

II.1.Introduction

Après avoir montré les fonctions optiques basées sur cristaux photoniques, il est nécessaire d'envisager le couplage entre eux. Habituellement, le guidage dans les cristaux photoniques s'effectue en créant des défauts linéaires dans la périodicité du réseau, générant ainsi des guides à cristaux photoniques. Ici, nous allons étudier une autre possibilité de guidage: les guides à cavités couplées (CC), appelés aussi guides CROW (Couple-Résonateur Optical Waveguide).

Dans ce chapitre, nous avons présenté les cavités et les guide à cristal photonique. Ensuite nous nous intéresserons au couplage entre eux (couplage guide cavité).

II.2. Les cavités en cristaux photoniques

Considérons un cristal photonique bidimensionnel ; il est en général constitué d'un réseau de trous percés dans un matériau diélectrique, ou de colonnes de diélectrique dans l'air. Dans un cas comme dans l'autre, considérons un défaut localisé : un emplacement où le trou n'est pas percé, ou bien où il n'y a pas de colonne. Plus généralement, on peut faire varier le rayon de la colonne ou du trou en question pour faire varier continûment la perturbation qu'on introduit.

Si on injecte dans ce défaut un mode électromagnétique dont l'énergie est dans la bande interdite du cristal photonique où situé autour, il se retrouve complètement confiné, vu qu'il est entouré d'un matériau réfléchissant à cette longueur d'onde.

II.2.1.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. De nombreux types de cavités électromagnétiques ont ainsi été imaginés et utilisés dans diverses applications, allant du laser au four micro-onde.[15]

Dans ce cas, l'objectif visé est le confinement de la lumière dans une cavité. Le défaut (en général un ou plusieurs trous non gravés) est un défaut ponctuel entièrement entouré par un cristal photonique. Pour des fréquences comprises dans la bande interdite, un cristal photonique se comportant comme un miroir quasi-parfait, il apparait que ce type de

structure devrait permettre la réalisation de cavités possédant un grand facteur de qualité (c'est-à-dire un temps de séjour des photons dans la cavité long).

Un cliché de microscopie électronique d'une microcavité réalisée dans un cristal photonique 2D est présenté sur la (figure II-1) Un seul trou a été omis au centre du cristal photonique. Cette absence de trou forme une cavité où le confinement est réalisé par le cristal photonique dans le plan de la membrane et par guidage réfractif dans la direction perpendiculaire à la membrane. On parle alors de cavité " H_1 " (H car la cavité est hexagonale, et 1 parce qu'un seul trou est manquant). [15]

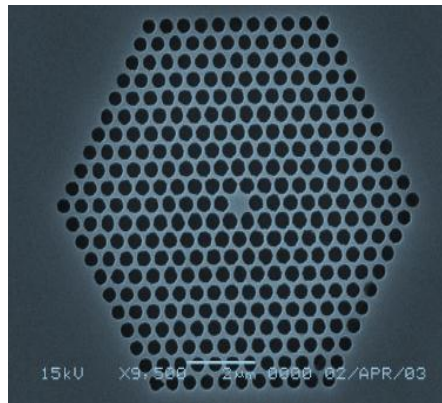


Figure II-1 : Exemple de cavité H_1 [15]

II.2.2. Les différents types de cavités

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

II.2.3. 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 -2). 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 [16].

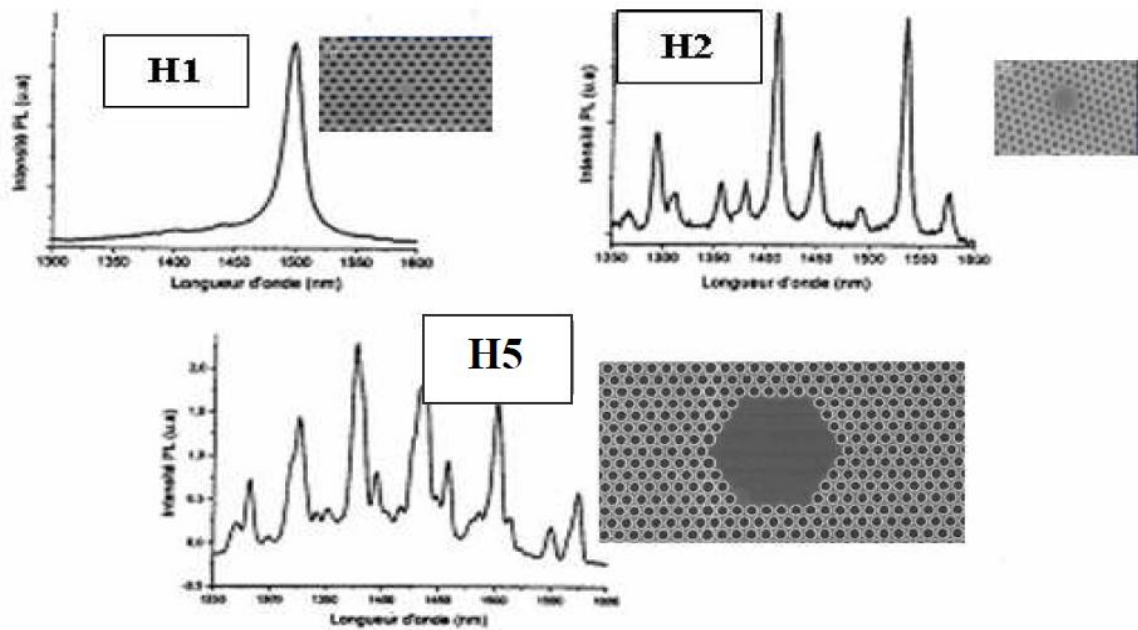


Figure II-2 : Signatures spectrales de cavités hexagonales obtenues par photoluminescence[17].

II.2.4. Cavité carré

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

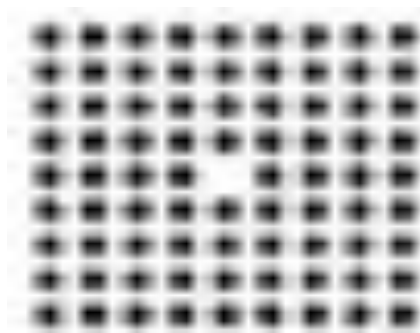


Figure II -3 :Exemple de cavité carrée dans un cristal photonique carré avec un paramètre de maille 600nm [18].

II.2.5.Cavité triangulaire

La Figure II-1 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 ($\epsilon=8.12$).

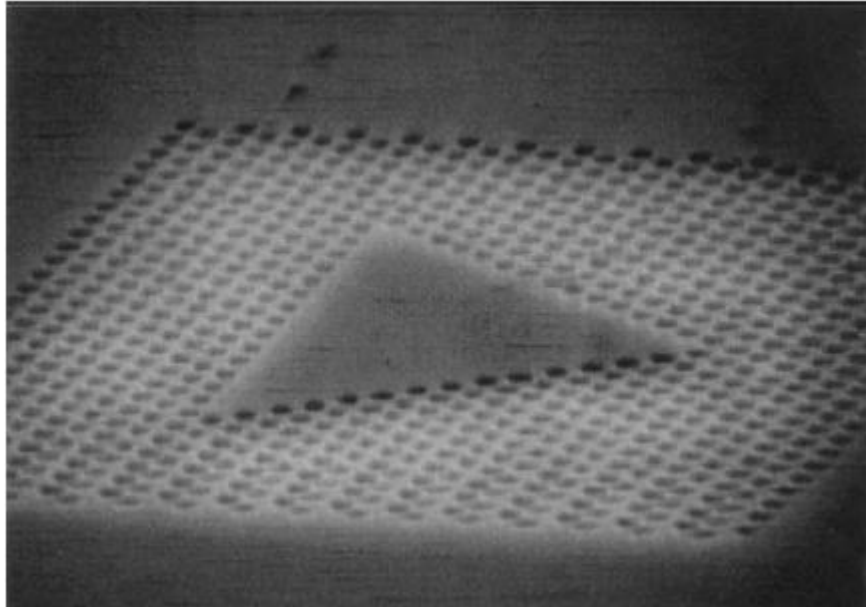


Figure II-4:*Exemple de cavité triangulaire dans un cristal photonique triangulaire avec un paramètre de maille 600nm. [19]*

II.2.6. Cavité rectangulaire

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

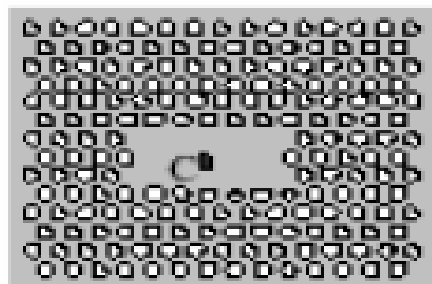


Figure II-5:*Exemple de cavité rectangulaire dans un cristal photonique triangulaire avec un paramètre de maille 560nm [20].*

II.3.Guides d'ondes dans les cristaux photoniques

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 [21].

Il est important de souligner que le mécanisme de guidage est complètement différent de celui existant dans les guides d'ondes classiques, puisque ce n'est pas la réflexion totale due à la différence d'indice de réfraction qui assure le guidage, mais l'existence d'une bande interdite photonique.

II.3.1. Guide à cristal photonique

En introduisant un défaut linéaire (omission d'une ou de plusieurs rangées de trous) dans un cristal photonique, il est possible de constituer des guides optiques au sein de ce cristal. Un photon restera confiné dans le guide si son énergie est située à l'intérieur de la bande interdite.

On appelle nW les guides d'ondes, où n est le nombre de rangées de trous manquantes : Un guide $1W$ correspond à un cristal photonique ayant une rangée manquante. Dans ces guides à cristaux photoniques, le processus de guidage de la lumière est différent de celui des guides d'onde classiques, où le guidage est assuré par réflexion totale interne, il est déterminé par la propagation des modes de Bloch (San04). Dans ce cas, les modes sont guidés par le phénomène de bande interdite. Les réflexions multiples sur les motifs du cristal localisent la lumière au niveau de la zone de défaut. Le mécanisme de guidage dans ce type de guide n'est pas toujours assuré par la présence de la BIP, il peut être affecté par la réflexion totale interne, et cela, selon la nature de la structure du matériau à bande interdite photonique utilisée. Dans la structure de trous (où le guide est formé par une rangée de trous manquante), l'indice de réfraction du cœur du guide à cristal photonique est plus élevé que celui du matériau constituant la gaine photonique. Dans ce cas, le guidage met en jeu des réflexions multiples sur le cristal photonique, mais, les propriétés modales des modes de Bloch seront affectées par la réflexion totale interne. Le guidage s'effectuera donc par effet BIP et par réflexion totale interne (figure II.6), le guide est alors multicorde aux longueurs d'onde correspondant aux bandes interdites de la gaine photonique, car il existe au moins deux modes dus à chacun des deux types de propagation. Il en résulte un bon couplage entre le guide diélectrique et le guide à CP, puisque les mécanismes de guidage des deux types de guides se ressemblent. D'autre part, le guide à

cristal photonique dans la structure à tiges (où le guide est formé par une rangée de tiges manquante) a un cœur d'indice de réfraction plus faible que celui des gaines. Dans ce cas, le mécanisme de guidage ne peut pas être de nature réfractive. La lumière est guidée dans le cœur, car elle ne peut pas se propager dans les gaines qui présentent une bande interdite photonique. Le guidage s'effectuera donc par réflexions multiples sur le matériau à bande interdite photonique (Lou03, Lou04), le guidage par effet BIP est le seul type de guidage opérant dans cette structure, le guide peut être donc monomode. Le couplage sera pauvre puisque les mécanismes de guidage des deux types de guides sont très différents, même si les deux guides ont la même largeur.

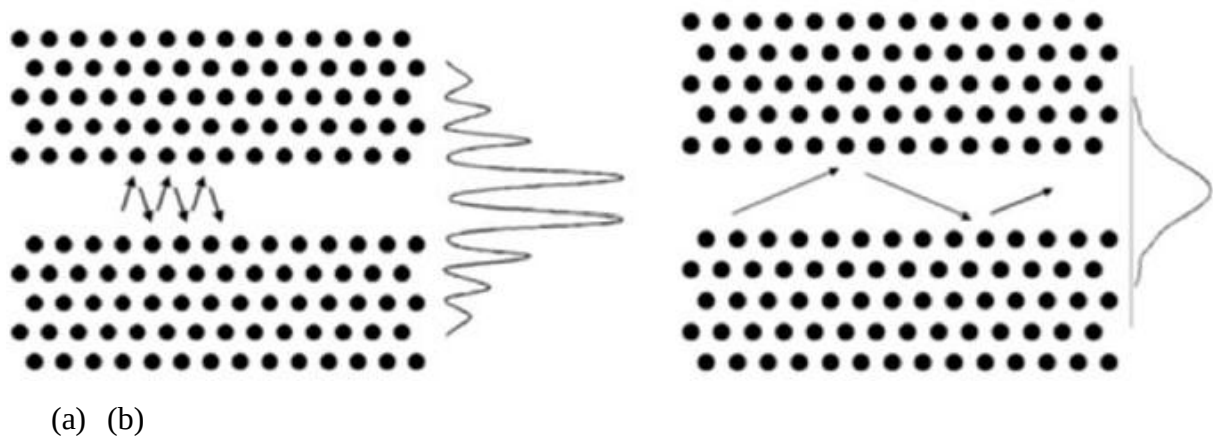


Figure II.6 : Guide créée dans un cristal photonique bidimensionnel de réseau triangulaire en omettant quelques lignes de trous. (a) Propagation et schémas du profil de l'intensité dans le cas où le guidage se fait par BIP, (b) Propagation et schémas du profil de l'intensité dans le cas où le guidage est réfractif.[22]

II.3.2. Les cristaux photoniques 2D en géométrie guide d'onde

Un guide est un défaut linéique introduit au sein d'un cristal photonique. Il peut alors être créé en écartant deux demi-plans de cristaux photoniques (Figure II .7 (a)). L'écart entre les deux demi-plans, la direction cristallographique ainsi que la symétrie des bords permettant de définir un guide à cristal photonique. Si l'on se restreint à une périodicité dans deux directions de l'espace, le cristal photonique 2D est constitué soit de colonnes de diélectrique entourées d'air, soit de trous d'air gravés au travers d'une matrice diélectrique (Figure II. 7 (a)et (b)). La nomenclature présentée dans le paragraphe suivant a été adoptée afin de les désigner sans ambiguïté.

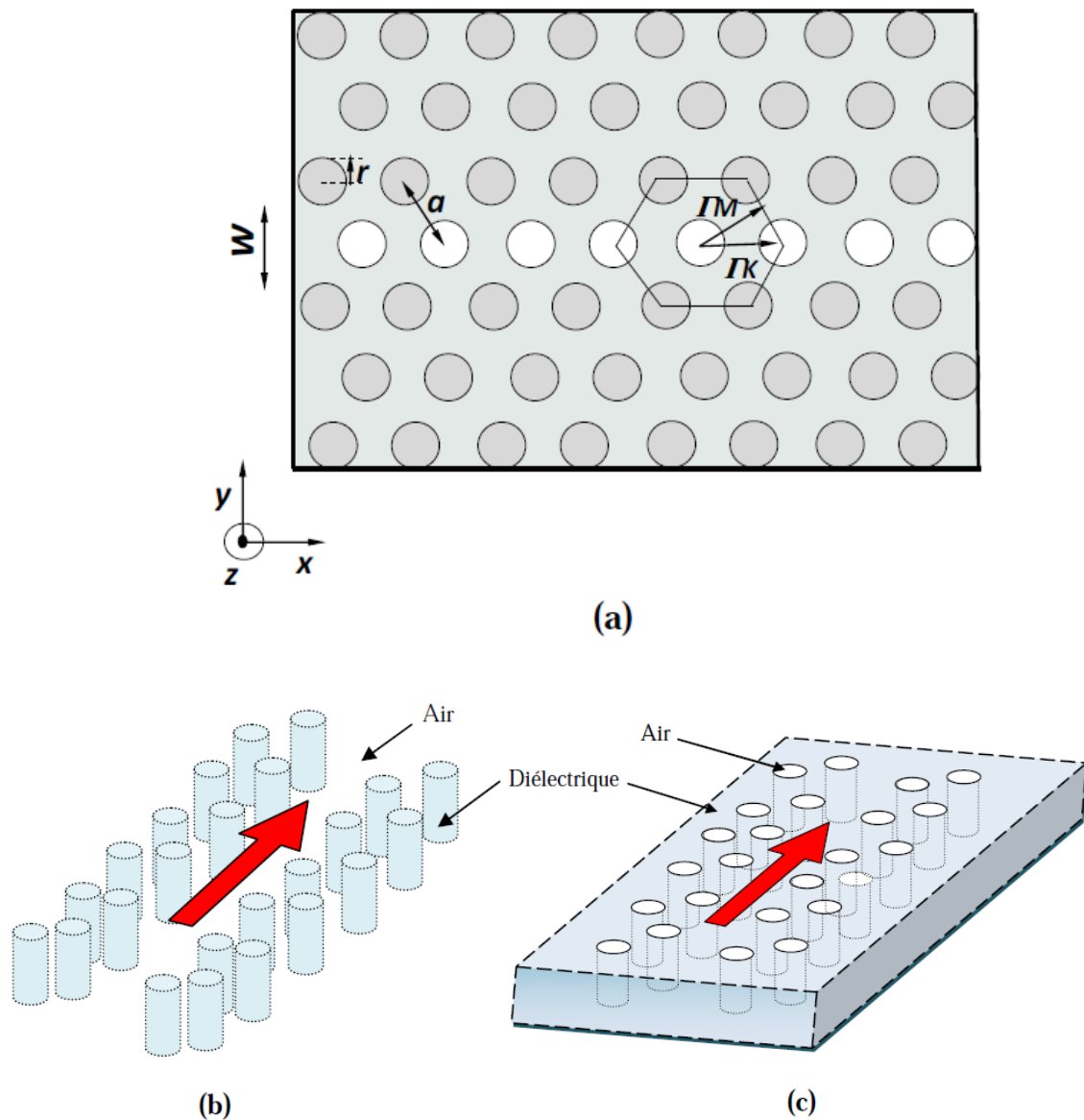


Figure II . 7. : Schéma d'un guide d'onde : (a) défini dans un réseau dimensionnel triangulaire de trous d'air, (b) défini dans un réseau bidimensionnel de colonnes de diélectriques, (c) dans un réseau de trous d'air.[23]

II.4. Différents types des guides d'ondes

II.4.1. 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 (Figure II-8) [23]. 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-8(a)) représente un défaut obtenu en retirant une rangée de motifs dans la direction ΓM .

-Le deuxième exemple (Figure II-8(b)) correspond à un défaut obtenu en retirant une rangée de motifs dans la direction ΓK .

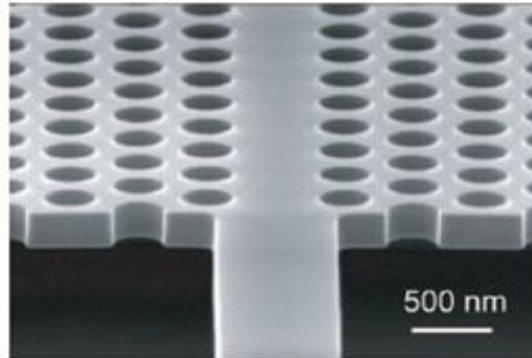


Figure II-8: Représentation réelle d'un guide d'onde de largeur W à base d'un CP2D [24]

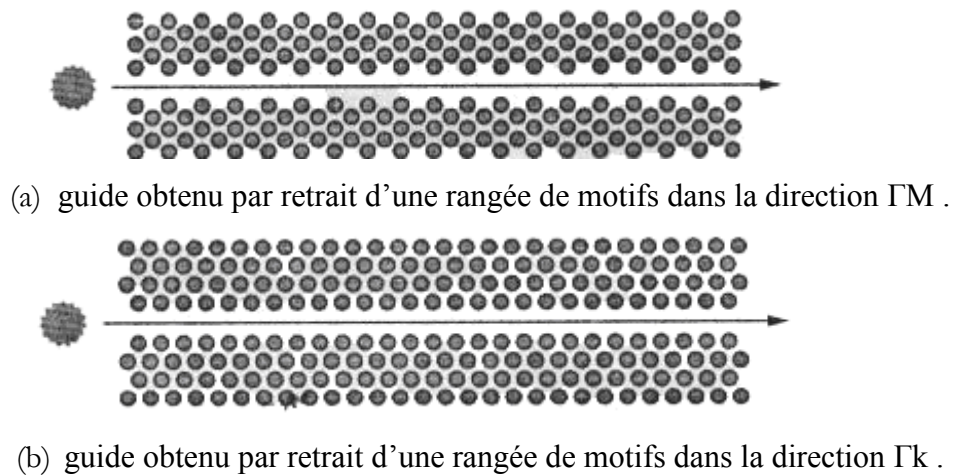


Figure II-9: Exemple de guides d'ondes dans un cristal photonique hexagonal.

II.4.2. 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- 10). 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) [20].

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

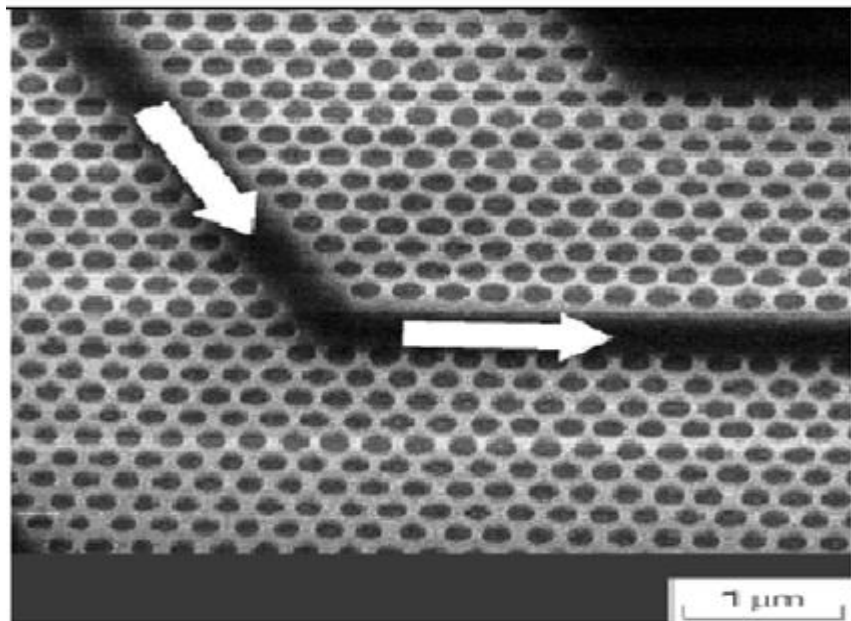


Figure II-10 : Virage réalisé dans un cristal photonique bidimensionnel [24].

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 [24].

II.5. Principe de test des guides à cristaux photoniques

Le principe de test repose sur la facilité de coupler de l'énergie au mode guide d'une membrane par le pompage d'une couche active et de la collecter après un certain parcours dans la membrane, au moyen d'un réseau de diffraction. Pour tester qualitativement la transmission d'un guide, il suffit d'intercaler celui-ci entre la source de pompage et le réseau de diffraction (Figure II-11) [25]

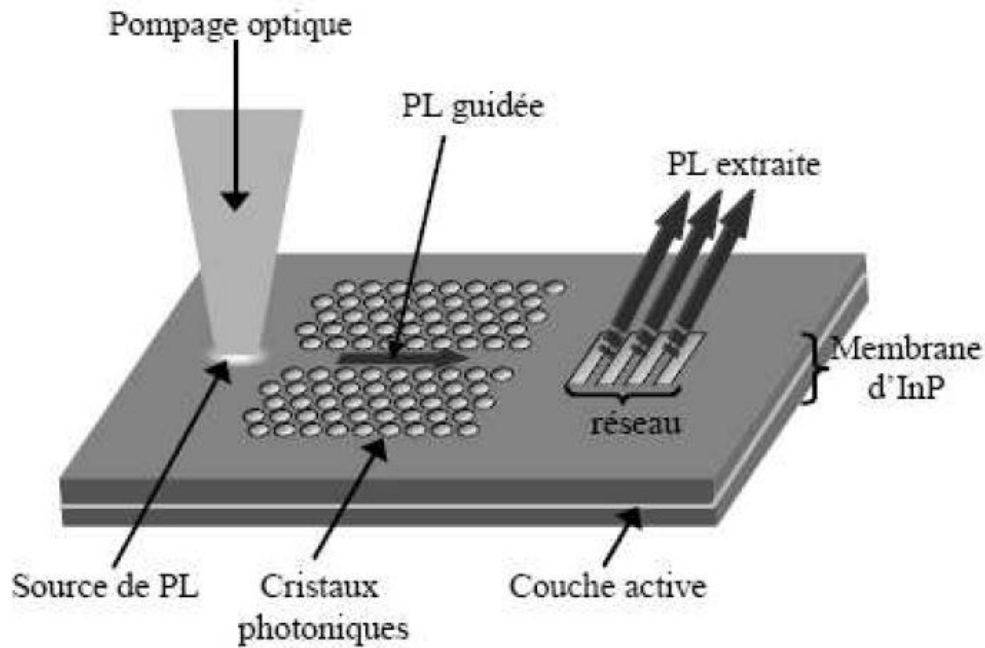


Figure II-11: Principe du dispositif de test des guides à cristaux photoniques sur membrane d'InP.

Une structure de validation a été réalisée avec un guide W3. Les images infrarouges obtenues montrent la validité de cette approche de caractérisation (Figure II-11). Lorsque le faisceau pompé est placé en face de l'entrée du guide, un signal significatif est découplé de la membrane par le réseau. Lorsque ce faisceau est décalé de l'entrée du guide, le signal découplé est quasiment inobservable. Ces deux expériences sont une mise en évidence directe du guidage le long de défaut linéique dans un cristal photonique.

II.5.1. Couplage cavité / guide dans un cristal photonique 2D

Trouver un système capable d'insérer et d'extraire sélectivement une longueur d'onde est le but de couplage d'une cavité au « monde extérieur », le couplage d'un guide à CP et d'une cavité à CP est notamment l'un des schémas privilégiés. Bien que certaines configurations proposées semblent des résultats d'intérêt pour diverses applications (figure II-12). Parmi les réalisations marquantes, on peut citer :

- Des cavités H2 ou H3 mises en cascades avec des guides, les cavités Hn se couplent aux guides Wk par les « pointes » de ce champ, ce qui, intuitivement, n'est pas favorable. La cavité donnée en exemple (figure II-12(a) et II-12(b)) remédie à cet inconvénient, au détriment d'une taille plus grande.
- Un guide à cavités couplées dit CROW (pour Coupled Resonator Optical Waveguide) (figure II-12(c)) et ses effets de mini bandes interdites (mini gaps) de transmission, bien visibles sur le spectre présenté (figure II-12 (d)). Il s'agit, en fait, d'un bon système de test pour la photonique avec, en particulier, la possibilité de contrôler la vitesse de groupe par le degré de couplage entre cavités.
- Une cavité comportant un seul trou modifié, en l'occurrence agrandi, et couplée à un guide type W1 (Figure I-12(e)). Le retrait sélectif (drop) d'une longueur d'onde avec un facteur de qualité de près de 500 a été obtenu. La difficulté de cette réalisation est d'atteindre le couplage critique, c'est-à-dire, celui où les pertes par rayonnement de la cavité vers l'air sont égales aux pertes vers le guide. Cela semble nécessiter une précision de fabrication au-delà du commun. On peut noter qu'aucun résultat marquant n'a été obtenu avec H1 couplé à un guide.
- Des cavités rectangulaires (tronçons de W1), elles-mêmes couplées à un guide de type W1 (Figure II-12(g)). Le but recherché est le même que précédemment : atteindre les conditions de couplage critique

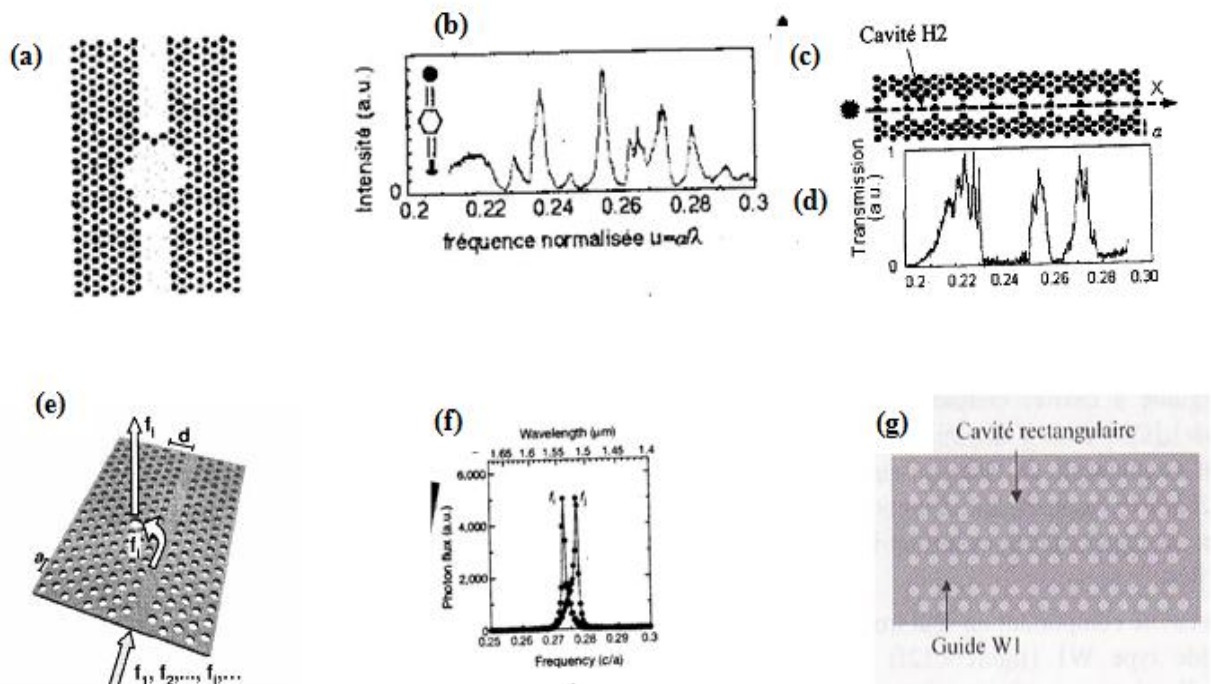


Figure II-12: (a) Cavité adaptée au couplage au guide W3 et insérée dans ce guide ; (b) Son spectre de transmission ; (c) Exemple de guide à cavités couplées (dit « CROW » formée de neuf cavités H2) ; (d) Exemple de transmission en fonction de la fréquence réduite $u = a/\lambda$; (e) Défauts constitués formés d'un trou élargi et couplés à un guide W1 ; (f) Spectre recueilli à la verticale du défaut ; (g) Cavité rectangulaire couplées à un guide W1 [26].

II.6.1.Filtres

L'idée est de créer un défaut linéaire et un autre ponctuel sur le même cristal photonique qui va permettre d'insérer ou d'extraire des longueurs d'onde bien précises dans un flux de données.

La figure II14, représente une cavité résonante couplée par recouvrement des ondes évanescentes à des guides d'onde, cette structure appelée un filtre 'Add-Drop'.

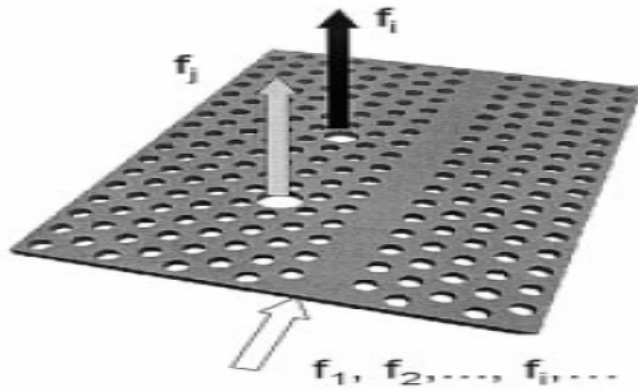


Figure II-13: la structure et le principe de fonctionnement d'un filtre Add-Drop; une rangée est éliminée pour guider les ondes avec des fréquences $f_1, f_2, \dots, f_i, \dots$. Et les

défauts ponctuels pour extraire les fréquences désirées f_i, f_j [8].

II. 6. 2. Un démultiplexeur pour les longueurs d'ondes $1,31 \mu\text{m}$ et $1,55 \mu\text{m}$

Une méthode pour la conception d'un démultiplexeur en longueur d'onde à base des cristaux photoniques 2D pour la séparation des impulsions ultra-courtes du canal est proposée [51]. La méthode est basée sur l'analyse des cartes de bandes interdites photoniques complète qui permet de sélectionner les paramètres géométriques du démultiplexeur. Le dispositif sépare efficacement les canaux avec des longueurs d'onde $1,31 \mu\text{m}$ et $1,55 \mu\text{m}$ (Figure II. 14).

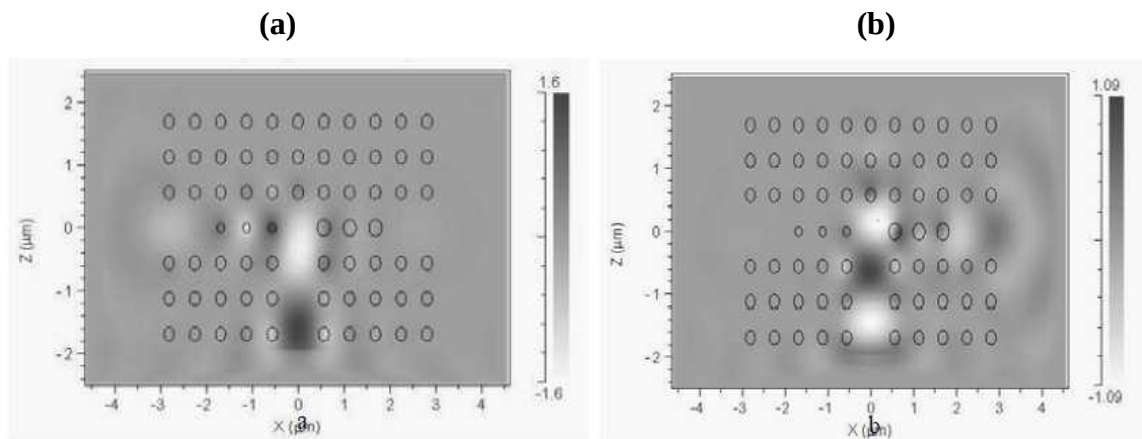


Figure II. 14 : Résultats de la simulation FDTD d'un démultiplexeur en longueur d'onde : (a) longueur d'onde $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$, (b) longueur d'onde $\lambda = 1,31 \mu\text{m}$. [6]

Conclusion

Les cristaux photoniques sont très prometteurs pour la réalisation des composants optique planaires. Ces matériaux représentent une plate-forme extrêmement intéressante pour l'optique intégrée. En effet, la miniaturisation des composants optique pour l'intégration exige le contrôle des modes de propagation des ondes électromagnétique dans ces cristaux (mode de défauts). Pour cela nous avons étudié au cours de ce chapitre les différentes types de défauts crée pour la réaliser les composants optique en particulier les cavités à cristaux photoniques, les différents types de cette dernière et les guide ondes. Nous avons fini notre étude théorique par une étude de couplage cavité guides pour voir plus l'utilité de ces cavités lieu de chapitre suivante les logiciels de simulation de Rsoft CAD ,BandSolve basé sur la méthode des ondes planes et FULL WAVE basé sur la méthode FDTD.