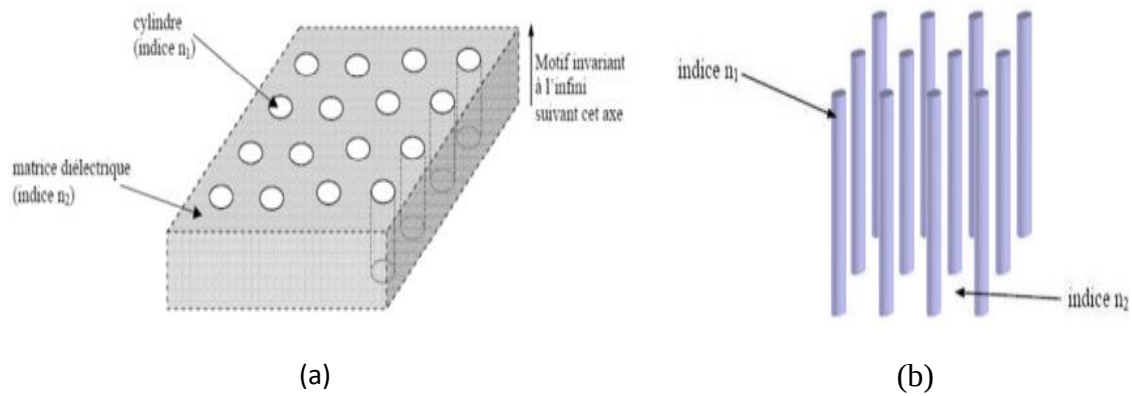


Figure II.9 : structure d'un CP 2D : (a) connectée, (b) déconnectée [10].

II.5.1 Cristal photonique bidimensionnel planaire

Afin de remédier à l'absence de bande interdite verticale, les CPs 2D peuvent être insérés entre des couches de matériaux ayant des indices de réfraction plus faibles. On obtient ainsi un accroissement de confinement dans la direction non périodique par un effet de réflexion totale interne (figure II.10).

Ces structures hybrides sont appelées cristaux photoniques planaires qui sont généralement utilisées pour des applications de l'optique intégré.

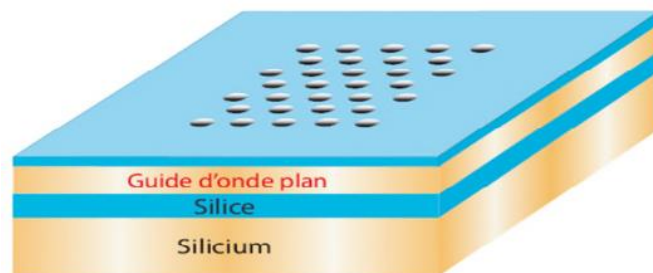


Figure II.10: représentation schématique d'un CP 2D planaire fabriqué dans un guide plan de silicium entre deux couches de silice le tout sur un substrat de silicium [10].

Par ailleurs selon le contraste d'indice, on arrive à distinguer deux types de cristaux photoniques planaires : substrat et membrane.

II.5.1.1 Fort contraste d'indice

Celle-ci assure un bon confinement vertical de la lumière et limite les pertes de propagation tandis qu'elle requière une épaisseur de l'ordre nanométrique afin qu'elle soit monomode. L'approche membrane est obtenue en suspendant une membrane semi-conductrice (figure II.11(a)).

Les matériaux utilisés sont généralement du silicium déposé sur du SiO_2 ou une couche de gallium déposé sur du Al_xO_y , de plus la profondeur nécessaire des trous est beaucoup plus inférieure quand dans les systèmes à faible indice (quelque centaine de nanomètre au lieu de μm) (figure I.9 (b)). Par ailleurs, ces structures sont fragiles (facilement cassable) et souffre d'une mauvaise évacuation thermique comme dans le cas d'un laser.

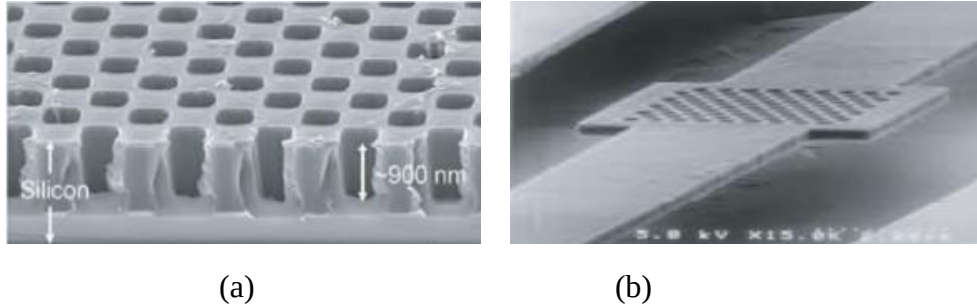


Figure II.11 : *structure d'un CP 2D planaire : (a) image en coupe d'un cristal sur SOI, (b) structure d'un CP 2D membrane suspendue sur de AlGaAs [11].*

II.5.1.2 Faible contraste d'indice

Dans le cas d'un contraste à faible indice ou appelé aussi approche substrat la différence d'indice est plus faible et par conséquent on obtient un faible confinement de la lumière verticalement, les pertes alors deviennent importantes. Les trous percés dans celle-ci sont profond (figure II.12 (a)).

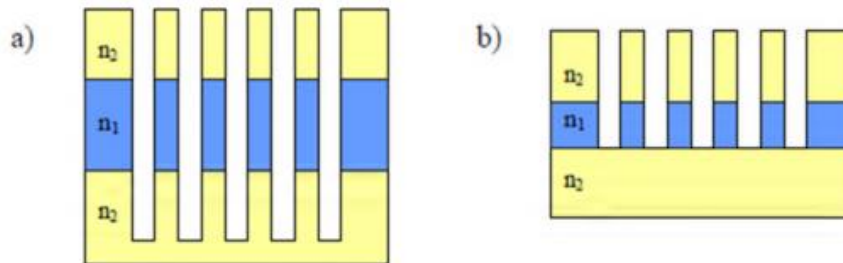


Figure II.12: *(a) structure substrat (b) structure membrane [12].*

II.5.2 Les différentes familles de CP 2D

Il existe plusieurs façons de réaliser des structures bidimensionnelles selon la répartition des trous qui les forment, divisée en trois familles, celle en réseau carré, triangulaire et hexagonale (figure II.13)

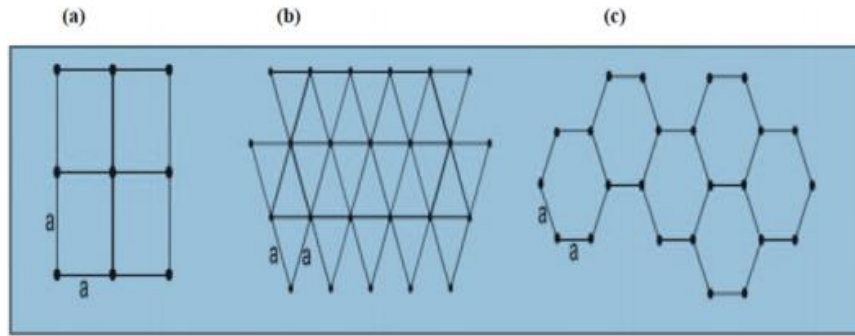


Figure II.13 : les différentes structures d'un CP 2D : (a) carré, (b) triangulaire, (c) hexagonale [12].

II.5.2.1 Le réseau carré

La répartition des trous dans le réseau carré forme un carré avec des nœuds distancés de « a » (figure II.13). Par ailleurs, il est difficile d'obtenir une bande interdite totale (une bande interdite qui empêche la propagation quelle que soit la polarisation) à cause de sa sensibilité à l'angle d'incidence et la polarisation électromagnétique. Les propriétés géométriques élémentaires pour ce réseau est défini dans le tableau suivant :

Vecteur directe (a_1, a_2)	$a_1=(1,0) \ a_2=(0,1)$
Vecteur réciproque (b_1, b_2)	$b_1 = \frac{2\pi}{a} (1,0) \ b_2 = \frac{2\pi}{a} (0,1)$
Facteur de remplissage f	$f= \pi \frac{r^2}{a^2}$

Tableau II.1 : Caractéristiques géométriques d'un réseau carré [13].

Les réseaux direct et réciproque ainsi que la zone de Brillouin sont montrés sur la figure II. 14.

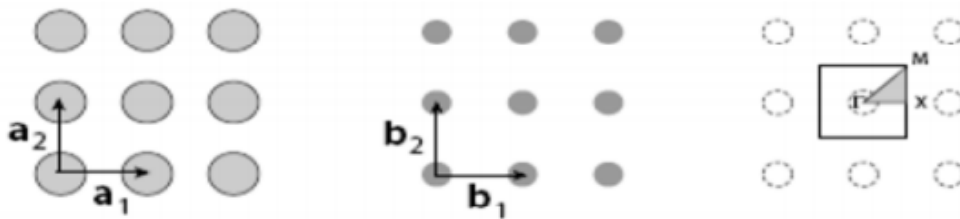


Figure II.14 : système réseau réciproque et réseau direct, zone de Brillouin pour le réseau carré [13].

II.5.2.2 Le réseau triangulaire

Cette structure comme son nom l'indique est un réseau où les mailles sont en forme de triangles symétriques équilatéraux distancés de $\langle a \rangle$. Contrairement au réseau carré le

réseau triangulaire est moins sensible à l'angle d'incidence, tandis que c'est difficile d'obtenir une bande interdite totale. Un ensemble de réseau triangulaire peut mener à un réseau Hexagonal (figure II.16). Les propriétés géométriques élémentaires pour ce réseau sont définies dans le tableau suivant :

Vecteur directe (a_1, a_2)	$a_1 = (1, 0)$ $a_2 = (1/2, \sqrt{3}/2)$
Vecteur réciproque (b_1, b_2)	$b_1 = \frac{2\pi}{a} (1, -1/\sqrt{3})$ $b_2 = \frac{2\pi}{a} (0, 2/\sqrt{3})$
Facteur de remplissage f	$F = \pi = \frac{r^2}{a^2} \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right)$

Tableau II.2 : Caractéristiques géométriques d'un réseau triangulaire [13].

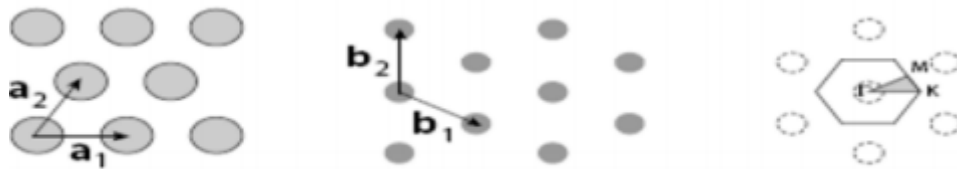


Figure II.15 : (a) réseau direct, réseau réciproque, zone de Brillouin d'un réseau Triangulaire [14].

II.5.2.3 Le réseau hexagonal

Sur un réseau hexagonal, si tous les nœuds sont identiques et espacés de « a », alors on appelle cette structure « graphite » car elle est similaire à la structure cristalline du graphite. À la différence du réseau triangulaire, il s'agit d'un réseau à deux « atomes » par maille. Le réseau réciproque est aussi un réseau hexagonal et la zone de Brillouin irréductible est la même que pour le réseau triangulaire avec les directions principales notées $K\Gamma$ et $M\Gamma$. La possibilité d'une bande interdite complète avait été prédite pour la première fois dans le cas d'un réseau de tiges diélectriques cylindriques.

II.5.2.4 La structure nitrure de Bore

Cette structure permet d'avoir une large bande interdite, elle a la même structure que celle du réseau hexagonal seulement l'un des nœuds diffère de nature cristalline de nitrure de bore.

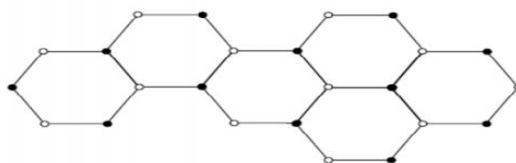


Figure II.16 : structure de nitrure de bore [15].

II.5.3 Domaines d'application des cristaux photoniques 2D

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

II.5.3.1 Fréquence optique**a) Les micro-résonateurs**

Les guides d'ondes comme les micro-résonateurs sont obtenus en incluent des défauts ponctuelles linéairement répartie dans la structure à cristaux photoniques qu'on appelle a défaut ponctuel linéaire ou avec virage qu'on appelle guide coudé. Les premières études sur les micros 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 pourvoir 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 [17].

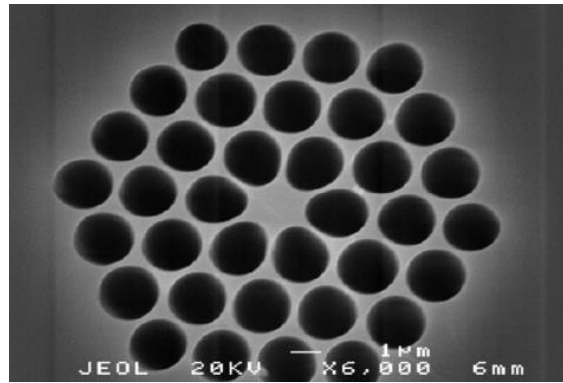


Figure II.17 : section d'une fibre microstructure (MOF) [13].

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.5.3.2 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 [13].

II.5.3.3 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 [6]. 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.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les notions de bases associées aux cristaux photoniques. Ces matériaux, dont la constante diélectrique varie périodiquement à l'échelle de la longueur d'onde, sur une ou plusieurs directions de l'espace.

On s'est intéressé à une famille des cristaux photoniques : les cristaux photoniques à un et deux dimensions, on débutant par l'étude de la propagation de la lumière dans ces cristaux suivant les deux polarisations.