
CARACTÉRISATION EXPÉRIMENTALE DES STRUCTURES PHOTONIQUES

Sommaire

IV.1 Introduction	108
IV.2 Présentation du montage de caractérisation	112
IV.3 Validation du montage expérimental	114
IV.4 Caractérisation de nanostructures associées à des guides d'onde	118
IV.5 Discussion	127
IV.6 Conclusion	129

Les structures photoniques associées à des guides d'onde dont nous avons décrit la fabrication, peuvent être caractérisées de plusieurs façons. Nous avons évoqué dans les parties précédentes des méthodes de caractérisation directes par MEB ou FIB (caractérisations en surface ou en coupe par cross section). Il est aussi possible de caractériser la surface par AFM. Mais étant donnée l'utilisation de ces structures, la caractérisation la plus pertinente est constituée par les mesures optiques.

- Mesure de transmission : en injectant dans le guide avec plusieurs longueurs d'onde grâce à une source accordable, nous pouvons tracer un spectre de transmission en récupérant la lumière en sortie de guide.
- Imagerie SNOM qui permet de détecter le champ évanescent à la surface de tels échantillons. Nous verrons dans cette partie que le SNOM développé se prête particulièrement bien à de telles caractérisations, le champ étant fortement confiné dans les structures photoniques.

IV.1 INTRODUCTION

1.1 Méthodes classiques pour caractériser les guides optiques

La méthode de caractérisation la plus courante est l'étude de la transmission en injectant dans le guide un faisceau de longueur d'onde accordable et en mesurant le champ en sortie de guide. Cette étude permet d'obtenir la distribution d'intensité lumineuse du mode (ce qui permet de remonter au profil d'indice du mode), et d'avoir une mesure des pertes par guidage. Elle permet aussi de vérifier la monomodalité du guide. Cette première méthode ne montre rien du guidage en lui-même et des défauts pouvant l'affecter, même si l'image de la face de sortie peut être affinée par une mesure en champ proche.

Une seconde démarche, utilisée dans le cas de caractérisation de guide d'onde, consiste à approcher du guide d'onde un prisme de haut indice, frustrant ainsi les ondes évanescentes accompagnant la propagation du champ. Cette méthode permet par exemple de mesurer les pertes en propagation en déplaçant longitudinalement le prisme [114]. Cependant il faut remarquer que le contact du prisme avec la surface peut être préjudiciable dans le cas d'un guide en surface, de plus, elle ne permet pas de connaître le profil du champ. Cette information peut être obtenue par la méthode dite des « *m-lines* » [115]. Cette méthode demande à ce que plusieurs modes soient guidés, ce qui pour des guides monomodes nécessite une injection à des longueurs d'onde inférieures à celle de travail. Le couplage dans le guide par le prisme permet de visualiser les différents modes qui permettent de remonter aux indices effectifs.

1.2 Caractérisation de guide optique par microscopie en champ proche

Depuis quelques années, la microscopie en champ proche a beaucoup apporté à la caractérisation de guide d'onde d'optique intégrée, notamment l'aspect non-destructif pour l'objet puisqu'elle ne nécessite aucune préparation particulière, ainsi que des résolutions inférieures à la longueur d'onde. On remarque dans la littérature deux principales applications (schématisées Fig IV.1). La première permet une caractérisation modale en plaçant la sonde en sortie du composant, actif ou passif, ce qui permet une mesure du profil de mode en effectuant un balayage dans la zone de champ proche. Cette étude a permis des résolutions allant jusqu'à $150 - 200\text{nm}$ [116, 117]. La mesure du profil d'intensité du mode fondamental permet entre autres de donner des informations concernant au profil d'indice.

Une seconde application, qui nous interesse plus puisque transposable à l'étude des cristaux photoniques, est l'étude *in situ* de la propagation du champ dans les structures guidantes par le biais de la composante évanescente. La sonde pouvant se déplacer en x et y (voir Fig. IV.1) permet un balayage en surface et donc une cartographie du champ selon l'axe de propagation.

Plusieurs méthodes de caractérisation ont été élaborées à partir de cette application. Il est en effet possible de mesurer la décroissance de l'onde évanescente à la surface du guide [118], pouvant permettre de déterminer expérimentalement et localement l'indice effectif du guide qui lui est relié [119]. De la même manière, il est possible de déterminer le profil du mode guidé [120]. Toutes ces expériences montrent une bonne concordance avec les prédictions théoriques obtenues par BPM.

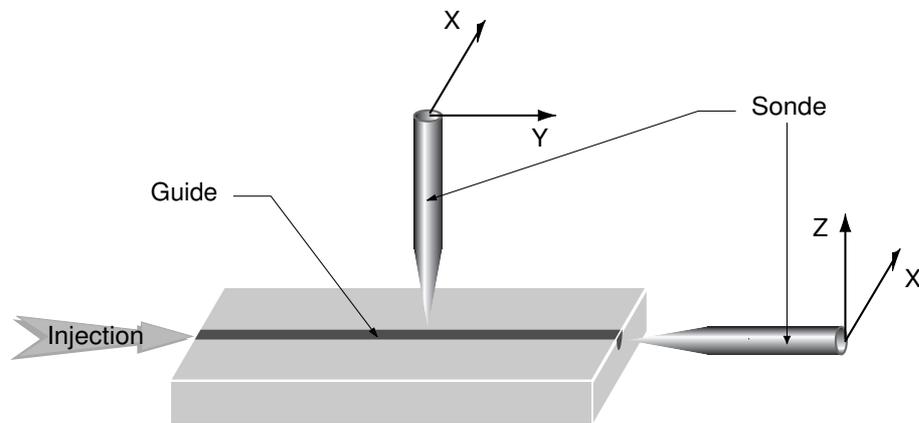


FIG. IV.1 – Configurations d'analyse de guide d'onde par microscopie optique en champ proche : en surface ou en sortie de guide

Cette étude permet aussi de caractériser la propagation du champ dans des guides d'onde de type ruban [92, 121] ou même dans différents types de guides enterrés (diffusés ou réalisés par échange protonique) [122], ou encore dans des composants largement utilisés en optique guidée comme des jonction Y ou encore de coupleurs directionnels [123, 124]. La microscopie en champ proche est ici utilisée pour caractériser la distribution en intensité du mode guidé, avec une résolution sub-longueur d'onde. Dans les deux derniers cas, seule la microscopie en champ proche permet d'observer la propagation du champ en vue d'une optimisation possible de ces structures. On peut remarquer dans cette étude une somme d'informations supplémentaires, comme des inhomogénéités ou des défauts dans la couche guidante, qui peuvent provoquer de fortes fuites [121]. Cette information, liée à l'image topographique enregistrée simultanément permet de connaître la raison de ces défauts. De même, il est possible de détecter le nombre de modes se propageant dans les guides. Par exemple, dans le cas de guides propageant deux modes dont les polarisations sont perpendiculaires (TE_{00} et TM_{00}), on

peut observer que la détection simultanée de ces deux modes par SNOM provoque des figures de quasi-interférences [92].

Enfin la microscopie champ proche dans une configuration combinée à l'interférométrie hétérodyne, qui compare le signal détecté par la sonde avec un signal de référence, permet une étude de l'évolution de la phase de la lumière propagée dans des guides d'onde optique et de ces singularités [93].

Au vue des résultats obtenus pour ces structures guidantes et la résolution obtenue par les microscopes en champ proche, il est naturel d'utiliser cet outil pour la caractérisation de structures photoniques.

1.3 Caractérisation de structures photoniques par microscopie du champ proche

1.3.1 Principales méthodes de caractérisation de structure photonique

Il se pose pour la caractérisation de cristaux photoniques le même problème que pour la caractérisation de guides d'onde optique. La méthode la plus aisée est d'étudier la transmission de telle structures (injection par un guide ou injection in-situ par un puits quantique dans la couche guidante au voisinage de la structure puis détection en sortie de guide ou par le biais d'un réseau diffractant la lumière après la structure à étudier). Ce type de caractérisation ne donne que très peu de détail sur ce qu'il se passe à l'intérieur même de la structure.

De nombreuses études expérimentales ont été effectuées sur plusieurs configurations de guides dans des cristaux photoniques dans le but de montrer une propagation de la lumière avec peu de pertes [16, 17, 125, 126]. Ces études sont motivées par la possibilité d'un guidage efficace sur des guides créé par des lacunes de lignes dans les cristaux photoniques, droite ou à 90° [14], permettant à terme la réalisation de structures guidantes hautement intégrées. Cependant, ces méthodes expérimentales restent de type indirect, ce sont notamment des études par transmission. La visualisation de la propagation de la lumière en imageant avec une caméra la surface d'un guide photonique montre certaines limites et paraît utile uniquement dans le cas de défauts dans la structures accidentels [127] ou fabriqués [128], ou encore avec la lumière intentionnellement couplée à des modes à pertes [125]. Imager la face de sortie du guide photonique avec une caméra [125] ou une fibre taillé en pointe [15] montre que la lumière est bien guidée par le guide d'onde photonique.

Les mesures relatives du spectre de transmission avec ou sans guide photonique [16, 129] (ou avec et sans virage [130]) avec une normalisation ultérieure ont donné de bons résultats pour les mesures de pertes en y éliminant les effets extérieurs (par exemple, le couplage laser-guide à effet photonique). Toutefois, le fait que le rendement trouvé dans ces conditions excède parfois 100% [16, 129, 130] montre que les guides d'onde sur cristaux photoniques demandent une autre méthode de caractérisation.

On peut souligner une dernière méthode de caractérisation utilisant une technique de résonance Fabry-Pérot qui a permis de déterminer les pertes en propagation de cristaux photoniques planaires [131].

D'autres configurations de cristaux photoniques sont encore plus difficilement caractérisées par des méthodes champ lointain, c'est le cas par exemple des résonateurs par lacune d'un ou plusieurs trous, dont la taille n'excède pas quelques centaines de nanomètres. Pour tous ces éléments, la microscopie en champ proche semble un bon moyen de caractérisation.

1.3.2 Caractérisation de structures périodiques nanométriques en champ proche

La caractérisation de structure photonique par microscopie en champ proche permet d'étudier localement et *in-situ* la propagation et le confinement d'onde électromagnétique. Cette approche doit nous permettre une meilleure compréhension de l'effet de bande interdite.

Pour qu'une structure photonique puisse avoir un effet dans le domaine optique visible ou infra-rouge, la période de la structure périodique doit être de l'ordre de la longueur d'onde concernée. Mesurer les propriétés optiques de tels composants demande donc une résolution supérieure à celle permise par les méthodes conventionnelles en champ lointain. La microscopie en champ proche permet quant à elle des résolutions de l'ordre de $\lambda/10$ à $\lambda/20$, limitée principalement par la taille de l'ouverture de la sonde.

De nombreux travaux ont eu lieu sur ce sujet, parallèlement aux progrès faits dans la fabrication de structures photoniques. Les premières caractérisations de cristaux photoniques 2D [132–137] étudient uniquement une direction d'injection ($\vec{k} = \vec{0}$), c'est-à-dire en éclairant la structure perpendiculairement à la surface et en recueillant la lumière transmise ou réfléchiée par cette structure. Le microscope étant en configuration transmission, l'éclairage de la structure est effectué par la sonde. Pour avoir accès à plus d'informations lors de la caractérisation, l'injection de la lumière dans la

structure doit être indépendante de la caractérisation. L'utilisation d'un microscope champ proche en configuration collection est dans ce cas une bonne solution. L'injection de lumière dans la structure peut se faire via un guide d'onde, les structures à étudier étant gravées sur ce guide ruban [138, 139] ou planaire [140, 141] ou, ce qui revient au même, la lumière est amenée sur les structures puis récupérée par des guides d'ondes [142, 143]. De cette manière, il est aussi possible d'étudier la propagation de la lumière dans des guides d'onde sur cristaux photoniques (réalisés par l'introduction de défauts dans la structure périodique). Ces guides peuvent être droits [136, 144–146] ou à virage [142, 144].

Pour des structures où la lumière est encore plus confinée, comme c'est le cas dans nanocavités des cristaux photoniques, la caractérisation en champ proche a permis de mesurer la répartition d'intensité des modes de résonances [136, 147, 148], qui trouvent des applications dans la réalisation de laser intégré [149].

Une autre expérience a été proposée, consistant à amener la lumière grâce à un guide au niveau de la structure photonique, la lumière étant ensuite couplée dans la structure photonique gravée entre deux guides par l'onde évanescente issue de la propagation dans le guide [58, 59].

Il est bon de remarquer que la plupart de ces caractérisations ont été réalisées par des SNOM en mode collection ou des STOM. De même, l'utilisation d'un microscope en champ proche optique sans ouverture (A-SNOM) a montré son efficacité pour l'étude de telles structures [150]. Enfin, l'utilisation de microscope en champ proche sensible à la phase grâce à une détection hétérodyne permet de mesurer l'évolution de la phase de la lumière se propageant dans les structures photoniques [151].

IV.2 PRÉSENTATION DU MONTAGE DE CARACTÉRISATION

2.1 Description générale

Un schéma simplifié du montage expérimental est représenté sur la figure IV.2. Une source laser couplée à une fibre à maintien de polarisation permet d'injecter la lumière dans le guide d'onde à étudier. Une platine portant la fibre et permettant cinq degrés de liberté (X, Y, Z, tilts vertical et horizontal) permet d'optimiser l'injection dans le guide. Un porte-fibre permet de tourner la fibre à maintien de polarisation et de choisir la polarisation souhaitée. En sortie du guide, un objectif monté sur platine de translation permet l'alignement dans l'axe du guide d'optimiser l'injection dans le guide contrôlée par une caméra CCD.

Les réglages de ce système d'injection sont totalement indépendants du système de caractérisation. Une fois le réglage de l'injection effectué et optimisé, on peut placer la tête autonome du microscope champ proche, et positionner la sonde au dessus de la zone à étudier sans toucher au réglage de l'injection. Pour un maximum de stabilité, il repose sur un tripode trait-point-plan solidaire des deux platines de translation croisées permettant le positionnement de la sonde par rapport à l'échantillon. Ce positionnement est contrôlé grâce à une binoculaire.

L'approche se fait grossièrement grâce à des butées micrométriques sur chacun des pieds du tripode, une approche plus douce est ensuite effectuée par l'une des butées, de type différentiel. Enfin, l'approche finale de la sonde est effectuée électroniquement grâce à une fonction du circuit d'asservissement (voir le chapitre III). Cette approche est effectuée alors que le translateur XY est en attente sur le premier point du champ balayé.

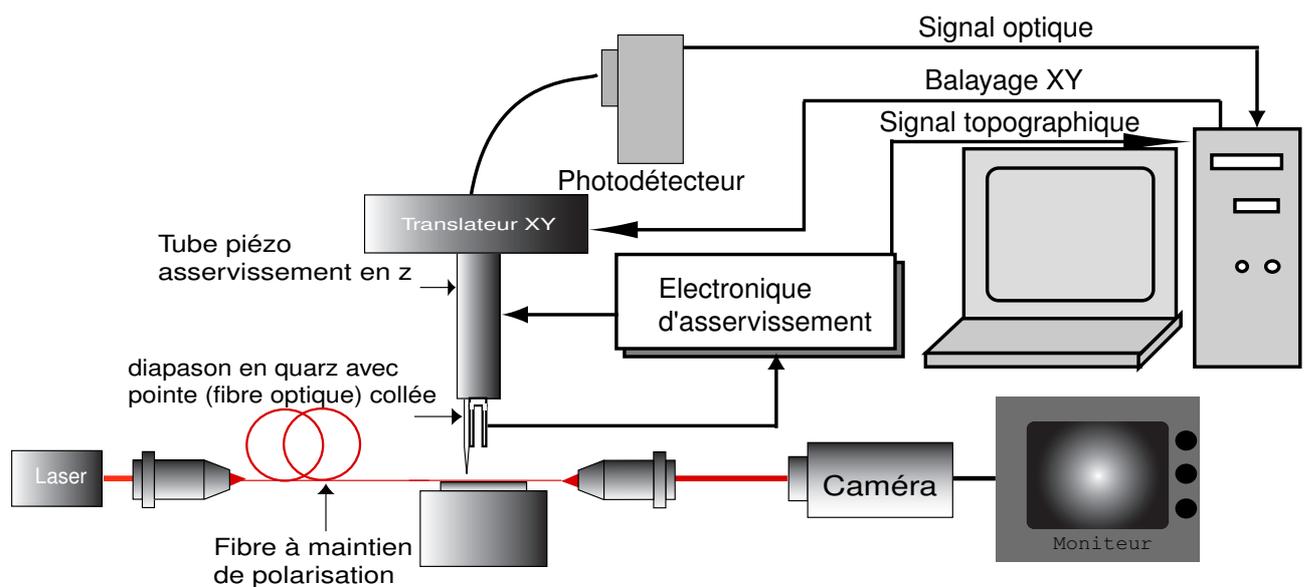


FIG. IV.2 – Schéma général du dispositif expérimentale.

2.2 Source lumineuse utilisée

Les contraintes de notre expérience nécessite, pour une caractérisation des structures photoniques sensibles à la longueur d'onde, une source accordable. Nous avons utilisé au cours de ce travail un laser titane-saphir accordable en longueur d'onde sur les plages $700 - 850\text{nm}$ et $850 - 950\text{nm}$ qu'il est possible de choisir en utilisant deux jeux de miroirs. La puissance de sortie est réglable et dépend de la puissance optique de la pompe délivrée par un laser argon, dont le maximum est $P_{max} = 8\text{W}$.

La longueur d'onde du laser est sélectionnée grâce à un filtre de Lyot dont la rotation est contrôlée par un moteur électrique pas-à-pas, permettant un balayage linéaire de l'intervalle des longueurs d'onde dans la gamme sélectionnée.

2.3 Injection dans le guide d'onde

Le faisceau laser, polarisé horizontalement, est ensuite injecté par un objectif dans une fibre à maintien de polarisation, parallèlement à l'une des lignes neutres. La sortie de cette fibre est approchée de l'échantillon grâce à des platines micrométriques, permettant des réglages en x , y , z , θ_x et θ_y . De plus la fibre est fixée dans un support rotatif, permettant de choisir une polarisation au niveau de l'injection dans l'échantillon.

La lumière servant à exciter ces nanostructures étant amenée par ces guides d'onde, il est donc important de vérifier et d'optimiser l'injection. La lumière en sortie du guide sera donc recueillie par un objectif pour contrôler l'injection par une caméra CCD reliée à un moniteur. On pourra donc avoir une idée précise du ou des modes guidés.

Pour une étude plus précise, comme par exemple une étude spectrale, un photodétecteur pourra être placé à la place de la caméra CCD.

IV.3 VALIDATION DU MONTAGE EXPÉRIMENTAL : CARACTÉRISATION EN CHAMP PROCHE DE GUIDES D'ONDE OPTIQUE

Le premier travail effectué a consisté à la caractérisation des guides d'onde optique choisis (voir Partie II.2). Le guide a été choisi pour être monomode sur la gamme de longueur d'onde étudiée (750-950nm).

Une fois les guides à étudier injectés, la tête du microscope champ proche est placée sur son support au dessus de l'échantillon. Avant balayage le placement de la sonde au-dessus des structures est réalisé sans toucher au montage d'injection. Le placement et l'approche (typiquement à $10\mu\text{m}$ de la surface) visuels de la sonde sont facilités par des repères de taille plus importante que les structures (dont la taille ne dépassent pas le micromètre) qui ont été préalablement gravés par FIB.

3.1 Résultats

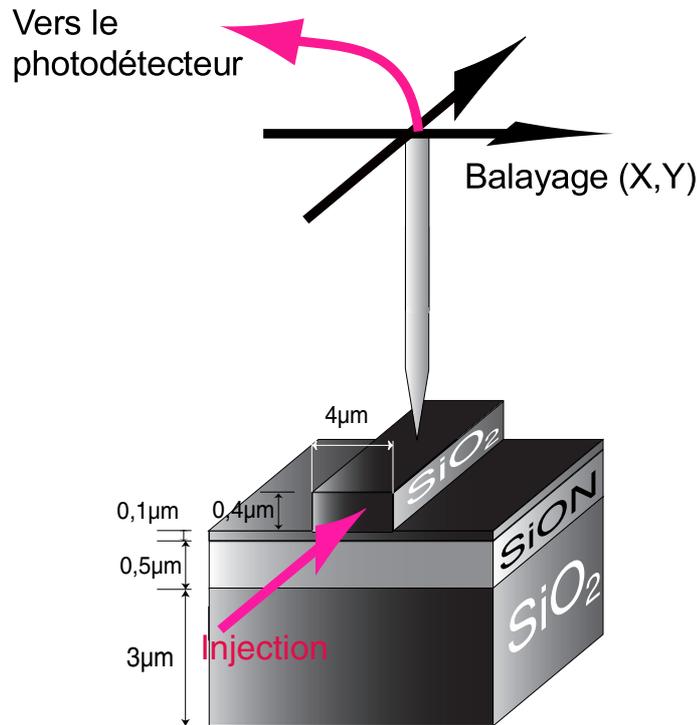
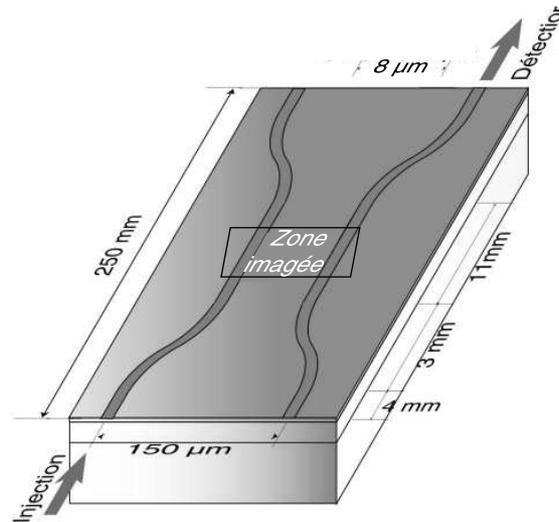


FIG. IV.3 – Caractérisation en champ proche d'un guide optique. Sur le schéma sont rappelés les dimensions des guides.

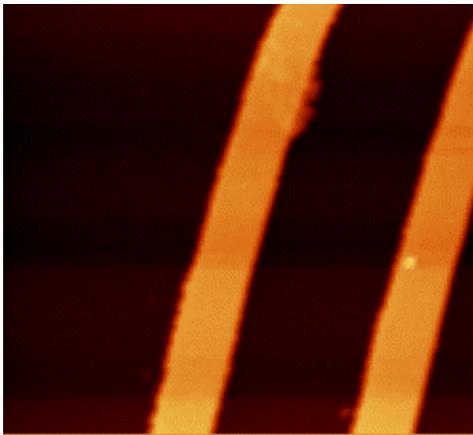
L'acquisition de l'image champ proche d'un guide d'onde dans lequel la lumière a été injectée est schématisée figure IV.3.

La figure IV.4 présente le résultat obtenu avec deux guides parallèles distants de $8\mu m$ (voir le schéma IV.4(a)) et formant un coupleur à faible coefficient de couplage. Les figures montrent l'image topographique (voir Fig. IV.4(b)) et optique (voir Fig. IV.4(c)). Lorsque l'on injecte dans l'un des deux guides, on remarque que l'on n'observe pas de signal optique dans le deuxième guide, ce qui montre le faible couplage entre les deux guides. On observe par contre, à l'endroit où il existe un défaut dans le guide non injecté un pic de signal optique, correspondant à la lumière diffractée en surface.

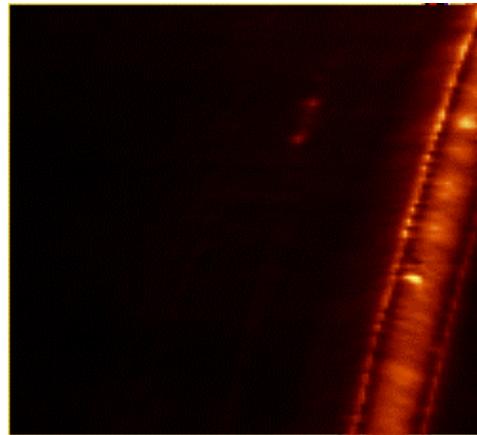
La figure IV.5 présente des coupes de l'image du guide éclairé. On perçoit sur l'image topographique (voir Fig. IV.5(a)) la forme du ruban, dont la hauteur mesurée est de 3400\AA et la largeur d'un peu plus de $4\mu m$ à mi hauteur. Ces valeurs correspondent à celles déterminées pendant la fabrication. L'image optique correspondante (voir Fig. IV.5(b)) peut être comparées à l'image IV.5(c) issue d'un calcul BPM, donnant la valeur de l'intensité de l'onde évanescente à distance constante d'un guide.



(a) Schéma du coupleur à faible coefficient de couplage.

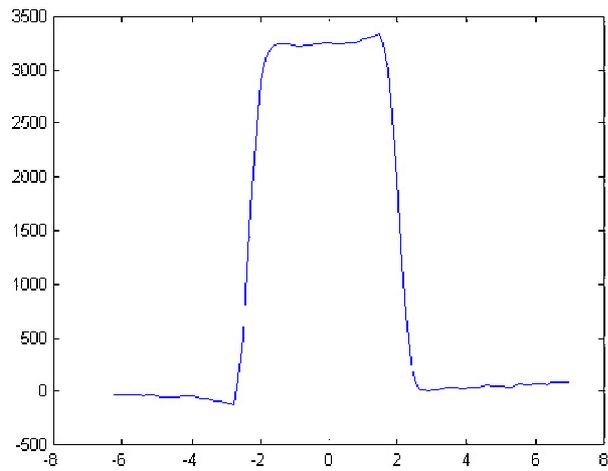


(b) Image topographique

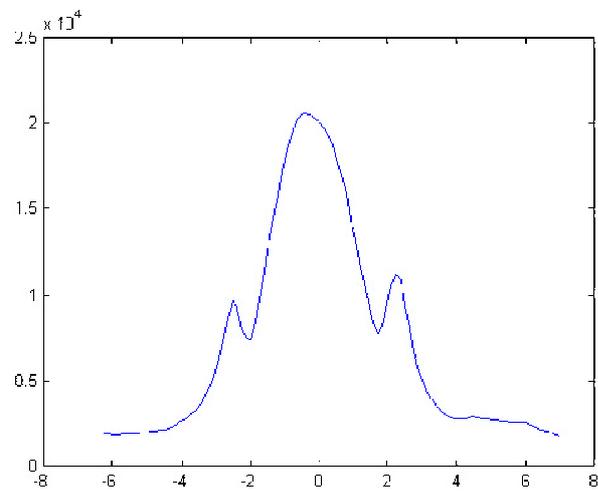


(c) Image optique

FIG. IV.4 – Images champ proche d'un coupleur dont les guides sont séparés de $8\mu\text{m}$ (image $30 * 30\mu\text{m}^2$)



(a) coupe de l'image topographique



(b) coupe de l'image optique

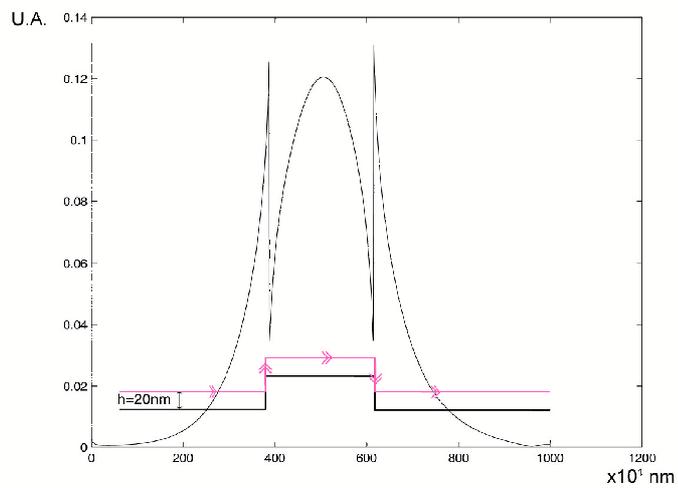
(c) Intensité du champ évanescent à $d=20\text{nm}$ (calcul)

FIG. IV.5 – Coupe de l'image topographique et optique d'un guide observé par microscopie champ proche. Comparaison des coupes des images optiques obtenues par expérience et par simulation.

Nous trouvons sur les deux figures un maximum d'intensité au centre du guide ainsi que deux lobes de chaque côté, correspondants à l'onde évanescente due au mode de propagation sur le haut et sur les côtés du guide. Les deux minima de cette courbe correspondent bien aux bords du ruban.

Les caractérisations exécutées à différentes longueurs d'onde sur différents guides de l'échantillon ont toujours montré des résultats similaires, montrant que les guides choisis peuvent être utilisés sur l'ensemble de la gamme de fréquence permise par le Laser.

IV.4 CARACTÉRISATION DE NANOSTRUCTURES ASSOCIÉES À DES GUIDES D'ONDE

Le fonctionnement du microscope en champ proche ayant été validé par l'étude des guides d'onde nus, les nanostructures ont été gravées à l'aide du FIB. Les échantillons ainsi traités sont caractérisés par deux méthodes différentes. En premier lieu, le spectre de transmission de ces structures donne des indications importantes sur leur comportement en fonction de la longueur d'onde. Ensuite, la microscope en champ proche, fonctionnant en détection, permettra la caractérisation *in-situ* des structures gravées.

4.1 Étude spectrale

Une étude spectrale de l'échantillon a été menée dans le but de trouver l'emplacement de possibles bandes interdites photoniques, en plaçant deux photodétecteurs destinés à mesurer l'intensité lumineuse en entrée et en sortie du guide d'onde. Ces mesures, faites sur la gamme de longueur d'onde permise par le laser accordable dans les polarisations TE et TM, ont montré des variations en transmission mais ne permettent pas de conclure clairement à l'existence d'une BIP (voir Fig. IV.6).

Nous verrons plus en détail par la suite (partie IV.5) que ce résultat peut être expliqué par les défauts de fabrication de l'échantillon.

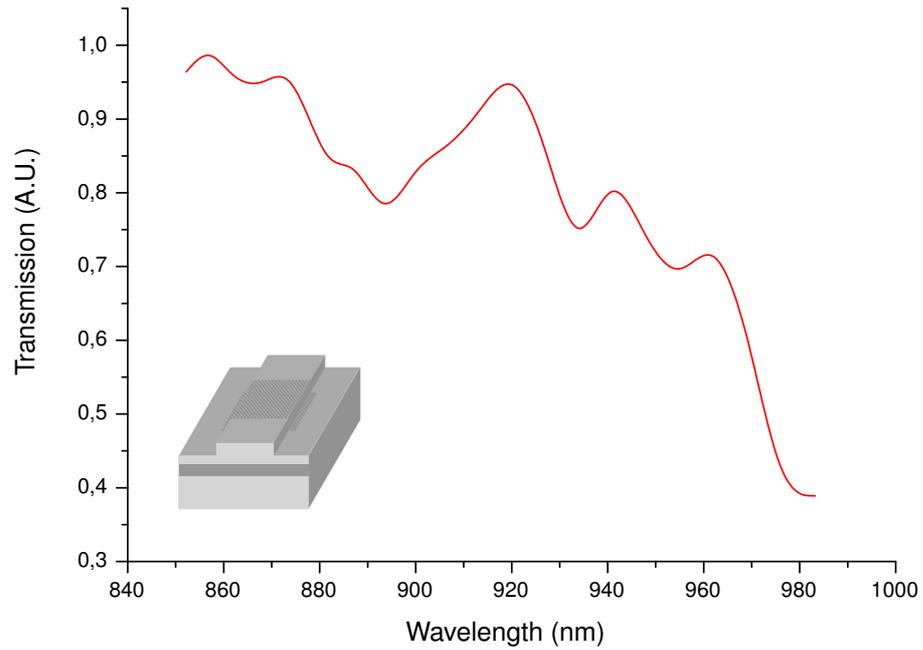


FIG. IV.6 – Spectre de transmission mesuré pour une des structures étudiées.

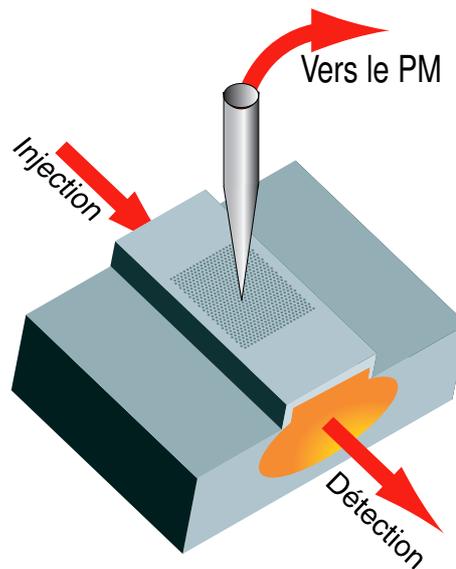


FIG. IV.7 – Détection en champ proche des ondes évanescentes.

4.2 Images SNOM

Nous présenterons ici l'étude des deux structures gravées sur guides d'onde que nous avons déjà décrites dans le chapitre théorique.

4.2.1 Caractérisation de nanostructures sans défaut associées à un guide d'onde

Nous avons caractérisé une structure composée de 40×40 trous (diamètre : $d = 200nm$), disposés selon une maille triangulaire (période : $a = 360nm$), gravée sur un guide d'onde à différentes longueurs d'onde. La propagation de la lumière se fait dans une direction ΓM dans la structure. Même si le spectre de transmission n'a pas montré de BIP, la propagation et la pénétration de la lumière dans de telles structures sont différentes selon la longueur d'onde.

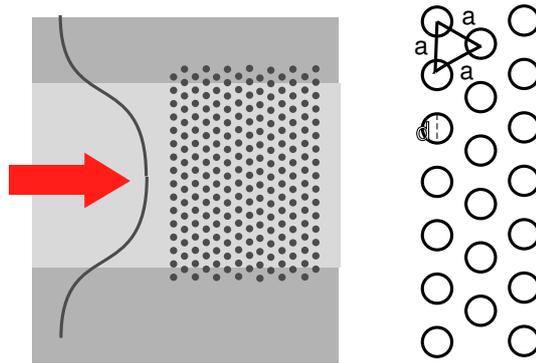


FIG. IV.8 – Détails de la structure caractérisée, disposition des trous sur le guide. Détail de la maille triangulaire de trous.

Les images optiques réalisées à deux longueurs d'onde, l'une se trouvant dans la bande interdite théorique ($\lambda = 900nm$, Fig. IV.9(c)), l'autre en dehors de cette bande ($\lambda = 850nm$, Fig. IV.9(b)), montrent deux comportements totalement différents. L'image topographique (voir Fig. IV.9(a)) a été corrigée par un rattrapage de pente. Bien que montrant un faible contraste, elle permet clairement de distinguer la zone du guide qui a été traitée par le FIB (entre les lignes blanches). La propagation de la lumière va du haut vers le bas de l'image. Les images optiques n'ont subies aucun traitement et ont été réalisées à la suite, sans modification de réglage du laser ou du PM. La Fig. IV.9(b) montre une forte intensité de lumière à l'intérieur de la structure, la lumière y pénètre profondément. Pour la deuxième longueur d'onde, la Fig. IV.9(c) montre une forte intensité de lumière à l'entrée de la matrice de trous, mais celle-ci décroît rapidement. L'image (b) montre des pertes beaucoup plus importantes que l'image (c) dans la partie gravée, ce qui confirme une plus grande pénétration de la lumière à la longueur d'onde $\lambda = 850nm$.

De plus, une mesure de l'intensité dans le guide en sortie sur ces deux images montre une transmission 5 fois plus importante à $\lambda = 850nm$ qu'à $\lambda = 900nm$.

Une comparaison plus qualitative peut être effectuée sur plusieurs images optiques prises sur la

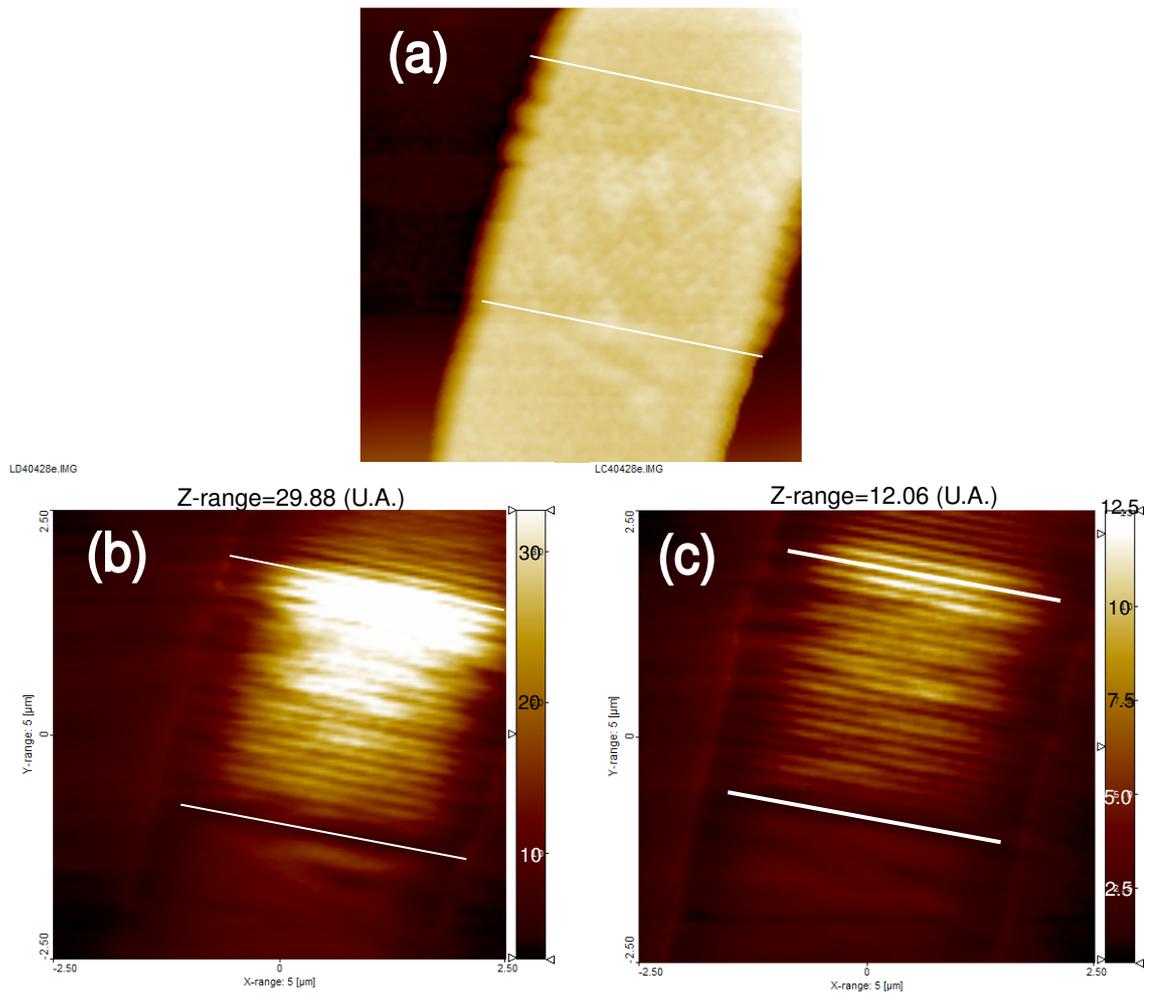


FIG. IV.9 – Caractérisation en champ proche d'une structure de trous gravée sur un guide d'onde à deux longueurs d'onde ((b) $\lambda = 850\text{nm}$ (c) $\lambda = 900\text{nm}$). (a) Image topographique ($8 \times 8\mu\text{m}^2$). (b), (c) Images optiques correspondantes.

gamme de longueur d'onde 700-900nm (voir Fig.IV.10). Les images montrent des différences de comportement selon la longueur d'onde déjà montrées grâce à la figure IV.9. Ces images, réalisées souvent à plusieurs jours d'intervalle, peuvent difficilement se prêter à une comparaison quantitative du fait des variations qui peuvent être dues aux contraintes expérimentales (condition d'injection dans le guide, réglage différent du PM, état d'usure de la pointe diélectrique). On remarque néanmoins sur toutes ces images une forme similaire, mise en évidence par la coupe (colonne de droite) : on observe en entrée de structure un maximum d'intensité lumineuse et un minimum en sortie. La décroissance à l'intérieur de la structure est plus ou moins prononcée, ce qui semble indiquer une pénétration plus ou moins importante de l'onde lumineuse dans la structure périodique. On remarque qu'il est difficile de

déterminer l'existence d'une bande interdite photonique, comme le laissait supposer l'étude spectrale de ces structures (voir la partie 4.1).

Un autre point commun à toutes ces images est l'existence de franges formées avant et dans la structure. Ces franges rappellent celles obtenues lors du calcul FDTD (voir partie 4.2.1) bien que la période mesurée ne corresponde pas. En effet, les périodes, mesurées grâce à la détermination de l'emplacement des pics par transformé de Fourier des images optiques, n'ont pas montré de variation évidente en fonction de la longueur d'onde, ce qui tend à prouver que ces variations dépendent principalement de la période des structures. Ces franges ne sont pas dues à un effet *Fabry-Perrot* qui pourrait être créé par les réflexions de la lumière sur chaque interface entre la structure et le guide. La valeur moyenne est de 209nm (voir Fig. IV.11), ce qui reste néanmoins assez éloignée de la valeur de l'interligne (dans la direction ΓM , l'interligne vaut $i = \frac{a\sqrt{3}}{2} = 311nm$ pour $a = 360nm$). La barre d'incertitude est déterminée par la largeur des pics. Cette incertitude est assez large principalement à cause de la définition de l'image initiale (128×128 pixels, chaque pixel a donc une taille de 40nm). Ce phénomène a pu déjà être observé [141] par une équipe, qui a, comme nous, réalisé des images champ proche de cristaux photoniques à faible contraste d'indice. Contrairement à ce que nous avons pu observé, la période était légèrement supérieure à la période de la structure.

Dans cet article, il était montré que la période de la modulation en intensité observée dans un cristal photonique de taille finie (donnée par $2\pi/q$, q étant une composante de Fourier) dépend à la fois de la période de la matrice ($2\pi/Q$, Q étant le vecteur de maille du réseau réciproque) mais aussi du vecteur d'onde dans le cristal photonique k , dépendant pour sa part de la longueur d'onde, suivant la relation [135, 141] :

$$\{q\} = \{Q \pm 2k\} \quad (\text{IV.1})$$

Cette double dépendance peut apporter une explication au fait que la période des franges ne corresponde pas exactement à la période de la structure périodique. Cependant, cet effet peut être combiné à d'autres influences d'origine expérimentale, comme par exemple les incertitudes sur les valeurs des paramètres de fabrication choisis ou les erreurs d'échelle dues à la calibration du microscope.

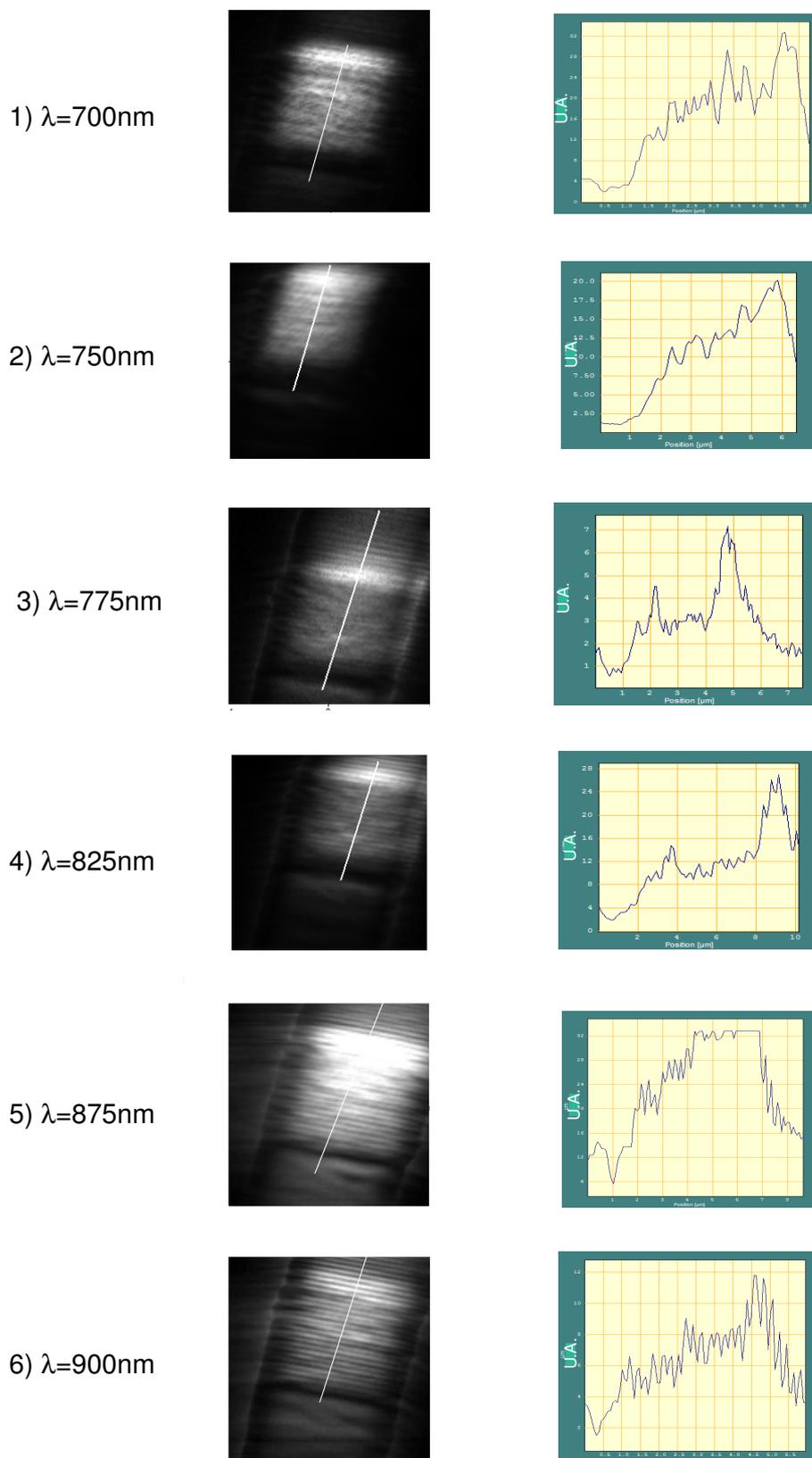


FIG. IV.10 – Image en champ proche optique d'une structure de trous gravée sur un guide d'onde à différentes longueurs d'onde (colonne de gauche) et la coupe correspondante (colonne de droite). Taille des images : (1), (2) et (4) : $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ (3), (5) et (6) : $8 \times 8 \mu\text{m}^2$.

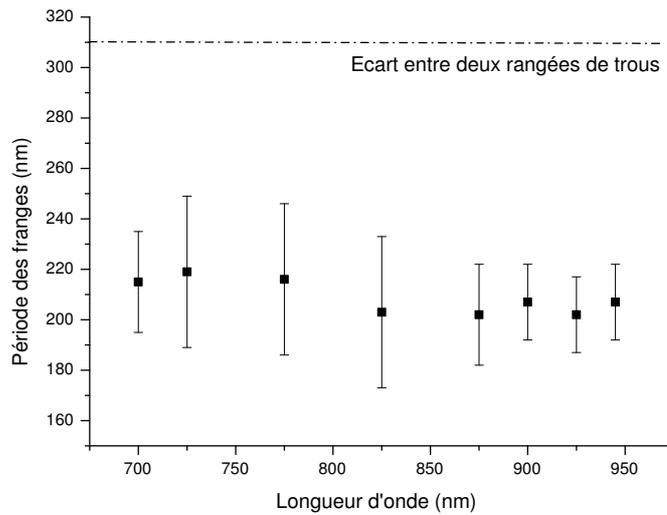


FIG. IV.11 – Période des franges observées à différentes longueurs d'onde. Les valeurs des périodes ont été obtenues en déterminant la position des pics obtenus par la transformation de Fourier des images optiques. La valeur indiquée par la ligne en pointillé (311nm) correspond à l'espacement entre deux lignes de trous successives.

4.2.2 Caractérisation de nanostructures avec une ligne de trous manquante associées à un guide d'onde

Un second type de structures, composé d'une structure de 80×40 trous avec une ligne de trous manquant dans le sens de la propagation de la lumière (correspondant au centre du guide) (voir la Fig. IV.12), déjà étudié théoriquement a aussi été caractérisé. Ce type de structure est proche d'un guide photonique, même si l'injection dans ce type de guide d'onde nécessiterait un *taper* permettant de passer d'un mode se propageant dans un guide d'onde traditionnel à celui se propageant dans un guide photonique dont la taille est 10 fois plus petite en minimisant les pertes. Ici, nous n'avons pas cherché cette optimisation.

Deux caractérisations en champ proche de cette structure sont présentées (voir Fig. IV.13 et IV.14) pour deux longueurs d'onde ($\lambda = 725nm$ et $\lambda = 825nm$).

Les images topographiques (voir Fig. IV.14 (a) et Fig. IV.13 (a)), après un léger traitement permettant de corriger la pente, laissent clairement apparaître la nanostructure. On repère facilement la ligne de trous manquant au milieu du guide.

Comme dans les structures sans défauts, la pénétration et la propagation de la lumière à l'intérieur des nanostructures sont différentes selon la longueur d'onde. L'image optique IV.13 (b) ($\lambda = 725nm$)

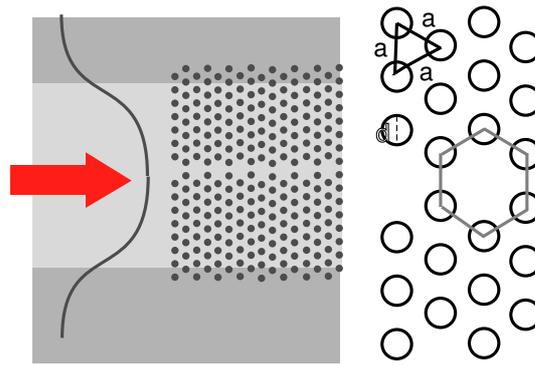


FIG. IV.12 – Détails de la seconde structure caractérisée avec une ligne de trous manquantes. Détail de la maille triangulaire de trous.

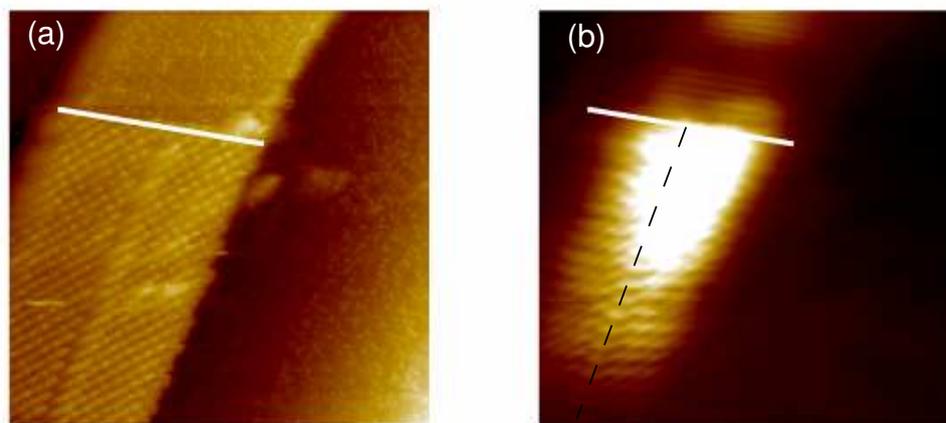


FIG. IV.13 – Caractérisation en champ proche d'une structure de trous gravée avec une ligne de trous manquante en son centre sur un guide d'onde à $\lambda = 725nm$. (a) Image topographique ($10 \times 10\mu m^2$). (b) Image optique correspondante.

montre de fortes pertes hors du plan dès l'entrée de la lumière dans la structure jusque dans le centre de la structure. Ces fuites permettent de conclure à une pénétration importante de la lumière dans la structure. Plus bas, nous voyons apparaître un modelage de la lumière dans la structure. Nous remarquons que cette structuration est centrée par rapport au guide et surtout symétrique autour de la ligne en pointillés indiquant l'emplacement de la lacune.

Les Fig. IV.14(a) et (b) montrent des images topographiques et optiques pour $\lambda = 825nm$. L'image optique montre le modelage de la lumière à l'intérieur de la structure. On observe une ligne de lobes légèrement à gauche de la ligne de trous (représentée sur l'image optique par la ligne en pointillés). On peut observer, notamment sur les premières périodes, quelques lobes à droite de la

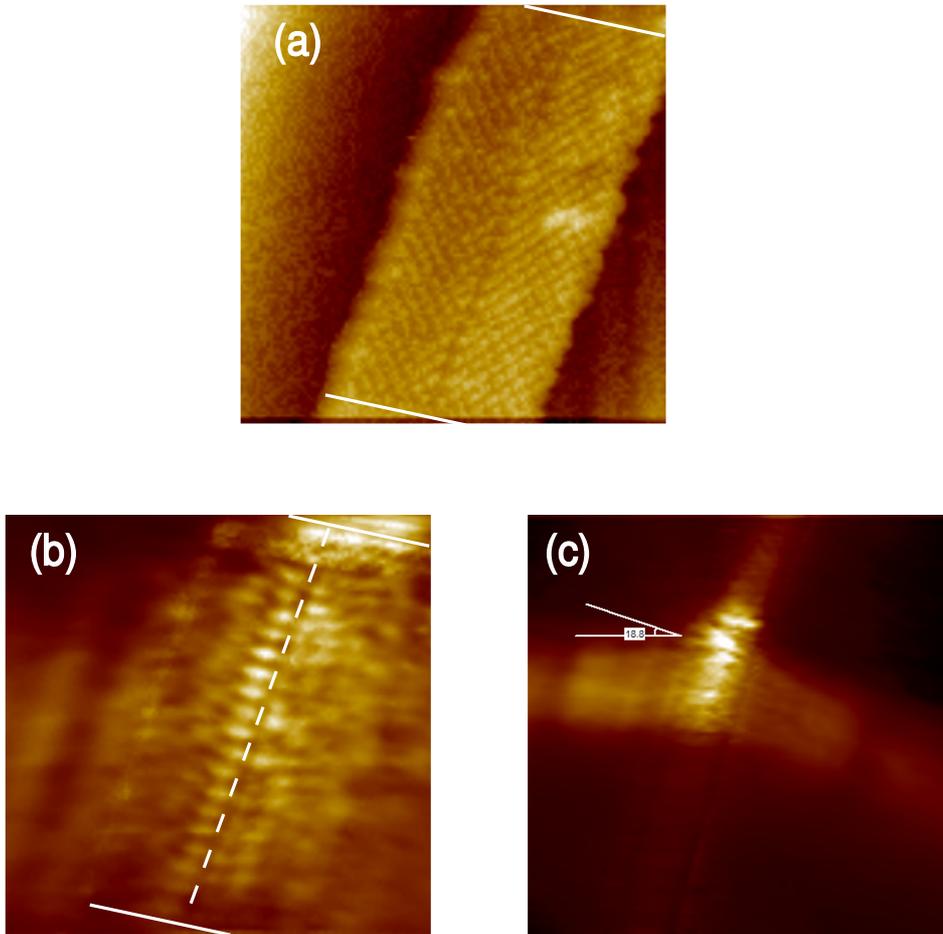


FIG. IV.14 – Caractérisation en champ proche d'une structure de trous gravée avec une ligne de trous manquante en son centre sur un guide d'onde à $\lambda = 825\text{nm}$. (a) Image topographique ($10 \times 10\mu\text{m}^2$). (b) Image optique correspondante. (c) Image optique ($40 \times 40\mu\text{m}^2$). Angle mesuré : $\theta = 18,8^\circ$.

ligne. Des similitudes existent entre cette figure expérimentale et la cartographie du champ obtenue dans la partie 4.2.2 par FDTD. En effet, une chaîne équivalente de lobes d'intensité avait été obtenue, bien que celle-ci était localisée dans la ligne de lacune. La période de cette modulation a été mesurée proche de 600nm , ce qui correspond à l'écart qu'il existe entre deux lignes de trous, c'est-à-dire à la distance séparant deux cavités.

On observe aussi sur une image élargie (Fig. IV.14(c)) des fuites s'étendant sur une distance assez importante (de l'ordre de $15\mu\text{m}$) sur les côtés du guide. L'angle formé par ces ailes fait un angle de $18,8^\circ$ par rapport à la normale au guide. Cet effet est assez difficile à expliquer. Nous l'observons

uniquement dans le cas de longueur d'onde permettant un fort confinement dans la ligne de défauts et n'apparaissent à aucun moment dans le cas des structures sans défauts.

IV.5 DISCUSSION

Les simulations que nous avons effectuées par FDTD ont été réalisées en utilisant un modèle simplifié 2D, c'est-à-dire que nous avons modélisé les trous comme des cylindres d'air de hauteur infinis percés dans un guide d'onde plan. Dans la réalité, le confinement optique dans la troisième direction (celle de l'axe des trous) est obtenu par l'utilisation d'une structure multicouche. Toutefois, lors de la fabrication des nanostructures, les guides d'onde sont perforés, ce qui induit du couplage de l'onde guidé vers les modes radiatifs de la couche supérieure (*cladding*, provoquant ainsi des pertes hors du plan.

De plus, la fabrication directe par FIB, méthode avec laquelle ont été fabriqués les échantillons étudiés dans ce chapitre, a montré quelques limites, notamment quant à la forme des trous et les profondeurs de gravures, qui ont provoqué des cristaux photoniques imparfaits. Des travaux récents [152–155] ont montré les fortes influences que pouvaient avoir de tels défauts sur l'effet de bande interdite photonique et les pertes hors plan. Ces pertes hors plan sont en partie provoquées par l'intégrale de recouvrement entre le profil du mode propagatif dans le guide d'onde permettant l'injection dans la structure et le profil des colonnes d'air de la nanostructure, ainsi que par la non-verticalité des parois des trous.

Le graphe IV.15 montre, à travers la variation du terme de forme ε''_{hole} , facteur correctif de la constante diélectrique utilisé lors de simulation en 2D pour prendre en compte les perturbation dues à la forme et à la profondeur des trous dans un matériau multicouche, l'influence combiné de la profondeur de gravure d et de l'angle d'inclinaison des flancs des trous α [152]. On voit la très forte influence que peut avoir cet angle d'inclinaison sur les pertes. En effet, le graphe montre que pour un angle α supérieur à 1° , les pertes sont aussi importantes que pour un trou de forme conique et que la profondeur de la gravure n'intervient plus directement.

La figure IV.17 représente schématiquement la forme des gravures obtenue lors de la fabrication par FIB. Un calcul simple réalisée à partir de la Fig. IV.16, montrant une image d'une coupe dans une nanostructure réalisée dans les mêmes conditions que celles étudiées dans cette partie, nous permet

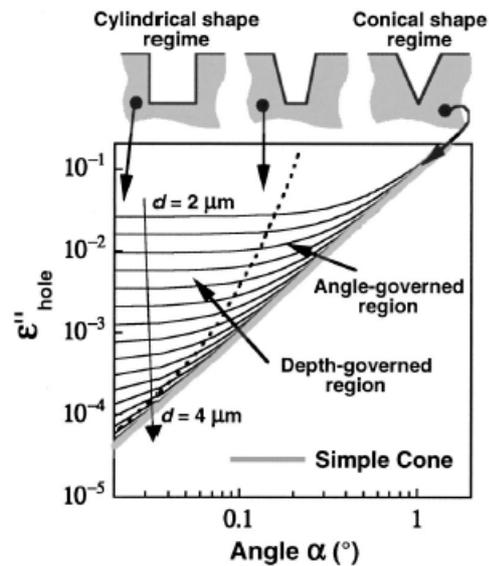


FIG. IV.15 – Influence de l’inclinaison α des flancs et de la profondeur d des trous sur le terme de forme $\varepsilon''_{\text{hole}}$. Graphe tiré de [152]

d’évaluer l’angle d’inclinaison des flancs des trous α à $2,5^\circ$, largement supérieur au 1° présentant le régime conique. C’est la raison principale des pertes hors du plan dans notre structure et expliquer le peu de résultats obtenus lors de l’étude spectrale présentée dans la partie 4.1.

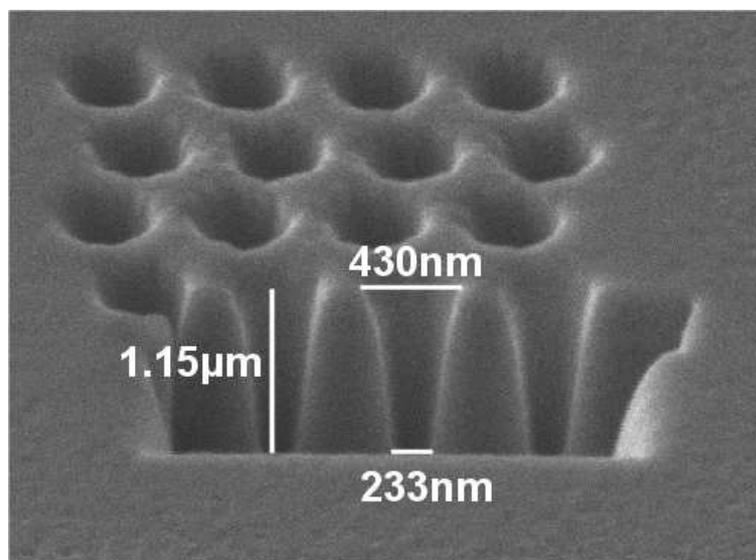
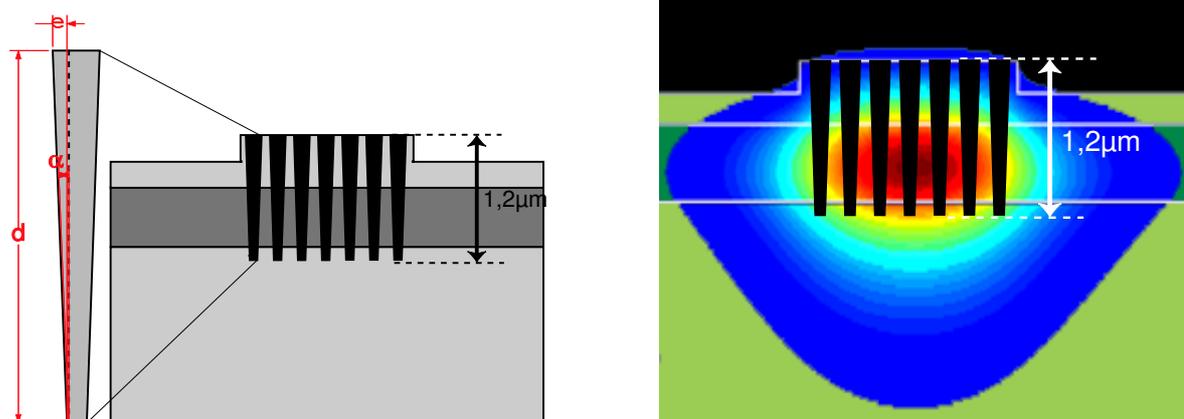


FIG. IV.16 – Image MEB de la coupe d’une structure gravée par FIB (gravure et image réalisée à l’ISIS de Strasbourg par Éloïse Devaux). Les mesures permettent de déterminer l’angle d’inclinaison des flancs des trous.

De plus, nous n’avons pas pu pendant ce travail graver des trous à plus de $1,2\mu\text{m}$, qui nous semblait à premier abord un bon compromis entre la théorie et les contraintes technologiques. Nous



(a) Aspect des trous gravés par FIB, profondeur atteinte. (b) Schéma montrant les différentes couches de matériau, la superposition du mode se propageant dans le guide d'injection et le profil des modes gravés. Selon les données expérimentales, $\alpha \simeq 2,5^\circ$

FIG. IV.17 – Profil et profondeur des trous gravés, comparaison avec le mode injecté.

remarquons que ces trous recouvrent la plus grande partie du profil de mode en intensité ($\sim 80\%$) (voir Fig. IV.17(b)), mais que ce profil s'étend à $3\mu m$ de profondeur. Il est clair que même avec des bords plus verticaux, la profondeur non suffisante des gravures aurait provoqué de pertes importantes dans le matériaux.

IV.6 CONCLUSION

La caractérisation spectrale de transmission n'a pas donné les résultats espérés. Nous n'avons pas pu obtenir les BIP attendues et prévues par les simulations numériques pour ce type de structures. Ces résultats peuvent en partie s'expliquer par le fait que la gravure directe par FIB, méthode que nous avons utilisée pour la fabrication des structures photoniques, ne permet pas actuellement l'obtention de trous assez profonds et avec des flancs assez verticaux. La méthode FIB combinée ensuite à une RIE, proposée dans le chapitre II permettra sans doute de meilleurs facteurs de forme.

Néanmoins, la caractérisation par champ proche optique a montré des effets photoniques intéressants notamment pour la caractérisation des structures avec défauts, où la lumière fortement confinée interdit l'utilisation d'autre moyen de caractérisation. La microscopie champ proche semble être la manière la plus efficace de caractériser *in-situ* les effets photoniques dans des structures sub-microniques.