

Fibre complètement aperiodique à large pitch dopée thulium

Après la validation en transmission, dans le deuxième chapitre, de la capacité de la A-LPF à délocaliser les HOMs en dehors du cœur même pour de très grandes dimensions de cœur ($140\mu\text{m}$ à $\lambda=2\mu\text{m}$), et après l'optimisation de cette structure en tenant compte du chargement thermique, la fabrication et la caractérisation de la première FA-LPF dopée thulium vont être présentées dans ce chapitre. En fin de chapitre, et en perspective à ce travail, une évolution ultérieure d'une FA-LPF passive à très grande aire modale et à polarisation unique à $\lambda=2\mu\text{m}$ va être rapportée.

V.1. Fabrication d'une FA-LPF dopée thulium

Dans le chapitre 3, l'avantage de l'utilisation d'une FA-LPF a été expliqué. Cependant, pour obtenir une performance optimale, un accord parfait d'indice de réfraction entre la gaine dopée passivement et le cœur dopé activement est demandé. Si l'indice du milieu à gain est légèrement supérieur à celui de la gaine, certains modes d'ordre supérieur vont être confinés dans le cœur. Ainsi plus la différence d'indice entre les deux zones sera importante, plus le seuil d'apparition du régime multimode et par conséquent le seuil d'apparition des instabilités modales transverses seront rapidement atteints. Dans la figure 71.a, l'évolution du seuil du régime multimode obtenu au travers de la valeur maximale du chargement thermique toléré (noté Q_{max} comme défini au chapitre n°3) en fonction du contraste d'indice entre le cœur actif et la gaine passive est calculée dans une FA-LPF (pitch fixé à $45\mu\text{m}$ correspondant à une dimension de cœur de $75\mu\text{m}$) à une longueur d'onde de $2\mu\text{m}$. Sur ce graphe on peut voir que la valeur de Q_{max} diminue progressivement et de manière quasi-linéaire avec la différence d'indice Δn . On passe d'une valeur de $Q_{\text{max}} = 152\text{W/m}$ quand une égalité parfaite d'indice est réalisée (cas idéal) à une valeur $Q_{\text{max}} = 0\text{W/m}$ quand le contraste indicelle est de $+1,5 \times 10^{-4}$ (dans ce dernier cas la fibre est multimode dès qu'on la pompe). Comme la performance de la fibre est très sensible à la différence d'indice Δn , la taille maximale du cœur qui peut être fabriquée pour chaque valeur de Δn tout en assurant une propagation quasi-monomode ($\Delta\Gamma > 30\%$) est montrée dans la figure 71.b (on a arbitrairement fait le calcul pour un chargement thermique nul soit $Q = 0\text{W/m}$, autrement dit pour une fibre « froide » *i.e.* non soumise à un rayonnement de pompe). Sur cette courbe on trouve le diamètre du cœur de $75\mu\text{m}$ qui peut être fabriqué pour une différence d'indice de $1,5 \times 10^{-4}$. En outre, si la différence d'indice est de $+0,5 \times 10^{-4}$, une fibre ayant une dimension de cœur de $140\mu\text{m}$ peut être produite.

A cause de la forte dépendance entre la performance d'une FA-LPF et la différence d'indice de réfraction entre le cœur et la gaine, une attention particulière doit être prise en compte sur cet aspect durant la fabrication des matériaux formant les deux milieux. Donc, afin de contrôler très précisément l'indice de réfraction de chaque matériau, on a choisi d'utiliser un cœur avec une concentration en Tm^{3+} et Al^{3+} assez modérée. Dans le chapitre précédent, une composition de $0,3\text{mol}\%$ de Tm_2O_3 et $3\text{mol}\%$ d' Al_2O_3 a permis d'observer une efficacité de 43% , une valeur qui dépasse légèrement la limite de Stokes (Fib1). Nous avons donc retenu cette composition pour former le milieu à gain de la fibre FA-LPF à fabriquer car elle représente un équilibre entre une composition efficace et une composition dont l'indice de réfraction n'est pas trop difficile à contrôler. Ensuite, un matériau composé de silice dopée aluminium (avec une concentration d' Al_2O_3 de $3,95\text{mol}\%$) a été sélectionné pour jouer le rôle du matériau de fond de la gaine microstructurée dopée passivement.

Théoriquement, ces deux matériaux (d'une part silice dopée 0,3mol% Tm_2O_3 et 3mol% Al_2O_3 et d'autre part silice dopée 3,95mol% Al_2O_3) doivent avoir la même valeur d'indice de réfraction.

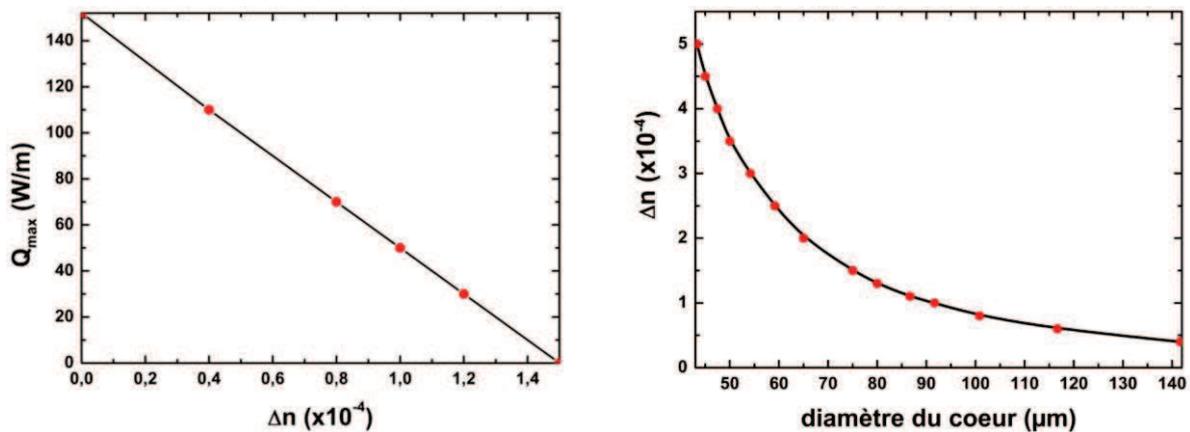


Figure 71 : (a) Calcul de l'évolution du seuil d'apparition du régime multimode dans une FA-LPF ayant un pitch de $45\mu m$ (soit une dimension de cœur de $75\mu m$) en fonction du contraste d'indice de réfraction entre le cœur et la gaine. (b) Calcul de la différence d'indice maximale pouvant être tolérée pour assurer un caractère monomode en fonction de la dimension du cœur de la structure FA-LPF (ces résultats sont obtenus pour un chargement thermique fixé arbitrairement à $0W/m$ correspondant à une fibre « froide »).

Pendant la fabrication du matériau passif, des cristaux ont malheureusement été générés dans la matrice de silice dopée aluminium. La formation de ces cristaux est due à la concentration de l'oxyde d'aluminium dans la matrice silice qui est proche d'une concentration critique connue et fixée à 5mol% pour laquelle un phénomène de séparation de phase est observé. La formation des cristaux est traduite par une variation de diamètre extérieur des cannes passives à l'échelle macroscopique. Afin de minimiser le risque d'avoir des effets de cristallisation dans notre fibre FA-LPF finale, on a essayé d'identifier les cannes ayant la moindre fluctuation en diamètre externe. Une fois cette sélection faite, il s'est avéré que le nombre de cannes passives disponibles n'était pas suffisant pour faire l'assemblage global des cinq couronnes de silice dopée passivement de la structure FA-LPF comme celle proposée dans le troisième chapitre et rappelée dans la figure 72.a. On a alors décidé de modifier la structure initiale de la fibre FA-LPF en diminuant le nombre de ces couronnes jusqu'à trois en proposant la structure FA-LPF à gaine réduite montrée dans la figure 72.b. Dans cette structure, deux couronnes de la gaine passive sont remplacées par des barreaux de silice pure. Dans la nouvelle structure, le milieu à gain est toujours formé par 19 cannes actives, la première gaine optique est formée par trois couches de silice dopée aluminium et la propagation monomode dans la zone de cœur est assurée par l'ajout de 9 inclusions de silice dopée fluor (remplaçant donc 9 cannes de silices dopées passivement), comme le montre la figure 72.b.

J'ai effectué un calcul numérique sur cette structure FA-LPF à gaine réduite et j'ai ainsi pu montrer que dans une fibre froide (correspondant à un chargement thermique $Q = 0W/m$) la délocalisation du mode LP_{11} vers l'extérieur du milieu à gain reste très efficace malgré la réduction de la gaine microstructurée. Cependant, cette structure à gaine réduite est moins performante que la FA-LPF proposée initialement en présence d'un chargement thermique. Par exemple, le seuil d'apparition du régime multimode dans une FA-LPF à gaine réduite ayant un pitch de $45\mu m$ (correspondant à une dimension de cœur de $75\mu m$) à

$\lambda = 2\mu\text{m}$ est de 132W/m au lieu de 152W/m dans le cas d'une FA-LPF « standard ». Nous sommes obligés d'accepter ici cette diminution de 13% du seuil du régime multimode à cause du nombre trop restreint de cannes dopées passivement utilisables. L'assemblage de la structure est montré dans la figure 72.c : les barreaux en rouge représentent le cœur actif, les barreaux en vert représentent la silice dopée fluor, les barreaux en blanc représentent la silice dopée aluminium et les barreaux en bleu représentent des cales en silice pure.

L'assemblage est ensuite étiré en cannes microstructurées. L'image prise au microscope d'une de ces cannes est illustrée dans la figure 72.d. Dans cette figure on peut remarquer que le cœur (formé par 19 hexagones) et la gaine ont une intensité lumineuse légèrement différente. Ceci laisse supposer que le milieu à gain et la gaine passive possèdent un indice de réfraction légèrement différent. Un point important et non prévu à ce stade est que l'on peut aussi observer la présence d'une fine couche séparatrice à l'interface entre certains hexagones du cœur. Cette observation peut être expliquée par une évaporation du chlore à l'extérieur des barreaux actifs (comme on a déjà vu dans le chapitre 2 et dans la figure 27). Mais, cette hypothèse doit être vérifiée afin de comprendre l'origine de cette observation.

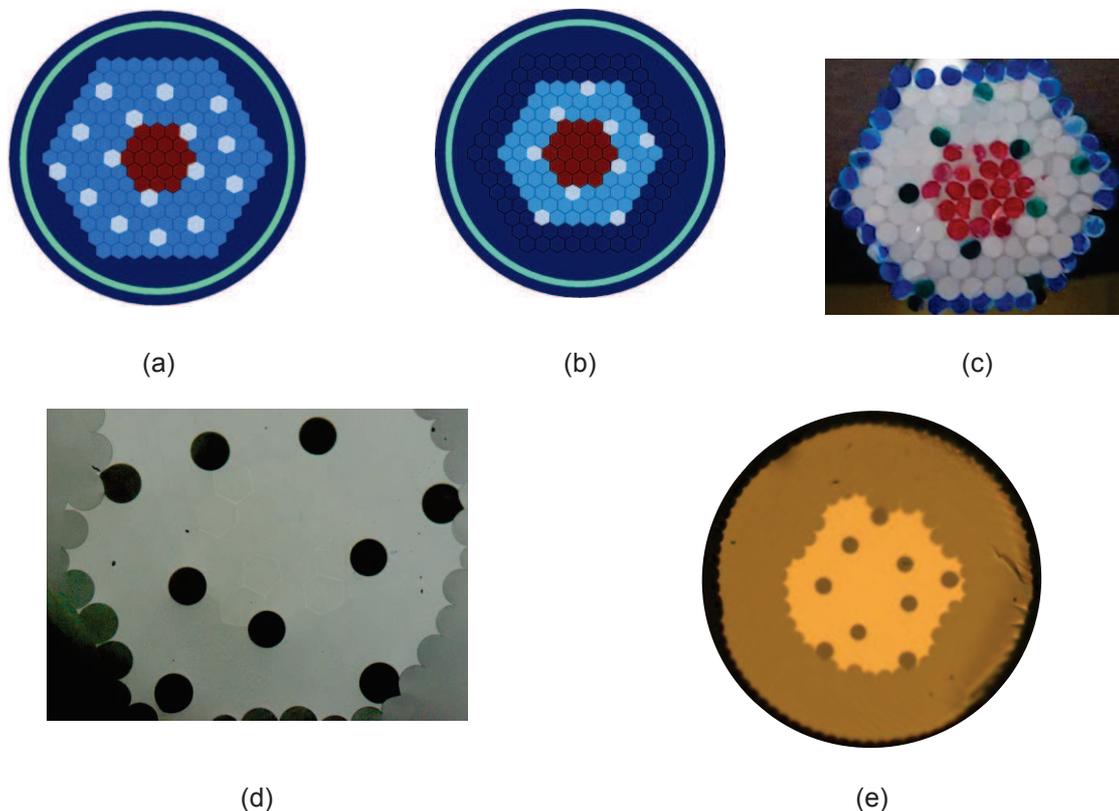


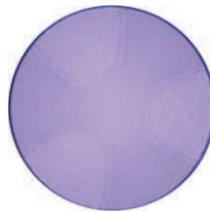
Figure 72 : profil d'indice 2D théorique de (a) la structure FA-LPF et (b) de la structure FA-LPF à gaine réduite proposée en solution alternative. (c) Assemblage de la structure FA-LPF à gaine réduite : la zone rouge représente le milieu à gain, les disques verts représente les inclusions bas-indice de la microstructure, les barreaux blancs sont de la silice dopée aluminium et les disques bleus sont des cales en silice pure. (d) Image prise au microscope de la section transverse d'une canne et (e) image prise au microscope d'une fibre FA-LPF à gaine réduite.

Des fibres FA-LPF à gaine réduite ont malgré tout été étirées après avoir ajouté autour d'une canne microstructurée une gaine d'air. Des fibres avec différentes dimensions

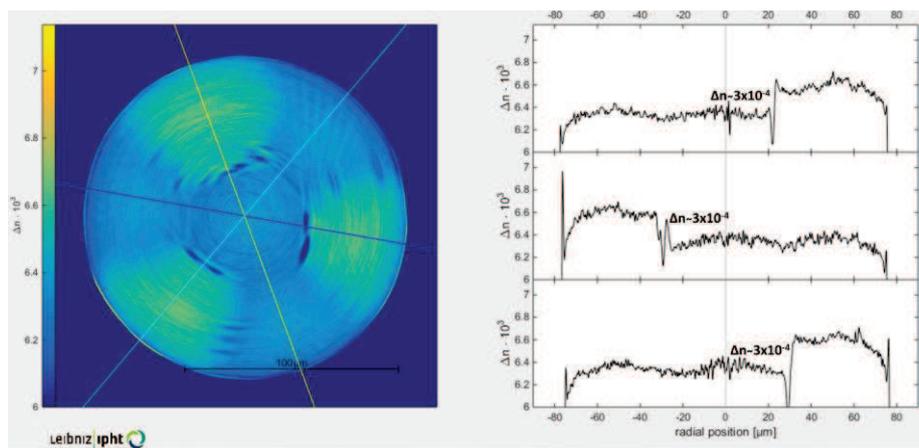
de cœur ont été étirées (le diamètre extérieur dépasse le 1mm). L'image de la section transverse d'une de ces fibres FA-LPF à gaine réduite est montrée dans la figure 72.e.

V.2. Caractérisation de la FA-LPF dopée thulium

Afin d'avoir plus de détails sur les caractéristiques de notre fibre et en particulier sur une possible désadaptation indicielle entre le cœur et le matériau de fond de la gaine microstructurée, une mesure d'indice de réfraction a été réalisée sur une fibre de test représentée dans la figure 73.a. Cette fibre est constituée d'un assemblage de trois barreaux dopés activement et de quatre barreaux dopés passivement : 1 barreau utilisé pour la gaine passive dopée aluminium est entouré d'une couronne de six barreaux (3 barreaux actifs et 3 barreaux utilisés pour la gaine passive, positionnés en alternance). La mesure d'indice est alors effectuée en utilisant l'appareil commercial IFA100 (InterFiber Analysis) permettant d'établir une cartographie transverse 2D de l'évolution de l'indice de réfraction. La mesure de la variation de l'indice de réfraction faite en particulier selon trois axes correspondant à 3 diamètres différents (chacun passant par un des barreaux dopés activement, comme le montre la figure 73.b) donne une différence d'indice entre le matériau actif et le matériau passif de $+3 \times 10^{-4}$ (cf. figure 73.b). Cet excès d'indice en faveur du cœur va alors provoquer une propagation multimode quand la dimension de la zone de gain dépasse $55 \mu\text{m}$ (cf. figure 71.b). Il faut préciser que la valeur réelle de la différence d'indice peut être plus ou moins importante ($\pm 1 \times 10^{-4}$) que la valeur mesurée si l'on tient compte de la sensibilité de l'appareil de mesure.



(a)



(b)

Figure 73 : (a) image de la section transverse de la fibre de test fabriquée, constituée de 3 barreaux actifs et de 4 barreaux passifs. (b) Résultat de la mesure de la cartographie d'indice de la section transverse de la fibre sous test obtenue avec l'appareil commercial IFA100 (InterFiber Analysis). Un excès d'indice de réfraction dans le cœur de 3×10^{-4} a été observé suivant les trois axes de mesure.

On a caractérisé dans un premier temps une fibre FA-LPF à gaine réduite présentant une dimension de cœur valant $80\mu\text{m}$. On a étudié la transmission de rayonnements lumineux provenant soit d'une source large bande supercontinuum ($400\text{nm} < \lambda < 1750\text{nm}$), soit d'une source laser émettant un rayonnement à $\lambda = 2\mu\text{m}$. Les distributions d'intensité mesurées en champ proche obtenues à la sortie d'une fibre ayant une longueur de 86cm sont montrées dans la figure 74.(a) et 74.(b). Dans les deux figures, la lumière est guidée dans le cœur notamment grâce au faible excès d'indice de réfraction présent dans la zone active. Par contre, on peut observer que la distribution d'intensité dans les deux cas est un peu étrange et que le mode fondamental ne peut pas être excité (il n'est jamais observé). Si on regarde plus en détails la distribution de l'intensité dans le cœur, on constate que des zones de la région active apparaissent comme des guides secondaires isolés. Ceci s'explique par la présence des fines couches ayant un indice de réfraction plus faible autour des barreaux actifs constituant le cœur (cf. figure 72.b). L'épaisseur de ces fines couches devient toutefois « invisible » pour des longueurs d'onde proches de $2\mu\text{m}$ quand la dimension du cœur est inférieure à $40\mu\text{m}$. Cette valeur a été calculée en supposant que le cœur devient homogène pour cette gamme de longueur d'onde quand l'épaisseur de ces couches devient inférieure à $\lambda/10$.



Figure 74 : Distribution d'intensité en mesurée en champ proche à la sortie d'une fibre FA-LPF à gaine réduite ayant un cœur de $80\mu\text{m}$ en utilisant une source (a) supercontinuum et (b) à $2\mu\text{m}$.

En se basant sur ce résultat, plusieurs FA-LPF à gaine réduite ont été caractérisées. Les dimensions géométriques des fibres disponibles sont résumées dans le tableau ci-dessous (le diamètre extérieur est supérieur à 1mm dans chacun des cas).

Tableau 5 : FA-LPF dopées thulium tirées

| <i>Dimension du cœur</i> | <i>$29\mu\text{m}$</i> | <i>$40\mu\text{m}$</i> | <i>$48\mu\text{m}$</i> |
|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| <i>Dimension interne de la gaine d'air</i> | <i>$100\mu\text{m}$</i> | <i>$150\mu\text{m}$</i> | <i>$200\mu\text{m}$</i> |
| <i>Valeur calculée du MFD @ $\lambda = 2\mu\text{m}$</i> | <i>$28\mu\text{m}$</i> | <i>$35\mu\text{m}$</i> | <i>$39\mu\text{m}$</i> |

Un échantillon de chaque fibre avec une longueur comprise entre 80cm et 90cm a été testé en configuration laser en utilisant le montage expérimental montré dans la figure 75. Dans ce montage une diode de pompe émettant à $\lambda = 793\text{nm}$ une puissance optique de 100W a été utilisée. Cette diode a une sortie fibrée avec un cœur de $200\mu\text{m}$ et une ouverture numérique de $0,22$. Ensuite, deux lentilles asphériques traitées de manière à avoir un minimum de pertes à la longueur d'onde de pompe ont été utilisées pour injecter le

rayonnement de pompe dans la fibre. La distance focale de la lentille utilisée pour collimater le faisceau de pompe est de 17mm. Par contre, une lentille avec une distance focale de 8,5mm a été utilisée pour focaliser le faisceau dans la gaine de la fibre. Il faut préciser qu'un système de refroidissement a été utilisé pour maintenir la température du support de la fibre à 15°C. Ensuite, la montée en puissance laser, le spectre émis et la qualité modale du faisceau émis ont été mesurés en utilisant un puissance-mètre, un OSA, une caméra pyro-électrique pour visualiser la distribution d'intensité (en ajoutant une lentille de 300mm de distance focale afin de limiter la divergence du faisceau) et une caméra InGaAs étendue qui nous permet de réaliser une mesure de M^2 (en utilisant une lentille de focalisation de 500mm de distance focale).

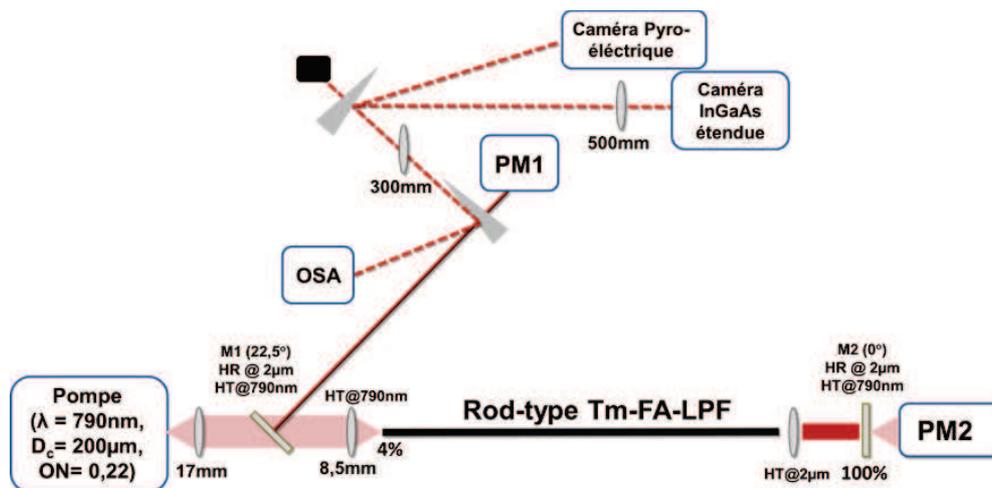


Figure 75 : Représentation schématique du montage expérimental utilisé pour caractériser la FA-LPF dopée thulium. M1 et M2 sont deux miroirs dichroïques complètement réfléchissants à 2 μ m et complètement transparents à 790nm. PM1 et PM2 sont deux puissance-mètres, et OSA un analyseur de spectre optique

A titre d'exemple, le spectre émis en sortie de la cavité laser basée sur la fibre FA-LPF de 40 μ m de dimension de cœur ($L = 88$ cm) est montré sur la figure 76. Dans cette figure, plusieurs pics lasers ont été obtenus entre 1920nm et 1950nm. Cette émission multi-pics est obtenue parce qu'aucun élément de filtrage spectral n'a été introduit dans la cavité laser.

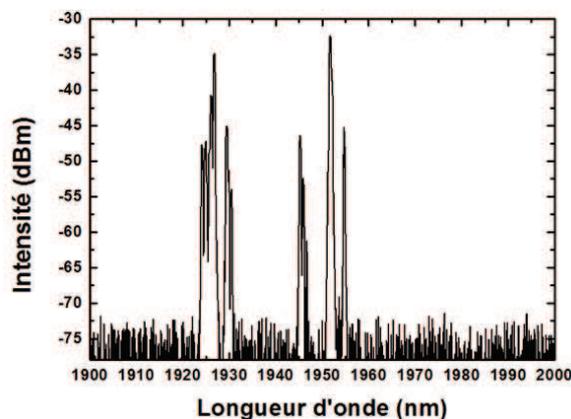


Figure 76 : spectre mesuré en sortie du laser construit avec la fibre FA-LPF dopée thulium ayant une dimension de cœur égale à 40 μ m ($L = 88$ cm).

Les résultats obtenus au cours de la montée en puissance dans la fibre ayant un diamètre de cœur de $29\mu\text{m}$ (MFD de $28\mu\text{m}$) sont montrés dans la figure 77. Avec cette fibre, une puissance laser émise maximale de 15W est atteinte, conduisant à un rendement de 18% (en tenant compte des pertes de la lentille d'injection à $2\mu\text{m}$). La puissance maximale extraite est limitée ici par la puissance de la diode de pompe disponible. Il faut noter que cette valeur a été calculée en supposant qu'on injecte 100% de la puissance de pompe dans la gaine optique. Or ce n'est pas en pratique le cas, surtout en considérant la taille de la gaine utilisée ici qui est trop petite pour collecter toute la puissance de pompe avec le jeu de lentilles disponible. L'efficacité et la puissance maximale émise doivent donc théoriquement augmenter pour des diamètres de gaine supérieurs.

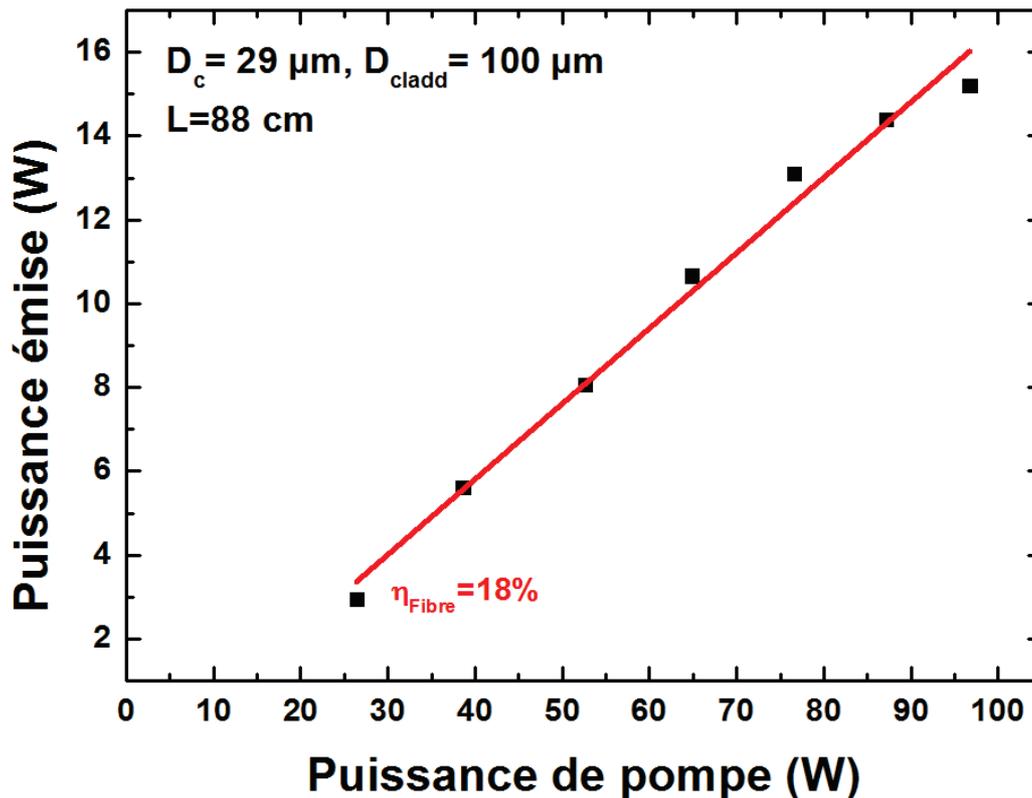


Figure 77 : Evolution de la puissance laser émise en fonction de la puissance de pompe dans un tronçon de 88cm de la fibre complètement apériodique à gaine réduite ayant une dimension de cœur de $29\mu\text{m}$ et une dimension de gaine d'air interne de $100\mu\text{m}$.

La figure 78 illustre les résultats obtenus avec une autre fibre ayant cette fois-ci un diamètre de cœur de $40\mu\text{m}$ (MFD calculé valant $35\mu\text{m}$ pour $\lambda = 2\mu\text{m}$) et un diamètre interne pour la gaine d'air de $150\mu\text{m}$. Avec cette fibre, une puissance signal émise maximale de 25W est obtenue avec une efficacité de 31% . Ce résultat montre que la faible valeur d'efficacité obtenue précédemment est seulement due aux conditions d'injection. Sur la même figure, les distributions d'intensité observées pour plusieurs puissance signal extraite ($12,5\text{W}$, 15W , 18W , 22W et 25W) sont aussi montrées. Sur ces images, la distribution d'intensité des modes est quasi-gaussienne avec une intensité maximale au centre du cœur.

Afin de vérifier la qualité modale de cette fibre, une mesure de M^2 a été réalisée avec une caméra InGaAs étendue. La mesure effectuée pour une puissance signal de $12,5\text{W}$ est montrée dans la figure 79. Cette mesure donne une valeur moyenne de M^2 de $1,45$ sur les deux axes x et y .



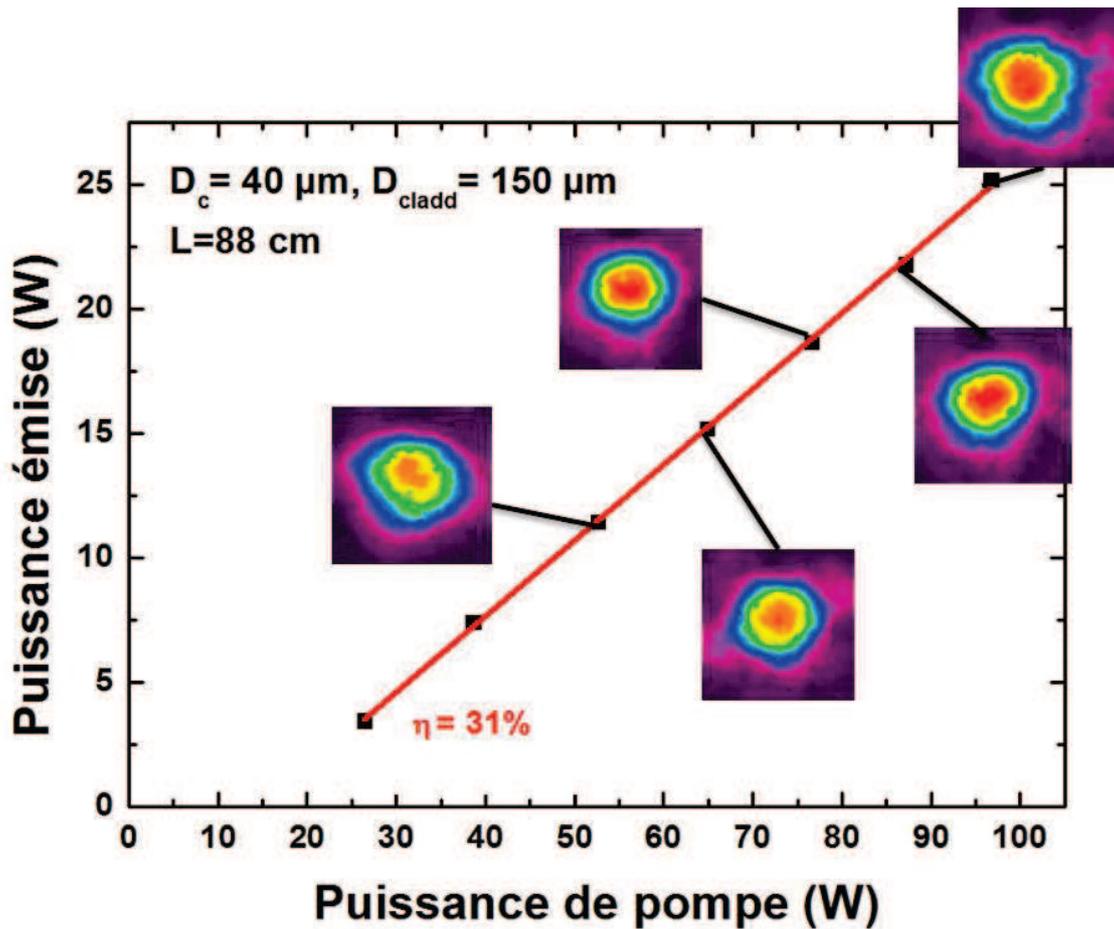


Figure 78 : Evolution de la puissance laser émise en fonction de la puissance de pompe dans un tronçon de 88cm de la fibre complètement apériodique à gaine réduite ayant une dimension de cœur de 40 μm et une gaine interne de 150 μm . La distribution d'intensité du faisceau émis observée pour cinq puissances extraites différentes est aussi ajoutée.

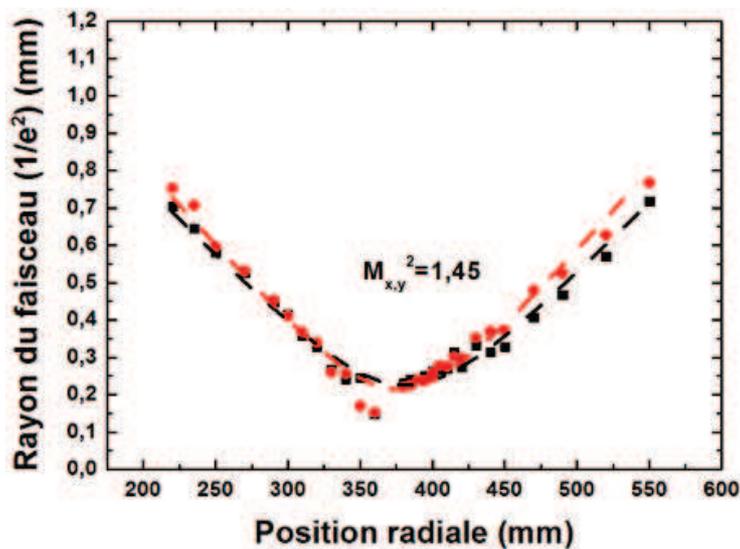


Figure 79 : Mesure du paramètre M^2 effectuée pour une puissance laser extraite de 12,5W en sortie de la fibre avec 40 μm de diamètre de cœur.

Afin de tendre vers la mesure de l'efficacité réelle de la fibre en cherchant à augmenter le pourcentage de la puissance injectée dans la gaine d'air, j'ai également testé une fibre avec un cœur de $48\mu\text{m}$ (MFD de $39\mu\text{m}$) et un diamètre interne de gaine d'air de $200\mu\text{m}$. Avec cette fibre, une puissance laser émise autour de 30W est obtenue et l'efficacité est augmentée jusqu'à atteindre $36,5\%$. Ces résultats sont montrés dans la figure 80. D'après ces résultats, on peut conclure que si on augmente encore plus la dimension interne de la gaine d'air, la valeur d'efficacité de 43% montrée dans le chapitre 4 doit être retrouvée.

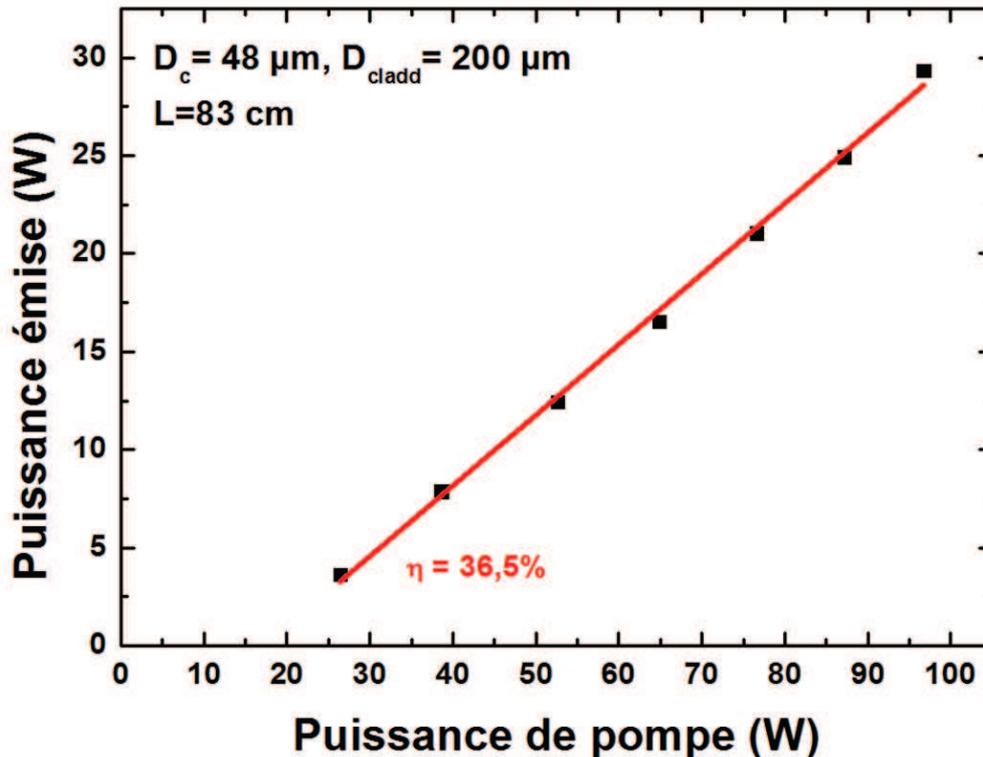


Figure 80 : Evolution de la puissance laser émise en fonction de la puissance de pompe dans un tronçon de 83cm de la fibre complètement apériodique à gaine réduite ayant une dimension de cœur de $48\mu\text{m}$ et une dimension interne de la gaine d'air de $200\mu\text{m}$.

V.3. FA-LPF passive à polarisation unique

Le contrôle de l'état de polarisation dans certaines des applications mentionnées dans le premier chapitre, surtout pour la conversion de fréquence, est indispensable. Dans les fibres à saut d'indice, l'état de polarisation est contrôlé en créant une biréfringence au sein de la fibre. Par exemple, dans les fibres dites « panda », l'ajout de deux plots de silice dopée bore dans la gaine optique crée une variation d'indice de réfraction dans la structure due au stress généré grâce à la différence de coefficients d'expansion thermique entre la silice et le bore. Cette variation d'indice crée une différence d'indice effectif entre les deux axes de polarisation, et par conséquent les deux états de polarisation du mode fondamental vont être propagés avec deux vitesses différentes. L'état de polarisation du mode fondamental dont le vecteur champ électrique est parallèle à l'axe des plots va avoir l'indice effectif le plus grand, parce que le stress induit sur cet axe est le plus important. Cet axe sera ainsi l'axe lent et l'axe perpendiculaire sera l'axe rapide. Ces fibres sont dites à maintien de polarisation (PM) : quand une lumière linéairement polarisée est injectée suivant un de ces axes, l'état et l'angle de polarisation vont être conservés durant la propagation.

De plus, une lumière linéairement polarisée peut être obtenue en utilisant des fibres appelées des fibres à polarisation unique (PZ). Ces fibres sont en général microstructurées. Par exemple, dans les fibres microstructurées PCF air-silice, l'indice du matériau constituant le fond de la gaine optique est souvent égal à celui du cœur. En ajoutant des inclusions de bore dans la structure on va rapprocher l'indice effectif de l'état de polarisation du mode fondamental perpendiculaire à l'axe des plots ($LP_{01,y}$) des indices effectifs de certains modes de gaine. La combinaison de la variation d'indice de réfraction avec la courbure va alors permettre un couplage entre le mode $LP_{01,y}$ et un mode de gaine. Dans ce cas, l'état de polarisation du mode fondamental ayant un vecteur champ électrique parallèle à l'axe des plots de stress peut être guidé tandis que l'énergie du mode fondamental couplé avec un mode de gaine va être perdue dans la gaine. Grâce à ce couplage modal, une lumière linéairement polarisée peut être obtenue à la sortie de la fibre microstructurée à partir d'une lumière injectée non polarisée. Le degré de polarisation de ces fibres est calculé (en dB) en faisant la différence entre les puissances optiques mesurées à la sortie du cœur de la fibre portées suivant les deux axes de polarisation. En utilisant cette approche, une PCF dopée thulium à polarisation unique avec un cœur de $50\mu\text{m}$ (MFD de $36\mu\text{m}$, MFA $\sim 1000\mu\text{m}^2$) et un PER de 15dB a été montrée dans [Modsching11]. Pour obtenir l'émission d'une polarisation unique, cette fibre a été courbée avec un rayon de 20cm.

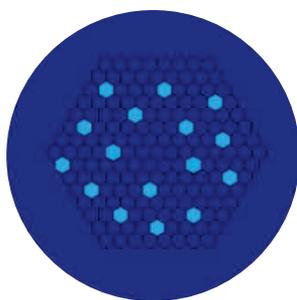
Afin d'introduire cette propriété de polarisation unique dans notre architecture FA-LPF qui elle ne peut être courbée (notre architecture est en effet une fibre rod-type), nous devons donc provoquer un couplage entre un des deux états de polarisation du mode fondamental et un mode de gaine sans l'application d'une courbure à la fibre, afin de garder la propagation d'un seul état de polarisation du FM. La structure complètement aperiodique passive (fig. 81.a) a été optimisée en ajoutant six inclusions dopées bore (représentées en jaune dans la fig. 81.b). La présence de ces inclusions va créer du stress dans la structure, dû à la différence de coefficients thermiques entre la silice pure et la silice dopée bore. Deux inclusions de stress (SAP) ont été placées derrière des inclusions bas-indice (fait de silice dopée fluor) de la microstructure de la gaine pour éviter la déformation du mode fondamental à cause du stress. De plus, quatre SAP ont été placées dans la gaine en remplacement de quatre inclusions bas-indice appartenant à la microstructure de la gaine afin de modifier fortement l'indice effectif des modes de gaine. La distribution du stress généré dans la structure est représentée dans la figure 81.c. L'intensité du stress est plus élevée autour des SAP et devient de moins en moins forte en se rapprochant du centre du cœur de la fibre. Ce stress va modifier l'indice de réfraction de la structure et par conséquent les indices effectifs des modes. Il apparaît que l'indice effectif de l'état de polarisation du FM ayant un vecteur champ électrique parallèle à l'axe du stress ($LP_{01,x}$) se retrouve légèrement augmenté. De plus il s'avère que certains modes de gaine ayant une étendue géométrique sur l'ensemble de la structure voient également leurs indices effectifs légèrement augmenter. Quand les indices effectifs du mode $LP_{01,y}$ et d'un mode de gaine deviennent égaux, et en profitant du recouvrement spatial non nul des champs électriques de ces deux modes, un couplage sélectif entre eux s'opère. Sous cette condition, seulement le mode $LP_{01,x}$ reste guidé dans le cœur (cf. fig. 81.d) et le mode $LP_{01,y}$ fuit dans la gaine (cf. fig. 81.e) sans avoir besoin de courber la fibre. Rappelons que cela est possible dans le cas de notre architecture parce que les indices effectifs du FM et des HOMs sont très proches. Ces résultats sont obtenus dans notre étude avec un cœur de $140\mu\text{m}$ et à une longueur d'onde de $2\mu\text{m}$. Les différents paramètres utilisés dans le calcul du stress sont résumés dans le tableau 6.



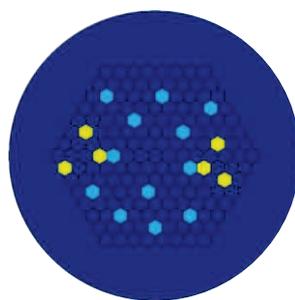
Tableau 6 : paramètres utilisés dans le calcul du stress

| Paramètres | Silice pure | Silice dopée fluor | Silice dopée bore |
|---------------------------------------------|----------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| Module de Young, Pa | 72×10^9 | | $67,44 \times 10^9$ |
| Coefficient de Poisson | 0,17 | | 0,1827 |
| Coefficient d'expansion thermique, K^{-1} | $5,5 \times 10^{-7}$ | | $25,75 \times 10^{-7}$ |
| Température ambiante, K | 293,15 | | |
| Température de fusion, K | 1273,15 | | |
| Indice de réfraction | n_{si} | $n_{si} - 3,16 \times 10^{-3}$ | $n_{si} - 9,5 \times 10^{-3}$ |

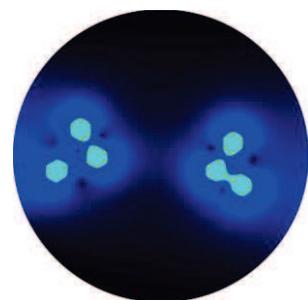
L'efficacité du couplage modal évoqué ci-dessus, donc le degré de polarisation de la structure, dépend fortement de la différence d'indice entre le cœur et la gaine. Un excès d'indice dans le cœur au moment de l'étape de fabrication va rendre le couplage moins efficace, parce que l'indice effectif du mode $LP_{01,y}$ devient beaucoup plus élevé que celui des modes de gaine (il devient difficile de les égaliser sans avoir besoin de courber la fibre). Le but étant dans un premier temps de valider expérimentalement ce concept de fibre PZ FA-LPF, il nous faut donc éviter la perturbation de nos résultats par un possible désaccord indiciel entre el cœur et le matériau constituant le fond de la gaine. Afin de satisfaire cet objectif, des fibres passives à polarisation unique (PZ FA-LPF) ont été fabriquées. Des cannes en silice pure ont été utilisées pour former le matériau de fond (gaine et cœur), ensuite des cannes en silice dopée fluor sont ajoutées pour créer la microstructure et délocaliser les modes d'ordre supérieur. Enfin, six inclusions de silice dopée bore sont utilisées pour appliquer du stress dans la structure et ainsi discriminer les deux états de polarisation du mode fondamental. Les fibres sont étirées avec des diamètres de cœur compris entre 60 et 140 μm (diamètre extérieur compris entre 1 et 3mm). Les valeurs de MFA calculées à 2 μm pour des cœurs de 60 et 140 μm sont 3637 et 14590 μm^2 respectivement.



(a)



(b)



(c)

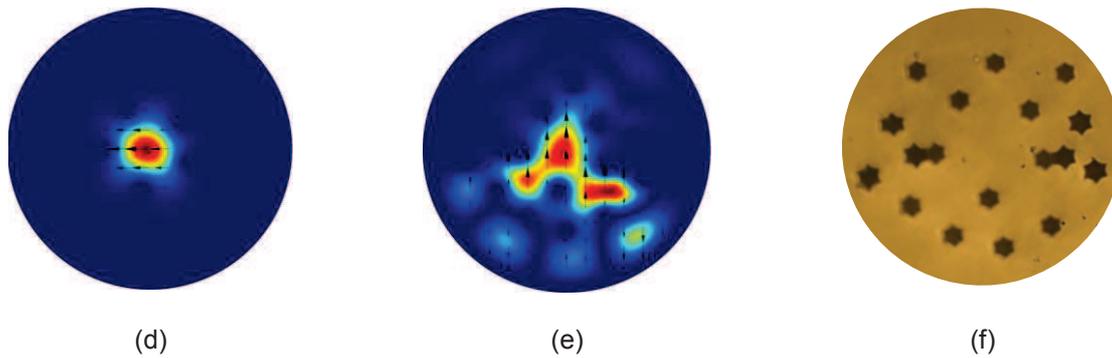


Figure 81 : (a) structure modélisée d'une FA-LPF passive (le bleu foncé représente la silice pure et le bleu clair représente la silice dopée fluor), (b) structure modélisée d'une PZ FA-LPF passive (les inclusions de stress, faites en silice dopée bore, sont représentées en jaune), (c) distribution du stress dans une PZ FA-LPF passive, (d) distribution d'intensité de l'état de polarisation du mode fondamental guidé dans le cœur, (e) distribution d'intensité de l'état de polarisation du mode fondamental couplé. Les résultats montrés dans les figures (d) et (e) sont obtenus avec un cœur de $140\mu\text{m}$ et à une longueur d'onde de $2\mu\text{m}$. De plus, les flèches en noir représentent la direction du vecteur champ électrique. (f) image prise au microscope d'une PZ FA-LPF passive fabriquée. Plusieurs tronçons de fibre ont été étirés avec des diamètres de cœur différents compris entre 60 et $140\mu\text{m}$ (diamètres extérieurs compris entre 1 et 3mm).

Pour caractériser les fibres PZ FA-LPF passives, j'ai monté le banc expérimental schématisé dans la figure 82. Dans ce montage, une diode de pompe à 790nm a été utilisée avec une fibre LMA dopée thulium (MFD de $21\mu\text{m}$) pour générer un faisceau laser non polarisé autour de $2\mu\text{m}$. Ici un réseau de Bragg totalement réfléchissant autour de 1942nm a été inscrit dans la fibre LMA dopée thulium afin de former le miroir de fond de cavité. L'autre extrémité libre de la fibre est clivée en angle droit pour former le coupleur de sortie. Ensuite, un miroir dichroïque qui réfléchit des rayonnements à $2\mu\text{m}$ a été utilisé pour dévier le faisceau laser vers deux miroirs (revêtement or) qui permettent de contrôler l'injection du faisceau laser dans la fibre PZ FA-LPF passive sous test. Le faisceau laser de longueur d'onde 1942nm est injecté dans la fibre sous test à travers une lentille d'injection L_i . La distance focale image de L_i a été choisie afin d'être adaptée à la taille du cœur de la fibre PZ sous test (25mm et 50mm pour injecter dans un cœur de 60 et $140\mu\text{m}$ respectivement). La longueur de fibre sous test est de 45cm et ce quel que soit le diamètre du cœur choisi. De plus, un polariseur tournant a été ajouté afin d'analyser l'état de polarisation du faisceau émis en sortie de la fibre sous test. Ce faisceau laser est également envoyé sur une caméra pyroélectrique afin d'observer la distribution d'intensité du mode guidé dans la fibre sous test et vers un analyseur de spectre optique (OSA) pour mesurer la puissance optique en sortie de la fibre sous test (on utilise ici la très grande dynamique de mesure de l'OSA).

Le spectre du faisceau émis par la fibre dopée thulium est montré dans la figure 83. Dans cette image on peut voir qu'on a un large spectre d'ASE (émission spontanée amplifiée) qui s'étale de 1800 jusqu'à 2040nm avec un seul pic centré à 1942nm . La différence d'intensité entre le pic et l'ASE est supérieure à 37dB et la largeur spectrale du pic est inférieure à $0,5\text{nm}$ (mesurée à -3dB). De plus, une image de la distribution d'intensité mesurée en champ proche du faisceau à l'entrée de la fibre PZ FA-LPF passive est mise en insert dans la figure 83. Il faut préciser qu'aucun élément polarisant n'a été ajouté au montage en amont de la fibre sous test et que la lumière injectée dans la fibre sous test n'est



pas polarisée. De plus, le PER du montage expérimental sans la présence de la fibre sous test PZ FA-LPF (TDF+ miroir dichroïque + deux miroirs en or) est inférieur à 3dB.

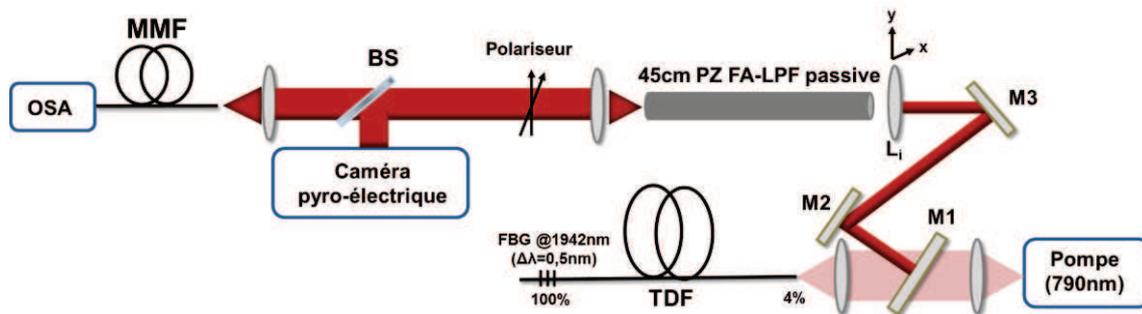


Figure 82 : Représentation schématique du montage expérimental utilisé pour tester les fibres FA-LPF passives à polarisation unique. TDF est une fibre dopée thulium. FBG est un réseau de Bragg réfléchissant à 1942nm avec une largeur spectrale de 0,5nm (mesuré à -3dB). M1 est un miroir dichroïque complètement réfléchissant à 2 μ m et transparent à 790nm. M2 et M3 sont deux miroirs ayant un revêtement en or. L_i est la lentille d'injection dans la PZ FA-LPF. BS est une lame séparatrice, MMF est une fibre de collection multimode et OSA est un analyseur du spectre optique.

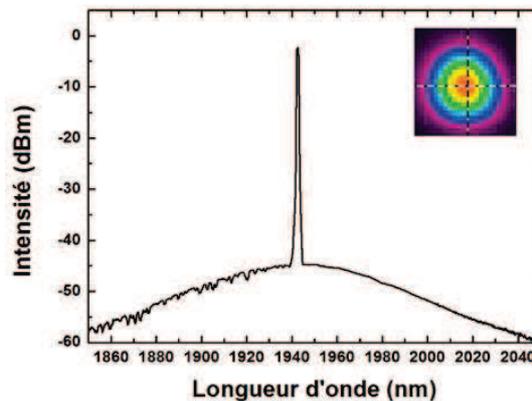


Figure 83 : Spectre du faisceau laser mesuré à l'entrée de la fibre PZ FA-LPF passive. Le pic est centré à 1942nm avec une largeur spectrale de 0,5nm. En insert, la distribution d'intensité mesurée en champ proche du faisceau à l'entrée de la fibre sous test.

Le premier test à faire était de vérifier si la propagation dans la fibre PZ FA-LPF passive est monomode ou pas. Dans ce but, la lentille d'injection L_i a été translatée dans un plan transverse suivant les axes x et y comme indiqué sur la figure 82. Les résultats obtenus avec une fibre ayant un diamètre de cœur proche de 140 μ m sont illustrés dans la figure 84. Dans cette figure, on peut voir que la distribution d'intensité du mode observé en sortie de la fibre sous test a une valeur maximale au centre du cœur (position 0 μ m dans la figure 84). Ensuite, en changeant la position de la lentille L_i par translation (selon l'axe x , puis selon l'axe y), l'intensité du mode guidé dans la fibre sous test décroît au fur et à mesure qu'on éloigne la lentille de sa position initiale jusqu'à ce que le mode fondamental disparaisse (au-delà d'une distance égale au rayon du cœur i.e. 70 μ m). On peut remarquer qu'en bougeant L_i aucun mode d'ordre supérieur n'apparaît et seul le mode fondamental est guidé dans le cœur. Donc, les fibres PZ FA-LPF passives fabriquées ici gardent une très bonne capacité à délocaliser les modes d'ordre supérieur en dehors du cœur. Cependant, le mode fondamental a une forme un peu allongée à cause de l'utilisation des inclusions de stress.

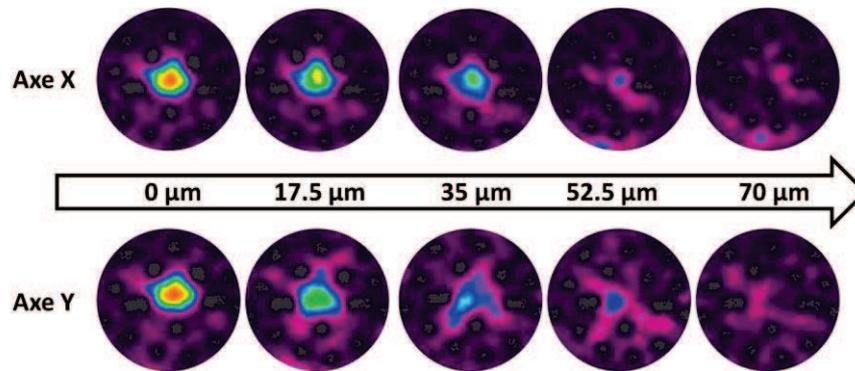


Figure 84 : Evolution de la distribution d'intensité observée en champ proche, à la sortie du cœur d'une PZ FA-LPF passive avec un diamètre de 140μm en translatant la lentille d'injection suivant les axes x et y. La translation, dans les 2 directions, est effectuée sur une distance couvrant 70μm (rayon du cœur de la fibre sous test).

Après, l'état de polarisation de la distribution d'intensité du mode émis en sortie de la fibre sous test a été analysé en tournant le polariseur sur lui-même. Les résultats représentés dans la figure 85 montrent qu'à la sortie des deux fibres exhibant les tailles de cœur de 60μm et 140μm, l'intensité du mode guidé diminue progressivement quand l'angle du polariseur augmente (les images dans la figure 85 sont obtenus pour un pas de rotation de 30°) jusqu'à ce qu'on obtienne une extinction quasi-totale quand le polariseur est tourné de 90° par rapport à sa position initiale. En outre, pour une rotation complète du polariseur (360°), deux maxima et deux minima d'intensité sont observés. Ces résultats montrent qu'un seul état de polarisation linéaire se propage dans ces fibres sous test et que le second n'est pas guidé.

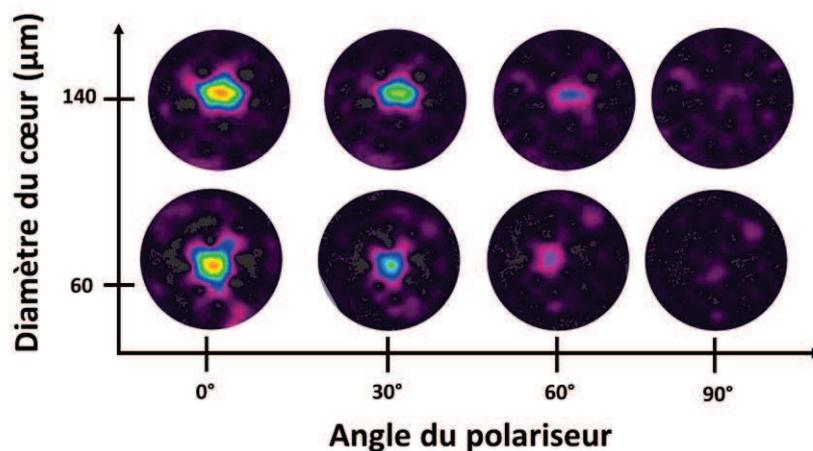


Figure 85 : Evolution de la distribution d'intensité observée en champ proche, à la sortie du cœur d'une PZ FA-LPF passive avec un diamètre de cœur de 60 et de 140μm en fonction de l'angle du polariseur tournant (pas de rotation de 30°). Une extinction totale est observée à 90°.

La dernière étape de caractérisation était la mesure du taux d'extinction des fibres PZ FA-LPF passives. Dans ce but, le rayonnement obtenu à la sortie de ces fibres a été acheminé à l'entrée d'un OSA en utilisant une fibre multimode (MMF). La taille du cœur de la fibre multimode a été choisie en fonction de la taille du cœur de la fibre sous test. Par exemple, pour la fibre PZ de 60μm de cœur, la fibre MMF utilisée est une fibre 50/125 (cœur de 50μm de diamètre). Par contre une fibre MMF 100/125 (100μm de diamètre de cœur) a été utilisée pour collecter le rayonnement à la sortie de la fibre PZ de 140μm du cœur. Le fait

d'adapter le diamètre du cœur de la fibre de collection à celui de la fibre sous test nous permet de ne pas sous-estimer ni surestimer les valeurs de PER de nos fibres PZ. En effet, d'une part, l'utilisation d'une fibre MMF avec un diamètre de cœur beaucoup plus petit que celui de la PZ FA-LPF va donner des valeurs de PER très élevées car dans ce cas on fait une mesure sélective sur le FM et on ne tient pas compte des autres modes d'ordre supérieur susceptibles d'exister dans le cœur de la fibre sous test et dont la distribution d'intensité est plus forte sur l'extérieur du cœur. D'autre part, si la taille du cœur de la fibre MMF est plus grande que celle du cœur de la PZ FA-LPF, une partie du rayonnement qui se propage dans la gaine va également être collecté et la valeur de PER va être de fait plus petite que la valeur réelle. En effet dans nos conditions de mesure, l'interface silice/air représentant la surface externe de la fibre (absence de revêtement polymère ici du fait d'une fibre rod-type) va permettre le confinement de l'intensité présente dans la gaine faite de silice pure. Tous les modes d'ordre supérieur qui sont évacués du cœur ainsi que l'état de polarisation du mode fondamental couplé avec un mode de gaine conduisent ainsi à avoir un rayonnement non nul qui reste guidé dans la gaine durant leur propagation. Donc, pour faire une mesure assez correcte il faut essayer de récupérer la puissance qui sort du cœur uniquement, d'où l'utilisation d'une fibre MMF avec un diamètre de cœur légèrement plus petit que celui de la fibre sous test. Un couple de lentilles de même distance focale image (8mm) a été utilisé pour collimater le faisceau à la sortie de la fibre sous test et pour l'injecter dans la fibre MMF. Avec ces conditions expérimentales, des valeurs de PER (différence de puissance optique mesurée sur l'OSA quand le polariseur est à 0° puis à 90°) de 19,5dB et de 16,5dB sont obtenues avec les fibres PZ FA-LPF ayant des diamètres de cœur de 60 et de 140 μm respectivement. Ce qui montre que les fibres PZ FA-LPF passives offrent une propagation quasi-monomode à polarisation unique pour un diamètre de cœur de 140 μm (MFA de 14590 μm^2) à une longueur d'onde de 1942 μm . De plus, des valeurs de PER de 19,1dB et de 18,8dB ont été mesurées à 1030nm et 1550nm respectivement avec la même structure ayant un cœur de 60 μm [du Jeu17].

V.4. Conclusion

Dans ce chapitre, la première fibre rod-type FA-LPF dopée thulium a été fabriquée. L'architecture de la fibre a été légèrement modifiée (FA-LPF à gaine réduite) afin de tenir compte des matériaux fabriqués mis à disposition. Des contraintes supplémentaires liées à la présence de fines couches parasites, ayant un indice de réfraction plus faible, entourant les cellules élémentaires formant le cœur actif m'ont obligé à m'adapter en limitant les dimensions de cœur exploitable pour conserver une émission quasi-monomode en sortie de fibre. Ainsi une FA-LPF à gaine réduite avec un cœur de 40 μm (MFA calculée valant 961 μm^2 à $\lambda = 2\mu\text{m}$) a pu être caractérisée en configuration laser. Une émission laser autour de $\lambda = 1950\mu\text{m}$ avec une puissance maximale de 25W a été obtenue. L'efficacité de cette fibre est de 31% et la mesure de M^2 donne une valeur de 1,45. Pour augmenter le diamètre du cœur il faut essayer de réduire la différence d'indice de réfraction entre le cœur actif et la silice dopée passivement dans les prochaines fabrications.

Enfin, une évolution supplémentaire pouvant être apportée dans l'architecture de la fibre FA-LPF est l'ajout d'une fonctionnalisation permettant de la rendre PZ (i.e. fibre émettant un faisceau polarisé rectilignement). Cette fonctionnalisation n'a pas été ajoutée au moment de la fabrication de la fibre active de manière à ne pas en complexifier sa fabrication dans un premier temps. Cependant, la démonstration de la faisabilité de cette fonctionnalité a été menée en fabriquant une FA-LPF passive à polarisation unique permettant d'obtenir

une lumière polarisée à la sortie de la fibre à une longueur d'onde de $2\mu\text{m}$. Un taux d'extinction de polarisation de 16,5 dB a été obtenu avec une fibre ayant un cœur de $140\mu\text{m}$ à 1942nm .



Conclusion

L'objet de ma thèse est le développement d'une fibre optique dopée thulium à très large aire modale avec une structure originale qui permet de monter en puissance moyenne et/ou crête, à une longueur d'onde de $2\mu\text{m}$, sans être limité par l'apparition des effets non linéaires et les instabilités modales transverses.

Pour cette raison une structure aperiodique à large pitch (A-LPF) basée sur la rupture de symétrie de la gaine microstructurée a été proposée. Avec cette structure, une propagation quasi-monomode a été obtenue dans une fibre passive ayant un cœur de $140\mu\text{m}$ à $2\mu\text{m}$. Ensuite cette structure a été numériquement optimisée (cf. troisième chapitre) en tenant compte des effets thermiques présents au sein de la fibre à cause des défauts quantiques des ions de terres rares et du photonoirissement. La nouvelle structure, appelée FA-LPF, permet notamment d'avoir le seuil du régime multimode obtenu en présence du chargement thermique qui est 1,9 fois plus grand que le seuil obtenu par la structure LPF standard air-silice (fibre commerciale) qui représente l'état de l'art des fibres à très grandes aires modales. Après, un travail de modélisation prédictive a été mené de manière à proposer d'autres structures basées sur une modulation contrôlée de l'indice de réfraction dans le milieu à gain afin de repousser encore plus le seuil du régime multimode. Plusieurs architectures de fibres FA-LPF permettant de pré-compenser la charge thermique s'établissant dans la fibre sous l'effet du pompage sont ainsi mises en avant, chacune ayant leur spécificité et leur plage de travail possible. Un compromis sur les paramètres de la fibre (MFA, plage de travail) est forcément à faire.

A côté du travail d'optimisation de la structure de la fibre, j'ai également mené durant ma thèse un travail sur la composition chimique afin de minimiser les défauts quantiques des ions thulium afin de diminuer la quantité de chargement thermique généré dans la fibre. Dans le chapitre 4, une efficacité de 50% a été obtenue en utilisant une fibre à saut d'indice à triple gaine ayant un cœur de $18\mu\text{m}$. Pour ce travail, j'ai notamment effectué un séjour scientifique à l'IPHT (Jena, Allemagne) dans le cadre d'une STSM (« Short Term Scientific Mission ») financé par le COST MP1401 (intitulé "Advance Fiber Laser and Coherent Source as Tools for Society, Manufacturing and Life science") afin de connaître les avantages et les limitations de la méthode REPUSIL.

Dans le dernier chapitre, la fabrication de la première fibre FA-LPF dopée thulium a été montrée. La fabrication des matériaux (actifs et passifs) avec des niveaux de concentration élevée (notamment en aluminium) reste un challenge technologique et des étapes permettant d'atteindre une bonne répétabilité sont encore à franchir. Je me suis donc adapté aux imperfections de fabrication des matériaux de manière à concevoir malgré tout la première fibre FA-LPF dopée thulium. Parmi les adaptations faites, la gaine aperiodique a dû être réduite par manque de matériau haut-indice formant le fond de la gaine microstructurée et la dimension de cœur a dû être limitée à $40\mu\text{m}$. A ce jour, un des résultats marquant a été obtenu avec une fibre ayant un cœur de $40\mu\text{m}$, un diamètre extérieur de 1mm et une longueur de 88cm . Cette fibre, caractérisée en configuration laser pompée à $\lambda = 793\text{nm}$, a permis d'obtenir une émission laser de 25W avec un rendement de 31% et une valeur de M^2 de 1,45.

De plus, une possibilité de fonctionnalisation supplémentaire de la fibre est également discutée. Celle-ci concerne l'inclusion dans son architecture transverse de barreaux de stress induisant une biréfringence. Suite à un filtrage de l'un des états de polarisation du mode fondamental, l'émission directe d'un faisceau laser polarisé rectilignement est ainsi



possible. Devant les difficultés rencontrées au cours de la fabrication des matériaux de la fibre FA-LPF dopée thulium (léger désaccord d'indice entre le cœur et la gaine, cristaux formés dans certains barreaux de la gaine passive conduisant à une réduction de sa géométrie), cette fonctionnalisation n'a pas été introduite au moment de la fabrication de la fibre active de manière à éviter d'en complexifier son étude à ce stade. L'étude de la polarisation unique émise a donc été menée sur une fibre FA-LPF passive de manière à en démontrer le principe et la faisabilité à une longueur d'onde de 2 μ m. Ainsi un taux d'extinction de polarisation de 16,5dB à 1942nm a été démontré, en utilisant une structure FA-LPF passive à polarisation unique avec un cœur de 140 μ m.

Les perspectives à mon travail de thèse sont nombreuses et s'étalent à court, moyen et long terme. La prochaine étape est sans conteste la fabrication de nouvelles fibres FA-LPF dopée thulium avec une différence d'indice entre le cœur et la gaine inférieure à 3×10^{-4} , et une meilleure gestion des seuils de cristallisation au sein des matériaux passifs. Tendre vers un bon accord entre les indices du cœur et de la gaine permettra d'augmenter fortement la taille du cœur (dimension de cœur > 100 μ m). A court terme, il s'agira donc ensuite d'exploiter ces fibres dans diverses configurations (laser, amplificateur) pour aussi valider la méthode REPUSIL utilisée pour la fabrication des matériaux (cette méthode a été validée à ce jour pour les ions ytterbium). Enfin, à plus long terme, la fonctionnalisation de ces fibres FA-LPF dopées thulium pourra ainsi être conduite via l'ajout notamment d'inclusions dépressée en indice dans le milieu à gain pour repousser le seuil d'apparition des instabilités modales transverses et l'ajout d'inclusions en bore dans la gaine afin d'obtenir une lumière polarisée à la sortie de la fibre active.

