

Les fibres apériodiques à large pitch

Dans le chapitre précédent, on a vu comment l'augmentation des dimensions du cœur de la fibre repousse le seuil d'apparition des effets non linéaires. En revanche, l'augmentation du diamètre du cœur dégrade la qualité du faisceau émis à cause du re-confinement des modes d'ordre supérieur. Les développements technologiques et conceptuels des fibres microstructurées ont alors permis de proposer des structures présentant de très grands diamètres de cœur tout en permettant une forte délocalisation des HOMs en dehors de la zone du cœur. Les fibres dites à "large pitch" (Large Pitch Fiber LPF) représentent l'état de l'art des fibres à très grande aire modale. A ce jour, le cœur le plus grand d'une LPF dopée thulium a un diamètre de $80\mu\text{m}$ [Jansen12]. Deux limitations majeures ont été rencontrées dans les LPFs. La première limitation est le couplage du mode fondamental avec un mode de gaine pour certaines dimensions de la gaine d'air, et la deuxième est l'apparition des Instabilités Modales Transverses (IMT).

Le premier objectif de ce travail de thèse est de proposer une nouvelle structure de fibres qui permet de délocaliser fortement les HOMs vers l'extérieur du milieu à gain, sans avoir un problème de couplage du FM avec des modes de gaine. La délocalisation importante des HOMs va ainsi repousser le seuil d'apparition des IMT. En outre, pour pouvoir évaluer la performance de notre structure, cette dernière est comparée numériquement à la structure LPF présentée dans le paragraphe 1.3.2 et constituant l'état de l'art.

II.1. Principe théorique

Une fibre LPF est composée de deux couronnes de trous d'air disposées selon un motif hexagonal autour d'une zone centrale dopée avec des ions de terres rares. Ces deux couronnes permettent de confiner le mode fondamental et de bien délocaliser les HOMs qui fuient à travers les ponts épais de silice pure situés entre les trous d'air. Contrairement aux fibres PCF plus classiques, l'espacement entre deux trous est de 10 à plusieurs dizaines de fois la longueur d'onde. Cette structure souffre du couplage du mode fondamental avec des modes de gaine pour certaines dimensions de la gaine d'air. Ce phénomène, appelé « avoided crossing », a déjà été présenté dans le paragraphe 1.3.2. En 2013, notre équipe de recherche a montré que rompre les symétries apparaissant naturellement dans la structure d'une LPF du fait de sa conception permet d'améliorer la délocalisation des HOMs [Dauliat13] et évite ainsi le couplage du FM avec des modes de gaine. Le mode LP_{01} est un mode à symétrie de révolution avec un maximum d'intensité au centre du cœur, donc la rupture de symétrie dans la gaine n'a pas une influence notable sur sa propagation, contrairement au HOMs (qui peuvent être ou non à symétrie de révolution) dont leur distribution d'intensité interagissent plus avec la gaine. La rupture de symétrie interdit du coup la résonance de ces modes et réduit leur recouvrement avec le milieu à gain. Plusieurs modèles ont été proposés par Romain Dauliat durant sa thèse [Dauliat13.a, Benoit14]. Dans ce chapitre la structure nommée structure apériodique LPF (appelée simplement par la suite « A-LPF ») va être présentée plus en détails car elle a montré les meilleurs résultats numériques en terme de délocalisation des HOMs.

Une bonne discrimination modale entre d'une part le mode fondamental et d'autre part les modes d'ordre supérieur dans une LPF exige un accord d'indice parfait entre le cœur actif et la silice pure qui forme la gaine optique. Cet accord d'indice est réalisé en ajoutant du

fluor à la silice dopée TR constituant le cœur de la fibre afin de diminuer son indice de réfraction. Ce contrôle d'indice est fait suivant plusieurs étapes d'assemblage et d'étréage (« stack and draw ») de barreaux de silice dopée TR et de barreaux dopés fluor comme cela a été détaillé dans le chapitre précédent (cf. figure 7). La section transverse et le profil d'indice de réfraction d'une LPF standard sont représentés dans les figures 16.a et 16.c.

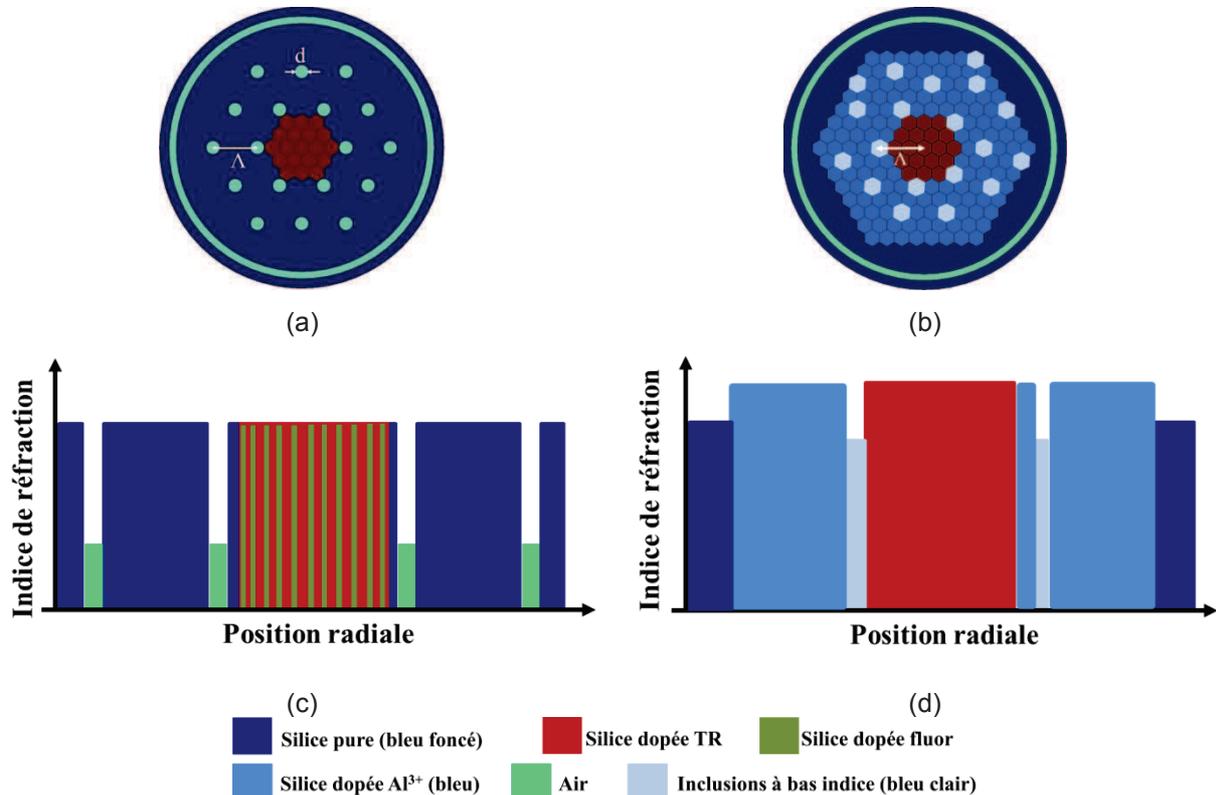


Figure 16: Sections transverses théoriques des structures (a) LPF et (b) A-LPF, Λ est le pitch de la structure formé par trois mailles élémentaires. Les profils d'indice de réfraction de chaque fibre sont présentés dans (c) et (d). Le matériau qui correspond à chaque couleur est aussi mentionné.

Le cœur d'une LPF est dit filamenté, c'est-à-dire que ce cœur est constitué d'un assemblage à une échelle sub-micrométrique de filaments dopés soit en ions actifs soit en ions passifs (fluor). Ce dopage partiel en terres rares permet de baisser l'indice de réfraction du milieu à gain afin qu'il soit égal à l'indice du matériau constituant le fond de la gaine structurée (fait de silice pure, représentée en bleu foncé dans la figure 16). Contrairement au cas d'une fibre LPF air-silice standard, l'indice de réfraction du cœur d'une fibre A-LPF n'a pas à être égal à celui de la silice pure. Sa valeur dépendra directement de la concentration d'ions de terres rares utilisés ainsi que des co-dopants utilisés pour faciliter l'insertion des ions actifs dans la matrice silice. La levée de cette contrainte sur la valeur de l'indice du cœur de la fibre permet ainsi de doper plus fortement le cœur actif en ions terres rares et d'en doper l'intégralité du volume. Il est donc possible d'augmenter le gain linéique tout en réduisant la longueur de la fibre ou de réduire la concentration locale en dopants si l'on souhaite travailler à longueur de fibre constante. Par contre, le matériau de fond constituant la gaine interne (zone bleue dans les figures 16.b et 16.d) doit être dopé passivement (avec des ions Al^{3+} par exemple) afin de surélever son indice et de le faire correspondre à celui du cœur actif. Le profil d'indice de réfraction de la structure A-LPF, basé sur une structure à triple gaine, permet alors de changer le diamètre de la gaine d'air, et donc de contrôler l'absorption de la fibre, sans être gêné par le phénomène d'« avoided crossing ». En effet les

indices effectifs du mode fondamental du cœur et des modes de gaine appartenant à la seconde gaine (zone bleue foncé sur la figure 16.b et 16.d) ne vont jamais être suffisamment proches pour subir ce genre de couplage. Enfin, des inclusions solides bas indice (zones bleues claires sur les figures 16.b et 16.d) constituent la microstructure de la gaine interne et assurent le confinement du FM tout en délocalisant les HOMs. Cette microstructuration de la gaine crée une différence d'indice effectif entre le mode fondamental et les modes s'installant dans la gaine haut-indice suffisamment importante pour empêcher le couplage entre ces modes indépendamment des dimensions transversales de la fibre.

Le dopage totalement homogène en ions de terres rares du cœur dans une A-LPF permet de 1) réduire la longueur de la fibre, donc de repousser le seuil d'apparition des effets non linéaires, 2) éviter l'étape de multiple « stack and draw » pour fabriquer le cœur et 3) ajouter des co-dopants passifs (Ce, Al³⁺) supplémentaires afin de lutter contre des phénomènes disruptifs comme le photonoircissement.

Afin d'évaluer la capacité de la structure A-LPF à délocaliser les HOMs, elle va être comparée numériquement à la structure LPF air-silice standard. La modélisation des structures de fibres, ainsi que l'étude du contenu modal sont réalisées en utilisant le logiciel commercial COMSOL Multiphysics qui utilise la méthode des éléments finis pour résoudre les équations de propagation du champ dans la structure (équations de Helmholtz), afin de calculer la constante de propagation (ou l'indice effectif) et la distribution des champs électrique et magnétique de chaque mode pouvant exister dans la fibre.

Les équations de propagation du champ électrique et magnétique définies dans le logiciel COMSOL Multiphysics sont les suivantes :

$$\nabla^2 E + k^2 E = 0 \quad (2.1)$$

$$\nabla^2 H + k^2 H = 0 \quad (2.2)$$

où k est le vecteur d'onde ($=2\pi/\lambda$), E le champ électrique et H le champ magnétique.

Pour avoir une solution fidèle à la réalité, il faut que le maillage de la structure soit suffisamment fin. Par contre, le temps de calcul augmente avec la finesse du maillage. Donc un compromis entre les deux paramètres doit être trouvé. La modélisation de chaque structure a été faite en utilisant les différents paramètres géométriques représentés dans le tableau 3.

Tableau 3 : Paramètres opto-géométriques utilisés pendant la modélisation

<i>Structure</i>	<i>LPF</i>	<i>A-LPF</i>
<i>Milieu à gaine</i>	<i>19 inclusions</i>	<i>19 inclusions</i>
<i>d/λ</i>	<i>0,3</i>	<i>0,33</i>
<i>Matériau de gaine</i>	<i>Silice pure</i>	<i>Silice dopée haut indice</i> <i>($n_{gaine}=n_{silice}+7 \times 10^{-3}$)</i>
<i>Inclusions bas indice</i>	<i>Trous d'air</i>	<i>Silice pure</i>
<i>Structuration de la gaine</i>	<i>Hexagonale</i>	<i>Apériodique</i>
<i>Gaine extérieure/ épaisseur</i>	<i>Gaine d'air/ 7μm</i>	<i>Gaine d'air/ 7μm</i>
<i>Ratio des diamètres cœur/gaine</i>	<i>0,3</i>	<i>0,3</i>

Dans la structure A-LPF, le mode fondamental n'est pas bien confiné dans le cœur si les inclusions bas-indice formant la microstructuration de la gaine interne n'ont pas un indice suffisamment abaissé par rapport au matériau constituant le fond de la gaine optique (qui correspond à celui du cœur). En particulier, la différence d'indice entre la zone du cœur et



les inclusions bas-indice doit être supérieure ou égale à 7×10^{-3} . Nous avons arbitrairement choisi de fixer cette valeur à 7×10^{-3} dans nos simulations. De plus, nous considérons ici que ces inclusions bas-indice sont faites en silice pure. Le milieu à gain dans les deux structures de fibre considérées ici est formé par 19 inclusions (représentées en rouge sur la figure 16). De plus, le pitch (Λ) dans les deux structures est formé par trois mailles élémentaires (cf. figure 16) Ainsi, le ratio des diamètres entre le cœur et la gaine d'air est autour de 0,3 dans les deux cas. Il faut noter que la valeur de d/Λ (avec d est la dimension de l'inclusion bas indice) dans la A-LPF est de 0,33 et non pas de 0,3 comme dans le cas d'une LPF. Cette différence volontairement introduite dans la simulation reflète simplement la structure réelle de la fibre. En effet, lors de l'étape d'assemblage, il est nécessaire d'utiliser un capillaire pour obtenir le trou d'air souhaité. Ce dernier, constitué de silice diminue par conséquent le rapport d/Λ , l'air n'occupant qu'une partie de la surface du capillaire. Au contraire, dans le cas des A-LPF, la baguette de silice est homogène et entièrement solide.

Après la modélisation des deux architectures de fibre, les facteurs de recouvrement des modes pouvant exister dans le cœur de chacune des structures avec la zone de gain (située dans le cœur) ont été calculés en utilisant l'équation 2.3. Ensuite, nous avons définis deux critères numériques de manière à pouvoir comparer les deux structures quant à leur capacité à assurer une propagation quasi-monomode [Jørgensen12, Coscelli14]. Le premier critère est le facteur de recouvrement du mode fondamental (Γ_{01}) avec la zone de gain qui doit être supérieur à 80%, pour que ce mode soit suffisamment amplifié durant sa propagation. Le deuxième critère est basé sur la différence entre les facteurs de recouvrement avec la zone de gain du mode fondamental et du mode d'ordre supérieur le plus confiné dans le cœur. Cette différence est appelée la discrimination modale ($\Delta\Gamma$) et elle est calculée comme indiqué dans l'équation 2.4. Nous fixons alors la valeur de la discrimination modale qui doit être supérieure ou égale à 30%. Ces valeurs sont suffisantes pour que toute fibre optique active utilisée dans un laser ou un amplificateur et satisfaisant ces critères, ne permette l'émission que du seul mode fondamental. Autrement dit cette valeur représente le seuil d'apparition du régime multimode mais sa définition est en partie arbitraire puisque les conditions d'utilisation de la fibre puis les modifications du profil d'indice liés aux effets thermique, vont largement influencer le fonctionnement des sources. Il s'agira donc plus d'un moyen de comparer des fibres entre elles que d'un critère absolu garantissant la qualité du faisceau.

$$\Gamma = \frac{\iint_{A_{gain}} |E|^2 dS}{\iint_{A_{tot}} |E|^2 dS} \quad (2.3)$$

où E représente la distribution d'intensité du champ électrique du mode considéré et $|E|^2$ son intensité, A_{gain} et A_{tot} sont respectivement l'aire du milieu à gain et l'aire de la structure en entière, et dS est la surface élémentaire de la section de la fibre.

$$\Delta\Gamma = \Gamma_{01} - \Gamma_{HOM} \quad (2.4)$$

Les facteurs de recouvrement avec la zone de gain des 100 premiers modes pouvant exister dans le cœur des deux structures (LPF et A-LPF) ont été calculés. La longueur d'onde de travail est de $2\mu\text{m}$. Ces calculs ont été répétés pour des valeurs du pitch variant de 20 jusqu'à $80\mu\text{m}$, ce qui équivaut à des dimensions de cœur comprise entre 33 et $133\mu\text{m}$. Les résultats obtenus sont illustrés dans la figure 17. On constate alors que la discrimination

modale dans une A-LPF (ligne bleue continue) est plus importante (environ 10%) que dans une LPF (ligne bleue en pointillée). Ceci montre que la structure apériodique améliore la délocalisation des HOMs sur une grande plage de variation de la taille du cœur (45 μm jusqu'à 133 μm). De plus, il faut noter qu'à $\lambda = 2\mu\text{m}$, le champ s'étale dans la gaine, et donc pour des petits diamètres de cœur (< 45 μm) le mode fondamental n'est pas suffisamment confiné dans une A-LPF ($\Gamma_{01} < 80\%$). Par contre, quand la taille du cœur dépasse 45 μm , le recouvrement du mode fondamental avec le milieu à gain devient bien supérieur à 80%.

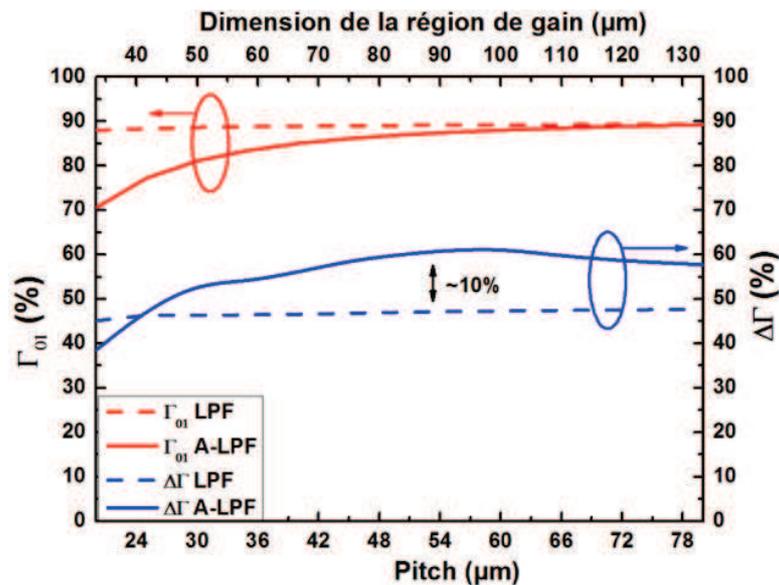


Figure 17: Variation du facteur de recouvrement du mode fondamental (Γ_{01}) (en rouge) et de la discrimination modale ($\Delta\Gamma$) (en bleu) dans une LPF (lignes en pointillées) et dans une A-LPF (lignes continues) en fonction de la taille du cœur. Ces calculs sont effectués à une longueur d'onde de 2 μm .

Dans notre étude numérique, on compare les deux architectures de fibres en se basant notamment sur la discrimination modale qui s'appuie sur la recherche du mode d'ordre supérieur ayant le recouvrement le plus fort avec la zone de gain. Cependant, dans la pratique, les conditions d'excitation font que des modes théoriquement très bien confinés sont rarement observés (surtout s'ils sont d'ordre très élevé). Pour cette raison, c'est presque toujours le mode LP_{11} qui va être le plus difficile à délocaliser. Ainsi, même si l'étude théorique porte sur un grand nombre de modes pour être exhaustive, pour illustrer notre propos de manière juste, proche de l'expérience, tout en restant simple, nous avons choisi dans cette section de ne discuter, que du mode fondamental et du mode LP_{11} qui sont comparés dans les deux structures (LPF et A-LPF). La distribution transverse d'intensité du mode LP_{11} calculée dans chacune des deux structures pour une dimension de cœur voisine de 80 μm est représentée dans la figure 18. Le facteur de recouvrement avec le milieu à gain vaut 27,2% pour la LPF et 16% pour la A-LPF. On voit bien ici l'avantage de la structure A-LPF qui permet de beaucoup mieux délocaliser le mode LP_{11} hors du cœur.

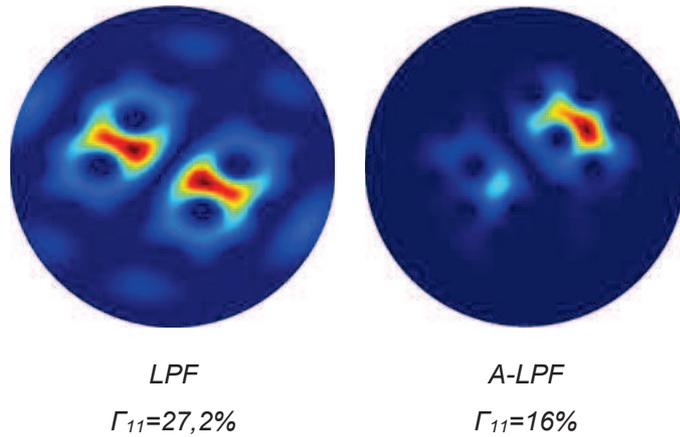


Figure 18: Distribution d'intensité calculée à 2µm du mode LP₁₁ dans une structure LPF et dans une structure A-LPF, chacune des deux présentant un cœur de 80µm. Le facteur de recouvrement Γ_{11} de ce mode avec la zone de gain (couvrant toute la surface du cœur) est indiqué pour chaque cas.

Les résultats numériques ont montré que la structure apériodique améliore la discrimination modale dans des fibres à très large aire modale en comparaison d'une structure LPF standard. Le but maintenant, avant de fabriquer une fibre apériodique dopée thulium, est de valider expérimentalement la capacité de la structure elle-même à assurer une telle propagation quasi-monomode et ce même avec des diamètres de cœur très élevés. Pour cette raison, des fibres A-LPF passives, c'est-à-dire non dopées TR, ont été fabriquées. Cette étape nous permet de vérifier la qualité du guide de notre structure sans être perturbé par un éventuel décalage indicial résiduel entre le cœur et la gaine optique qui peut être présent dans une fibre dopée terres rares du fait de l'assemblage de matériaux différents.

II.2. Fabrication d'une A-LPF passive

Les différentes étapes de fabrication d'une A-LPF passive sont représentées dans la figure 19. A partir d'une préforme en silice pure (barreau de silice Heraeus F300) achetée dans le commerce, nous avons étiré des cannes en utilisant les équipements de la plateforme technologique du laboratoire XLIM. Ensuite, ces cannes ont été assemblées avec une maille hexagonale. Cet assemblage hexagonal a alors été inséré dans un tube de maintien en silice. Des cales également faites de silice pure ont été ajoutées pour le maintenir (ronds noirs et rouges montrés sur le pourtour de l'assemblage de la fig. 19.c). La dernière étape a consisté en l'ajout des inclusions bas-indice faites ici de silice dopée fluor (ronds rouges intérieurs dans la fig. 19.d) pour constituer la microstructuration de la gaine interne en suivant la structure modélisée d'une A-LPF afin de confiner uniquement le mode fondamental, représentée dans la figure 19.f. Enfin, l'assemblage final est étiré en cannes microstructurées puis en fibres avec des dimensions de cœurs allant de 50µm jusqu'à 140µm, avec un diamètre extérieur supérieur à 1mm. Ces fibres dites 'rod-type' nous permettent en effet d'éliminer toutes pertes additionnelles de confinement liées à des courbures ou micro-courbures.

Dans cette fibre fabriquée, le cœur et le matériau constituant le fond de la gaine optique ont exactement le même indice de réfraction, les deux étant formés de silice pure. Cet accord parfait en indice de réfraction nous permet de vérifier la pertinence et les propriétés de la structure apériodique en terme de confinement du mode fondamental et de délocalisation des modes d'ordre supérieur.

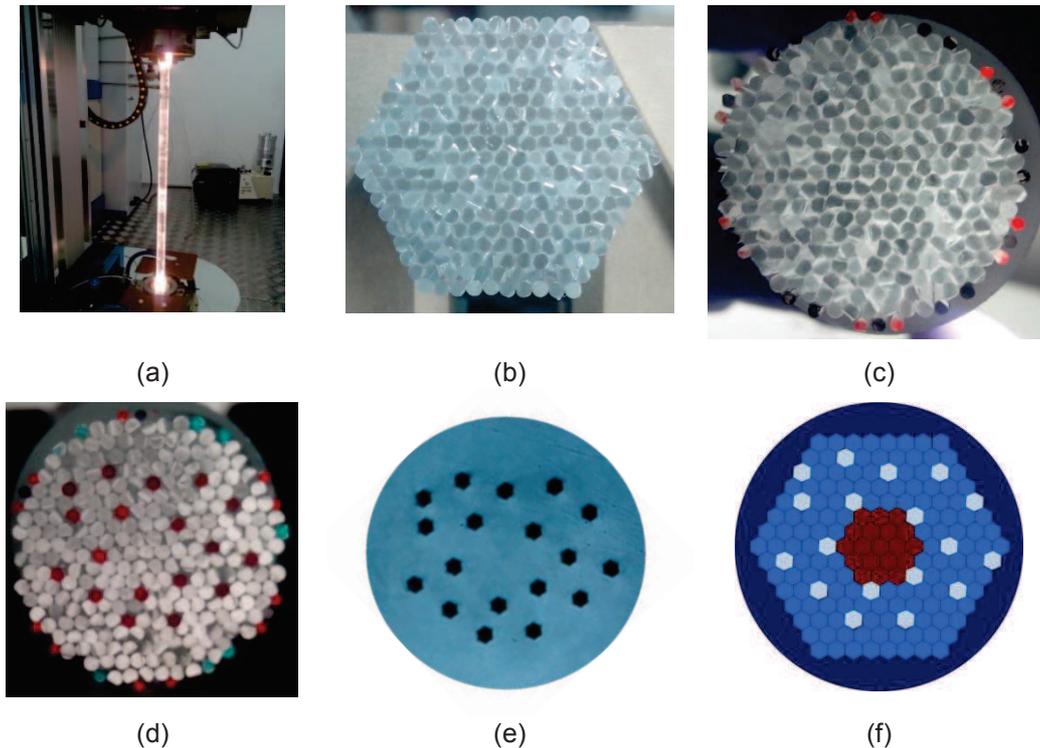


Figure 19: Les différentes étapes de fabrication d'une A-LPF. (a) tirer des cannes en silice pure, (b) assemblage de ces cannes sous une forme hexagonale, (c) insertion de l'assemblage précédent dans un tube de maintien en silice avec blocage à l'aide de cales en silice (ronds noirs et rouges visibles sur le pourtour), (d) ajout des inclusions bas-indice en silice dopée fluor pour former la gaine microstructurée aperiódique, (e) zoom sur la partie centrale de la section transverse de la fibre ainsi étirée (diamètre externe > 1mm) et (f) rappel de la structure théorique de la fibre A-LPF modélisée.

II.3. Validation expérimentale

Afin de vérifier expérimentalement la capacité des guides d'onde proposés à délocaliser les modes HOMs hors de la zone du cœur et donc à assurer une propagation quasi-monomode, j'ai caractérisé les fibres étirées sur une large bande spectrale en montant deux montages expérimentaux. Le premier, montré dans la figure 20.a, utilise une source laser supercontinuum dont le spectre s'étend de 400 jusqu'à 1750nm. Cette dernière émet une puissance optique beaucoup trop faible autour de $2\mu\text{m}$ du fait de la faible sensibilité de notre caméra à cette longueur d'onde et ne nous permet donc pas de faire des mesures pertinentes dans cette plage spectrale. Afin de caractériser nos fibres dans la plage d'émission des ions thulium, nous avons alors utilisé le deuxième montage, montré dans la figure 20.b, qui est basé sur une diode laser à 790nm pompant une fibre à saut d'indice dopée thulium pour générer un signal à une longueur d'onde autour de $2\mu\text{m}$. Dans les deux montages, l'injection de la lumière dans la A-LPF a été réalisée en utilisant une fibre monomode standard (SMF28) qui a un diamètre de champ de mode autour de $10\mu\text{m}$ à $\lambda = 1,5\mu\text{m}$. Cette fibre a été volontairement choisie afin d'assurer une grande désadaptation en terme de diamètre de cœur, d'aire modale et d'ouverture numérique entre la fibre SMF28 et fibre A-LPF sous test, ceci afin d'exciter le plus grand nombre de modes pouvant exister dans le cœur de la fibre A-LPF sans sélection ou excitation sélective du LP_{01} . Autrement dit,

nous voulons vérifier que les fibres sous test réalisent bien la sélection modale attendue elles-mêmes sans le concours de conditions d'injection favorables.

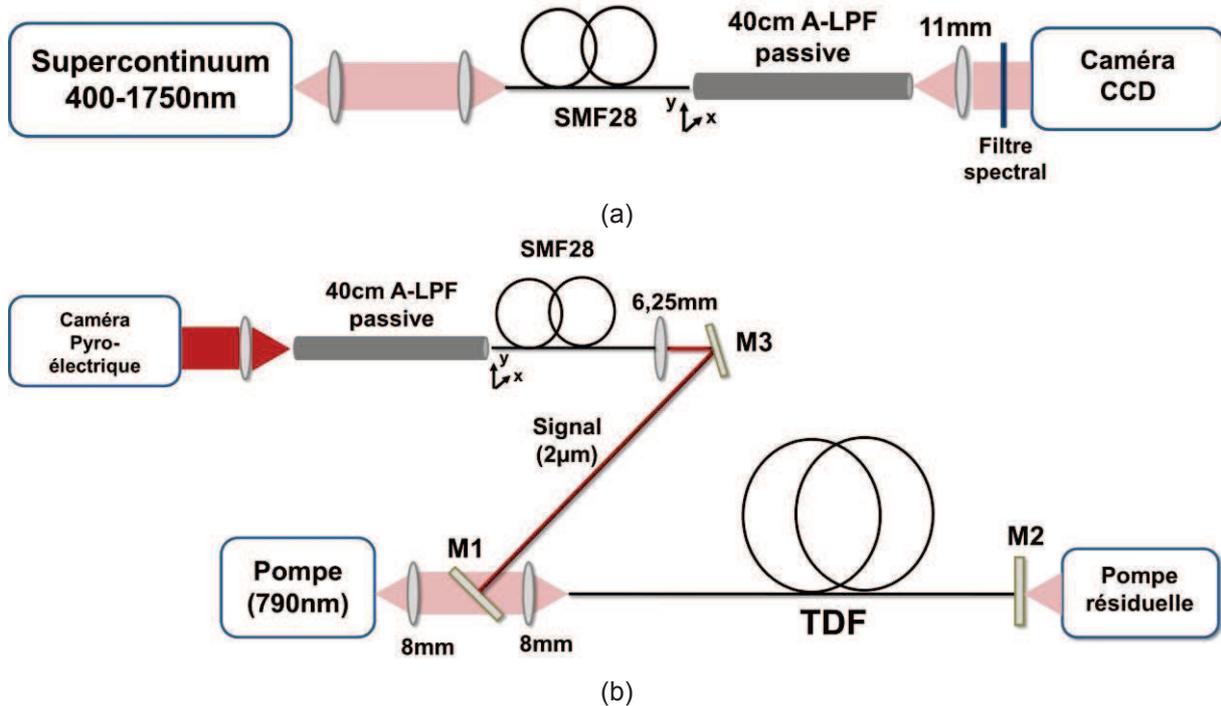


Figure 20: Montages expérimentaux utilisés pour caractériser les fibres A-LPF à des longueurs d'onde (a) entre 400 et 1750nm et (b) autour de 2µm. Le terme SMF28 correspond à une fibre monomode télécom standard avec un MFD de 10µm à $\lambda = 1,5\mu\text{m}$ et le terme TDF correspond à une fibre à saut d'indice dopée thulium avec un cœur de 10µm. M1, M2, et M3 sont des miroirs dichroïques totalement réfléchissants à 2µm et totalement transparents à 790nm.

Le but de ces expériences est d'observer la distribution transverse de l'intensité lumineuse en sortie de la fibre A-LPF sous test à différentes longueurs d'onde et pour différents diamètres du cœur. Pour cette raison, une caméra CCD (InGaAs) a été utilisée pour faire l'observation entre 400 et 1750nm. De plus, des filtres spectraux (10nmde largeur spectrale) ont été ajoutés pour sélectionner la longueur d'onde de travail (cf. figure 20.a). Par contre, la distribution d'intensité à 2µm a été observée avec une caméra pyroélectrique. Dans les deux montages, les fibres sous test ont une longueur de 40cm. Arriver à obtenir une propagation quasi-monomode sur une longueur aussi courte est un avantage étant donné que, dans le cas d'une fibre active, cette courte longueur va permettre de repousser l'apparition des effets non linéaires.

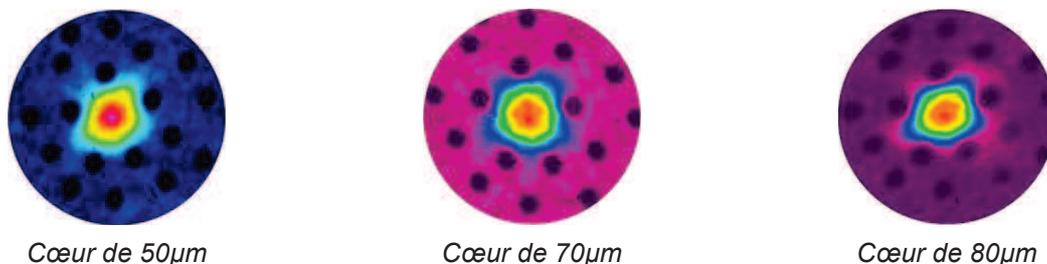


Figure 21 : Distribution d'intensité mesurée en champ proche à la sortie d'une A-LPF avec un diamètre de cœur de 50µm, 70µm et 80µm à une longueur d'onde de 1µm.

La figure 21 montre les distributions d'intensité mesurées en champ proche à la sortie de trois fibres A-LPF ayant trois dimensions de cœur différentes : 50, 70 et 80 μm et ce pour une longueur d'onde de travail de 1 μm . En observant ces images, on voit clairement que la distribution d'intensité est quasi-gaussienne, ce qui semble indiquer la présence unique du mode fondamental dans le faisceau émis à la sortie de la fibre.

La figure 22 montre les distributions d'intensité observées en champ proche pour trois longueurs d'onde de travail différentes (1, 1,5 et 2 μm) à la sortie d'une fibre A-LPF ayant des dimensions de cœur proches de 80 μm . Ces images montrent que, quelle que soit la longueur d'onde de travail, seul le mode fondamental semble être guidé dans le cœur de la fibre A-LPF et que tous les autres modes de cœur sont efficacement évacués dans la gaine optique.

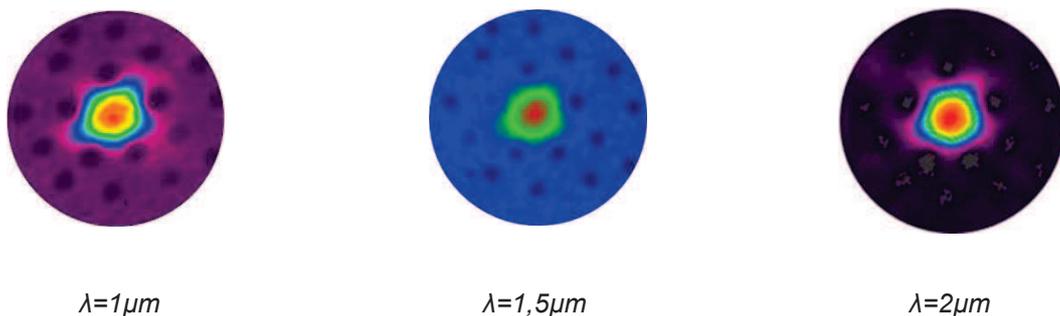


Figure 22 : Distribution d'intensité mesurée en champ proche à la sortie d'une A-LPF ayant une taille de cœur de 80 μm pour trois longueurs d'onde de travail : 1, 1,5 et 2 μm .

Ensuite, cette distribution d'intensité a été observée en sortie de plusieurs fibres A-LPF à une longueur d'onde de 2 μm . Les dimensions des cœurs testés valent 50, 70, 80 et 140 μm . Pour toutes ces dimensions, un faisceau quasi-gaussien a été obtenu en sortie de la fibre A-LPF. Ceci montre qu'à cette longueur d'onde de travail, la structure A-LPF proposée a une très bonne capacité à délocaliser les modes d'ordre supérieur même pour de très grandes dimensions de cœur. Les résultats obtenus sont illustrés dans la figure 23. Il est à noter qu'à ce jour, au meilleur de notre connaissance, la fibre présentant un cœur avec une dimension de 140 μm reste la dimension la plus élevée montrant expérimentalement la propagation d'une mode unique dans le cœur à 2 μm . Ce résultat est d'autant plus intéressant compte tenu des mauvaises conditions d'injection qu'on applique volontairement à l'entrée du guide d'onde dans cette étude. Dans le cas de la fibre A-LPF avec un cœur de 50 μm , on peut remarquer que le mode fondamental s'étale un peu dans un canal de fuite situé en bas à gauche de l'image sur la Fig. 23. Ce résultat expérimental confirme les résultats théoriques présentés dans la figure 17 qui montraient que le mode fondamental a moins de recouvrement avec la zone de cœur pour les petits diamètres du cœur.

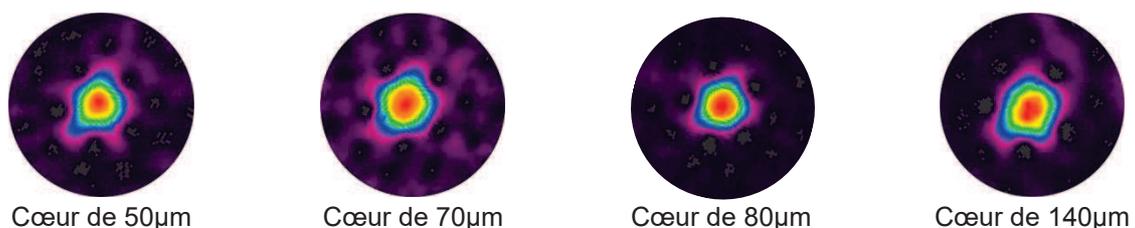


Figure 23: Distribution d'intensité mesurée en champ proche à la sortie d'une A-LPF avec un diamètre de 50, 70, 80, 140 μm à une longueur d'onde de travail de 2 μm .

Nous sommes parfaitement conscients qu'une image figée de la répartition transverse de l'intensité du champ mesurée en champ proche en sortie de la fibre A-LPF peut être trompeuse. Pour cela, l'injection dans la fibre A-LPF passive peut être changée en déplaçant dans un plan transverse la fibre SMF28 amenant le rayonnement à l'entrée de la fibre A-LPF afin d'exciter volontairement les modes d'ordre supérieur susceptibles d'exister dans le cœur. Cette vérification a été effectuée pour l'ensemble des fibres A-LPF testées ici et ce pour toutes les longueurs d'onde de travail utilisées. La figure 24 présente à titre d'exemple le résultat de cette procédure obtenu pour $\lambda = 2\mu\text{m}$ avec la fibre A-LPF ayant un diamètre de cœur de 140 μm . On constate clairement que, quelle que soit la position de la fibre d'amenée devant la fibre A-LPF, aucun mode d'ordre supérieur n'est observé dans le cœur de la fibre sous test. Ce résultat montre que les HOMs sont très bien évacués vers la gaine et ne peuvent donc pas être excités (ou amplifiés dans le cas d'une fibre active). On peut remarquer que le mode LP_{11} a été observé (dernière image à droite sur la première ligne en haut de la figure 24) et la majorité de son intensité est présente en dehors du cœur, conformément à ce que prévoit l'étude théorique. Cette distribution d'intensité observée expérimentalement pour le premier mode d'ordre élevé conforte les résultats théoriques affichés dans la figure 18. De plus, cette image montre que, dans une configuration laser ou amplificateur, le mode LP_{11} ne va pas profiter de l'inversion de population du milieu à gain contrairement au mode fondamental qui va être très bien amplifié durant sa propagation grâce à sa distribution d'intensité qui elle est bien centrée dans le cœur de la fibre.

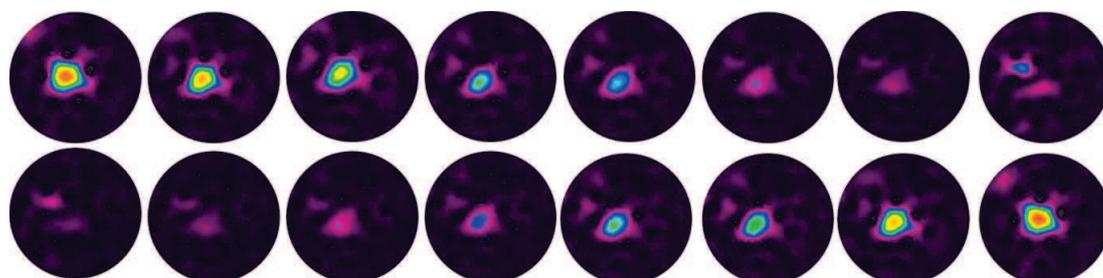


Figure 24 : Evolution de la distribution d'intensité mesurée en champ proche à $\lambda = 2\mu\text{m}$ en sortie de la fibre A-LPF présentant un cœur de 140 μm en fonction de la position de la fibre SMF28 par rapport à la A-LPF.

La simple observation de la distribution d'intensité mesurée à l'aide d'une caméra en sortie de la fibre A-LPF sous test n'est cependant pas suffisante pour décider si la fibre travaille en régime monomode ou multimode. Afin d'aller un peu plus loin dans l'analyse du rayonnement émis en sortie de la fibre sous test, nous avons également utilisé un montage expérimental d'interférométrie à faible cohérence optique comme suggérée dans la référence [Schimpf11.a]. La représentation schématique de ce dernier est montrée dans la figure 25.a. Ce montage permet d'évaluer le contenu modal d'une fibre en se basant sur la différence des vitesses de propagation des différents modes guidés. La trace d'interférence modale, détectée par une photodiode, permet de visualiser le nombre de modes qui se propagent suivant le nombre de pics d'interférences constructives observés. A titre d'exemple, le résultat obtenu à $\lambda = 1300\text{nm}$ avec une fibre A-LPF caractérisée par une longueur de 40cm et un diamètre de cœur de 80 μm est montré dans la figure 25.b. Dans

cette figure un seul pic intense peut être distingué [Benoit14.a]. Ce pic se trouve sur le zéro de différence d'indice de groupe, ce qui montre la présence d'un seul mode se propageant dans le cœur de la fibre. Ce résultat associé aux précédents résultats obtenus montre que les fibres A-LPF permettent d'évacuer fortement les HOMS vers l'extérieur du cœur en gardant la propagation unique du mode fondamental.

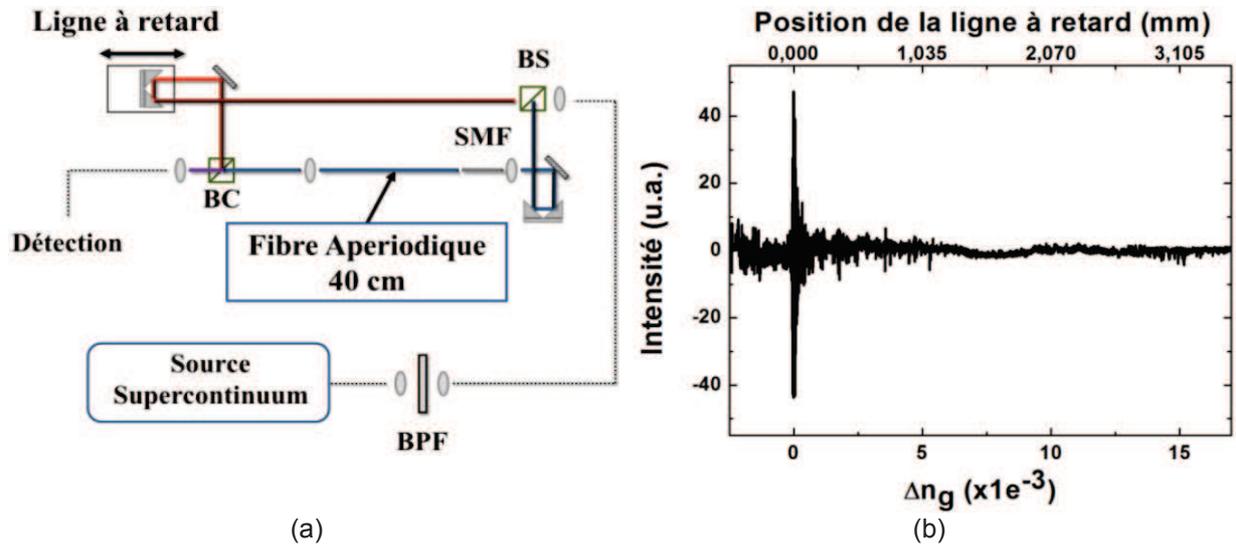


Figure 25: Montage expérimental de l'interféromètre à faible cohérence (OLCI) utilisé ici. Le terme BPF désigne un filtre spectral (10nm de bande passante), BS est un cube séparateur de faisceau et BC est un coupleur de faisceau. (b) Trace obtenue pour une fibre A-LPF avec un diamètre de cœur de 80 μm pour $\lambda = 1300\text{nm}$.

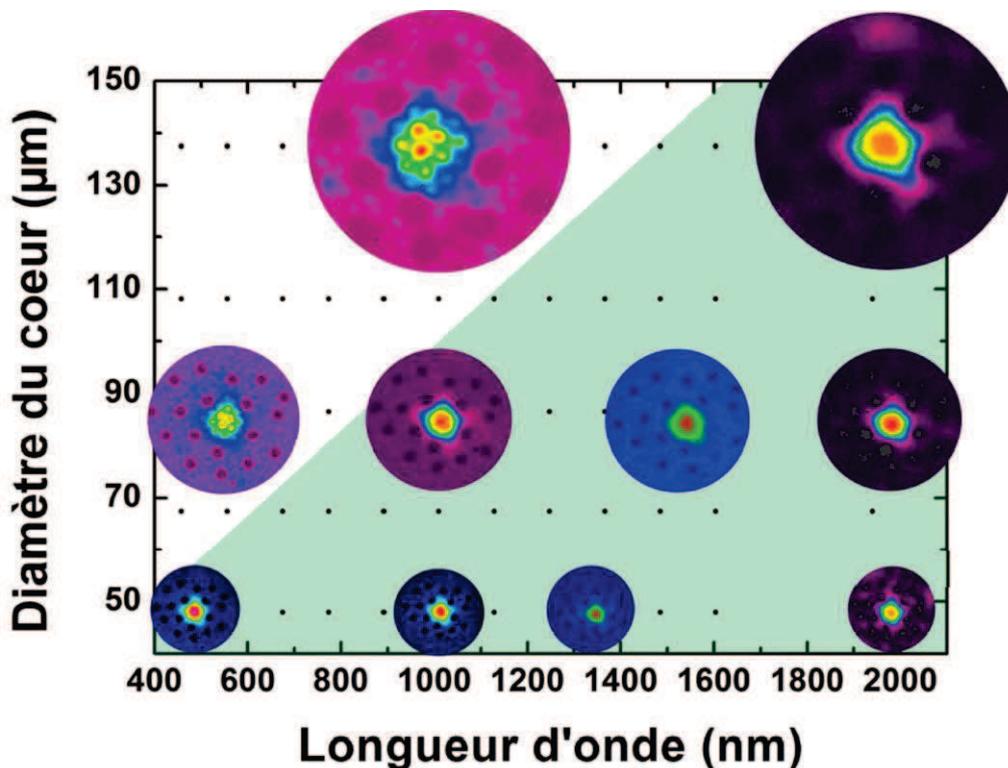


Figure 26 : Graphique représentatif des différentes images (à l'échelle) des modes obtenues pour différents diamètres du cœur à plusieurs longueurs d'ondes. Les points noirs représentent les différents points de mesure. La zone verte est la zone d'opération monomode de la fibre.

Pour résumer les différents résultats obtenus, le graphe de la figure 26 montre la distribution d'intensité mesurée en champ proche à la sortie de quelques fibres A-LPF sous test pour plusieurs diamètres de cœur et pour plusieurs longueurs d'onde de travail. Chaque point noir, correspondant à un couple « diamètre de cœur / longueur d'onde » représente un point de mesure. La zone verte représente la zone où seul le mode fondamental se propage dans le cœur de la fibre sous test.

La distribution modale étrange qu'on observe pour certains points (par exemple pour un diamètre de $50\mu\text{m}$ à 500nm ou pour un diamètre de cœur de $140\mu\text{m}$ à $1\mu\text{m}$) est due au confinement de la lumière dans les différents barreaux de silice pure constituant le cœur de la fibre (cf. figure 27.a). Il s'avère que chaque barreau de silice joue le rôle d'un guide d'onde. Cet effet devient plus important quand le diamètre du cœur augmente et la longueur d'onde de travail diminue. Pour comprendre l'origine de cette observation, une mesure de composition chimique a été réalisée par la méthode WDX (wavelength dispersive X-ray) sur la section transverse d'une canne de silice pure utilisée pour fabriquer ces fibres. Cette mesure va permettre de connaître la concentration des différents composants chimiques formant cette canne, en particulier les traces de chlore employé pour déshydrater la silice F300. Le résultat obtenu est montré dans la figure 27.b. Dans ce graphe, On voit que la concentration des ions chlore en bordure de chaque canne est plus faible qu'au centre. Cette diminution de la quantité de chlore s'explique par une évaporation du chlore lors de la fabrication de la fibre par assemblage et étirage. Il en résulte un réseau d'indice facilement observable bien que très faible. Les variations de la valeur de l'indice de réfraction peuvent atteindre 10^{-4} , ce qui est comparable voir supérieur aux valeurs d'accord d'indice que nous rechercherons pour la fabrication des fibres A-LPF actives.

Donc, l'utilisation de silice non déshydratée, c'est à dire sans chlore susceptible de s'évaporer localement lors de la fabrication devrait permettre d'élargir la zone verte représentée dans la figure 26 et autoriser l'obtention d'une propagation monomode dans de très grands cœurs pour des petites longueurs d'ondes.

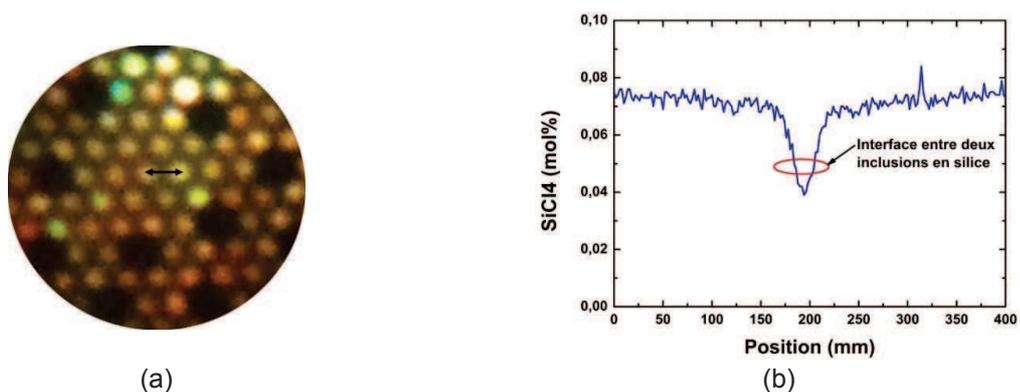


Figure 27 : (a) Zoom sur le cœur d'une fibre A-LPF avec un diamètre de $140\mu\text{m}$, et (b) une mesure de WDX (wavelength dispersive X-ray) effectuée sur une canne A-LPF suivant la flèche tracée dans la figure 27.a.

II.4. Conclusion

Dans ce chapitre, une nouvelle structure de fibres à très large aire modale a été proposée. Cette structure est basée sur la rupture de symétrie des inclusions à bas indice dans la gaine de la fibre. La structure proposée est nommée structure aperiodique à large pitch (A-LPF). Numériquement, cette dernière a donné une meilleure discrimination modale

qu'une fibre LPF standard. Pour valider la pertinence de cette structure, des fibres A-LPF passives ont été fabriquées et testées sur une large gamme spectrale. Un fonctionnement monomode a été obtenu pour un cœur, de $80\mu\text{m}$ à $1\mu\text{m}$ et de $140\mu\text{m}$ à $2\mu\text{m}$.

Il faut cependant préciser que dans une fibre active, les ions terres rares à l'origine du gain recherché, génèrent de la chaleur à cause de leurs défauts quantiques. De plus, certains effets parasites comme le photonoircissement peuvent aussi contribuer à réchauffer le cœur de la fibre. Cette émission d'énergie calorifique change le profil d'indice de réfraction des fibres, et en conséquence, modifie leur mécanisme de guidage. Il est par conséquent indispensable d'évaluer la performance de la structure A-LPF en présence de ces effets thermiques avant d'envisager la fabrication d'une fibre A-LPF dopée thulium. La structure pourra alors être optimisée afin d'atteindre une meilleure performance sous chargement thermique.



Chapitre III. Contenu modal sous l'influence des effets thermiques

Dans le chapitre 2, une structure aperiodique à large pitch a été présentée. La capacité d'une telle architecture à délocaliser les modes d'ordre supérieur de manière à assurer l'émission d'une unique mode a été validée expérimentalement en fabriquant des fibres passives (cœur non dopé avec des ions de terres rares) avec différentes dimensions de cœur. Toutefois, lorsque l'on considère dans un second temps des fibres actives, les défauts quantiques des ions de terres rares et le photonoircissement induit dans le milieu à gain vont générer l'apparition d'une certaine charge thermique au sein de la fibre. Ce chargement thermique apporté à la fibre va alors naturellement modifier sa structure notamment au travers d'une variation transversale et longitudinale de l'indice de réfraction. Cette variation indicielle, étant donné ce que l'on a vu dans le chapitre précédent, va alors modifier les propriétés du guide d'onde, notamment sa capacité à délocaliser suffisamment les modes d'ordre élevé. Cela va nécessairement dégrader la qualité du faisceau émis, soit du fait de la présence permanente de plusieurs modes, soit via l'apparition d'instabilités modales transverses qui résultent d'une compétition entre ces modes au-delà d'un certain seuil. En outre, un autre phénomène de dégradation de la qualité du faisceau a été observé très récemment [Yehouessi17] mais ne sera pas étudié dans ce manuscrit. Il s'agit de l'observation d'une fuite du mode fondamental quand la fibre est mise sous un niveau de puissance élevé durant un temps prolongé (dizaines d'heures). Cette observation est due au couplage entre le mode fondamental et un mode de gaine à cause du photonoircissement.

Ainsi, avoir une architecture de fibre avec une bonne capacité à délocaliser les HOMs en présence d'un chargement thermique est bénéfique pour conserver une bonne qualité de faisceau le plus longtemps possible lors de la montée en puissance. Dans ce chapitre, le phénomène des instabilités modales va être expliqué en détails. Ensuite, la structure A-LPF proposée dans le chapitre 2 va être optimisée en tenant compte du chargement thermique.

III.1. Les instabilités modales : origine et caractéristiques

Les derniers développements réalisés pour la montée en puissance des lasers à fibre, s'appuyant surtout sur des fibres dopées Yb^{3+} pour une émission à $\lambda = 1\mu\text{m}$, ont permis d'atteindre un niveau de puissance qui dépasse les 10kW en régime continu avec une bonne qualité de faisceau [Fomin10]. Par contre, dans le régime impulsif l'utilisation de courtes longueurs de fibre couplée à un très grand diamètre de cœur est indispensable afin de repousser le seuil des effets non linéaires. Malheureusement, depuis 2010 la montée en puissance dans ces fibres s'est retrouvée stoppée par l'apparition d'un nouveau phénomène appelé "instabilités modales transverses (IMT)". A cause de ce dernier, une dégradation drastique de la qualité du faisceau émis est observée expérimentalement par plusieurs équipes de recherche utilisant soit des fibres microstructurées [Eidam11, Stutzki11.b, Laurila12], soit des fibres à saut d'indice à large aire modale (ayant une faible ouverture numérique) [Kuznetsov14, Yang16], toutes dopées Yb^{3+} . Le faisceau émis reste stable et quasi-monomode jusqu'à une valeur de puissance bien spécifique (effet de seuil). Au-delà de cette valeur seuil, une fluctuation temporelle périodique (à l'échelle de la ms) apparaît (cf. figure 28). Après, quand la puissance optique continue à augmenter et dépasse un autre seuil, cette fluctuation devient complètement chaotique. La zone périodique représente un battement entre le FM et le mode d'ordre supérieur le plus compétitif (généralement le LP_{11}), par contre la zone chaotique représente un transfert d'énergie entre le mode fondamental et

plusieurs modes d'ordre supérieur. Ces trois régions dépendent du montage expérimental utilisé, et des propriétés opto-géométriques de la fibre [Otto12]. Par exemple, dans une configuration laser le seuil des IMT est moins élevé que dans une configuration amplificateur parce que dans ce dernier cas, le mode fondamental est préférentiellement excité. De plus, le seuil des IMT lié au contenu modal et au chargement thermique dépend fortement des caractéristiques de la fibre (diamètre de cœur, absorption et concentration en ions terres rares).

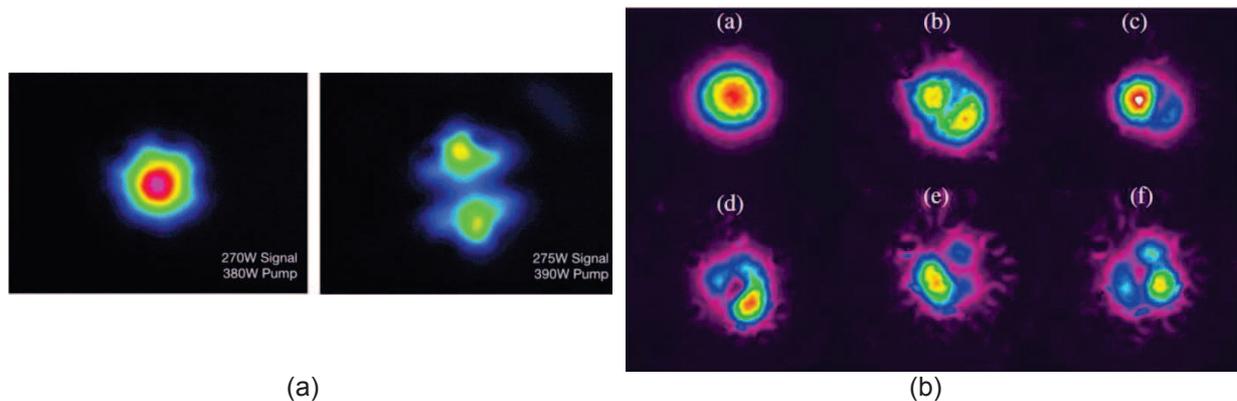


Figure 28 : Observation des instabilités modales transverses dans une (a) LPF ayant un MFD de $56\mu\text{m}$, et (b) DMF ayant un MFD de $60\mu\text{m}$. Dans les deux cas, la distribution d'intensité du faisceau émis mesurée en champ proche au-dessous ((a) dans fig. 28.b) et au-dessus ((b-f) dans fig.28.b) du seuil d'apparition des instabilités modales est montrée [Eidam11, Laurila12].

Pour essayer de comprendre l'origine de ce phénomène, afin de réduire son influence ou de repousser son seuil d'apparition, plusieurs équipes de recherche ont proposé des modèles numériques pour donner une explication théorique pour cet effet. Parmi ces équipes, on peut citer l'IAP en Allemagne, le DTU Fotonik au Danemark, l'AS-Photonics et LORC aux Etats-Unis. La première hypothèse a été proposée par Jauregui *et al.* en 2011 [Jauregui11]. Dans leur travail, l'origine des instabilités modales a été identifiée par, la création d'un réseau d'indice de réfraction longitudinal dans le cœur de la fibre due à un phénomène d'interférence modal, et par le TSHB (Transverse spatial hole burning). L'année suivante, Jauregui *et al.* ont montré dans [Jauregui12] que le réseau indiciel est dû aux effets thermiques générés dans la fibre. Si une fibre à grande (ou très grande) aire modale est intrinsèquement multimode, alors elle peut supporter la propagation de plusieurs modes si aucune injection préférentielle n'est prise en compte. Le mode fondamental peut interférer avec un (ou plusieurs) mode(s) d'ordre supérieur en créant un motif d'interférence d'intensité. Ce motif d'interférence va générer un réseau d'inversion de population tout au long de la fibre, parce que la variation d'intensité va changer la manière de désexciter les électrons de l'état excité. Ensuite, comme les défauts quantiques dans la fibre, c'est-à-dire le chargement thermique, dépend de l'inversion de population, un réseau de température va être généré dans le milieu à gain. Ce dernier et via l'effet thermo-optique va générer un réseau périodique de l'indice de réfraction qui a une période de l'ordre de la longueur de battement entre les modes (cf. figure 29). Cette dernière représente une condition très importante pour obtenir le transfert d'énergie intermodal [Jauregui11]. Toujours en 2011, Smith *et al.* ont montré dans [Smith11] que la bonne période n'est pas suffisante pour avoir ce transfert d'énergie, mais qu'un déphasage entre le réseau indiciel et le réseau d'intensité est également indispensable pour permettre ce phénomène. Pour obtenir ce déphasage, Smith *et al.* ont proposé l'idée d'un réseau d'intensité mobile ayant une vitesse qui dépend de

IMT. Récemment ce phénomène a été relié à la création d'un réseau de température, d'où un réseau d'indice de réfraction périodique, à l'intérieur de la fibre. Dans tous les cas envisagés, comme les résultats numériques obtenus commencent à concorder avec les observations expérimentales, des solutions ont été proposées dans le but de repousser le seuil d'apparition de ce phénomène, pour permettre la montée encore plus en puissance (cf. paragraphe III.2).

Pour le moment, les instabilités modales ont été observées seulement dans des fibres dopées Yb^{3+} et non pas dans des fibres dopées Tm^{3+} . Ceci peut surprendre étant donné que les ions thulium présentent dans une matrice silice des défauts quantiques plus importants que les ions ytterbium, et donc conduisent à un chargement thermique plus élevé dans la matrice constituant le cœur de la fibre. Il y a plusieurs raisons pour expliquer cette contradiction. La première est que les niveaux de puissance atteints jusqu'à maintenant dans les TDFs sont plus faibles que ceux obtenus avec les YDFs. La longueur d'onde dans les fibres dopées thulium est deux fois plus grande, et les modes d'ordre supérieur sont moins confinés, le transfert d'énergie entre le mode fondamental et les HOMs devient plus faible. De plus, Smith *et al.* et Hansen *et al.* ont montré que quand le degré de saturation du gain est plus élevé, le seuil d'apparition des instabilités modales augmente [Smith13, Hansen14] et comme le degré de saturation du gain dans les fibres dopées thulium est plus important comparé avec celui dans les fibres ytterbium, les instabilités modales dans les TDFs arrivent plus tard que dans les YDFs [Smith16].

III.2. Limiter les instabilités modales transverses

A cause de la grande influence des IMT sur la qualité du faisceau émis, les équipes de recherche ont essayé de trouver des solutions ou des moyens qui permettent de repousser le seuil d'apparition de cet effet, et alors de monter encore en puissance en gardant toujours un faisceau stable. Les méthodes proposées peuvent être décomposées en deux familles, passives et actives.

Méthodes passives : ces méthodes sont composées des méthodes extrinsèques et intrinsèques. Comme méthode extrinsèque on trouve la réduction du défaut quantique (en diminuant la longueur d'onde du signal afin de réduire la différence entre cette dernière et la longueur d'onde de pompe). Par contre, les méthodes intrinsèques sont liées à l'optimisation des propriétés opto-géométriques de la fibre, comme la réduction de l'absorption, la réduction de photonoirissement [Jauregui16, Lægsgaard16], la saturation du gain [Smith13, Hansen14], la réduction de la zone dopée activement (afin d'amplifier préférentiellement le mode fondamental) [Jauregui13.a], ou l'optimisation de la structure de la fibre afin d'obtenir une meilleure délocalisation des HOMs [Stutzki14].

Méthode active : cette méthode consiste à ajouter un défecteur acousto-optique au montage expérimental, qui permet de stabiliser le faisceau émis en temps réel [Otto13]. De plus, Stihler *et al.* ont montré que la modulation de l'onde de pompe permet aussi d'augmenter le seuil d'apparition des IMT d'un amplificateur à fibre [Stihler17].

III.3. Principe théorique

Les modélisations proposées pour estimer le seuil des IMT sont réalisées pour des cas bien spécifiques. Par contre, comme le seuil des IMT dépend de la configuration utilisée (laser, amplificateur, pompage co-propagatif, pompage contra-propagatif) et des propriétés de la fibre (diamètre de cœur, concentration en ions terres rares, absorption linéique) on a décidé

de se concentrer sur l'origine de ce phénomène, représentée par une augmentation du gain des HOMs du fait de leur re-confinement pendant la montée en puissance, et d'essayer à nouveau de délocaliser ces modes en tenant compte du chargement thermique. Par conséquent, si on réussit à évacuer les HOMs en dehors du cœur ou à diminuer leur recouvrement avec ce dernier, on peut repousser le seuil d'apparition des IMT. Cette stratégie est une méthode passive intrinsèque si l'on suit la précédente classification. Stutzki *et al.* ont montré dans [Stutzki14] que la réduction de symétrie dans la gaine d'une fibre LPF améliore notamment la performance de cette dernière en la présence d'un chargement thermique.

Si on prend par exemple un point bien défini au début de la fibre (à une distance de quelques centimètres de sa face d'entrée). Sur ce point, la montée en puissance va changer transversalement l'indice de réfraction. L'indice varie d'une manière quadratique dans le cœur et d'une manière logarithmique ailleurs. Cette variation de profil d'indice dans le cœur va amener à un re-confinement rapide des HOMs dans le cœur qui va être à l'origine de l'apparition des instabilités modales transverses.

Dans la prochaine partie, les équations qui conduisent à cette variation vont être présentées. Après, elles vont être appliquées sur plusieurs structures de fibres afin de déterminer comment le chargement thermique agit sur le mécanisme de guidage dans chacune de ces dernières.

III.3.1. L'influence du chargement thermique sur l'indice de réfraction dans une fibre optique

Dans une fibre optique dopée avec des ions de terres rares, la montée en puissance laser (puissance de pompe et puissance de signal généré) induit de la chaleur à cause des défauts quantiques de ces ions et du photonoircissement. Le défaut quantique est l'énergie calorifique libérée au sein de la fibre due à la différence énergétique (ou en longueur d'onde) entre la puissance de pompe absorbée et la puissance signal émise. De plus, le photonoircissement, expliqué dans le § 1.5, est représenté par une absorption des photons de pompe sans émission radiative (phonons), donc une génération supplémentaire de chaleur.

Supposons que l'on a une fibre optique à saut d'indice à simple gaine avec un cœur de rayon a et une gaine de rayon b , comme représentée sur la figure 30.

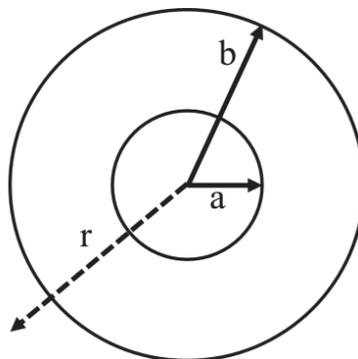


Figure 30: schéma illustratif de la section transverse d'une fibre optique à saut d'indice à simple gaine
Les équations de transfert de chaleur dans une fibre à simple gaine sont[Brown01] :



$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_1(r)}{\partial r} \right) = \frac{-Q_0}{k_{si}} \quad \text{pour } r < a \quad (3.1)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_2(r)}{\partial r} \right) = 0 \quad \text{pour } a < r < b \quad (3.2)$$

avec Q_0 la densité de chaleur induite à l'intérieur de la fibre. $Q_0 = Q/A_{\text{cœur}}$ avec Q le chargement thermique et $A_{\text{cœur}}$ l'aire du cœur. k_{si} est la conductivité thermique ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) dans la silice pure. Cette dernière est utilisée aussi pour la silice dopée activement ou passivement car dans tous les cas étudiés dans ce travail, la silice représente plus de 90% de ces matériaux. T_1 et T_2 sont les températures dans le cœur et dans la gaine respectivement.

La température et sa dérivée sont continues à l'interface entre le cœur et la gaine (c'est-à-dire pour $r = a$). Les équations de continuité sont :

$$T_1(r = a) = T_2(r = a) \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial T_1}{\partial r}(r = a) = \frac{\partial T_2}{\partial r}(r = a) \quad (3.4)$$

De plus, la température est constante au centre du cœur de la fibre (pour $r = 0$), donc sa dérivée en ce point est nulle :

$$\frac{\partial T_1}{\partial r}(r = 0) = 0 \quad (3.5)$$

Une autre condition peut être appliquée à l'interface avec l'air (pour $r = b$). A cet endroit la loi de refroidissement de Newton est définie comme :

$$\frac{\partial T_2}{\partial r}(r = b) = \frac{h}{k_{si}} (T_c - T_2(r = b)) \quad (3.6)$$

Où h est le coefficient de transfert thermique ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$) et T_c est la température de refroidissement (en K).

En intégrant les quatre conditions citées précédemment dans les équations 3.1 et 3.2, la diffusion de température dans chaque domaine peut être écrite comme suit :

$$T_1(r) = -\frac{Q_0 r^2}{4k_{si}} + T_0 \quad (3.7)$$

$$T_2(r) = -\frac{Q_0}{2k_{si}} a^2 \ln \frac{r}{a} - \frac{Q_0}{4k_{si}} a^2 + T_0 \quad (3.8)$$

T_0 (en K) est la température au centre de la fibre (pour $r = 0$). Cette valeur est définie comme :

$$T_0 = T_c + \frac{Q_0 a^2}{4k_{si}} \left(1 + 2 \ln \frac{b}{a} + \frac{2k_{si}}{bh} \right) \quad (3.9)$$

Selon l'effet thermo-optique l'indice de réfraction du milieu varie avec la température. Ce changement d'indice est défini comme suit :

$$\Delta n_{1,2} = \frac{\partial n}{\partial T} (T^{1,2}(r) - T_c) \quad (3.10)$$

Avec $dn/dT=\beta$ le coefficient thermo-optique de la silice.

Alors le nouvel indice de réfraction de chaque milieu devient :

$$n_1 = n_{1,0} + \beta \left(T_0 - \frac{Q_0 r^2}{4k_{si}} - T_c \right) \quad (3.11)$$

$$n_2 = n_{2,0} + \beta \left(T_0 - \frac{Q_0 a^2}{2k_{si}} \left(\frac{1}{2} + \ln \frac{r}{a} \right) - T_c \right) \quad (3.12)$$

$n_{1,0}$ et $n_{2,0}$ sont les indices de réfraction du cœur et de la gaine sans chargement thermique.

L'équation 3.11 montre que dans le milieu à gain, l'indice de réfraction évolue de manière quadratique. Cette variation prend une forme logarithmique dans les zones non dopées en ions de terres rares (équation 3.12). A titre d'exemple, la variation de la température et de l'indice de réfraction dans le cas d'une fibre à saut d'indice, avec un cœur de $18\mu\text{m}$ et une gaine de $250\mu\text{m}$, est représentée dans la figure 31. Les paramètres utilisés dans cette simulation (K_{si} , h et T_c) sont montrés dans le tableau 4. Dans la plupart des cas, cette modification du profil d'indice de réfraction est négligeable devant la différence d'indice de la fibre active à saut d'indice avec un grand contraste d'indice entre le cœur et la gaine. Dans le cas particulier des fibres optiques à très grande aire affective, l'amplitude de cette modification d'indice qui peut atteindre, voir dépasser le 10^{-4} , va perturber le mécanisme de guidage dans le cœur de la fibre. En effet et en particulier pour les fibres à très grand cœur type LPF [Eidam11], DMF [Laurila12] ou A-LPF, le contraste d'indice amené par la charge thermique peut provoquer un confinement des champs plus contraint que celui dû à la structure elle-même.

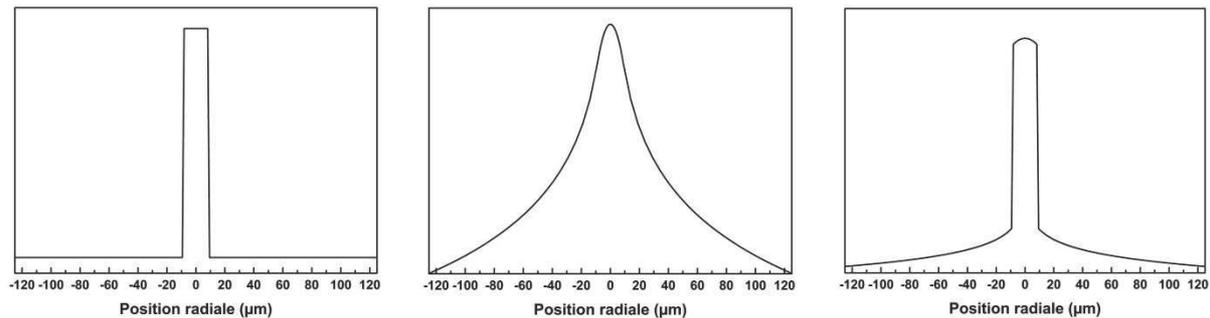


Figure 31 : De gauche à droite : profil d'indice de réfraction dans une fibre à saut d'indice sans chargement thermique, profil de température et profil d'indice de réfraction sous chargement thermique.

La variation d'indice de réfraction dans une fibre optique, pour des niveaux de chargement thermique entre 10 et 200W/m, est comprise entre 10^{-5} et 10^{-4} . L'influence de cette variation est plus remarquable dans les fibres microstructurées que dans les fibres à saut d'indice. En effet, dans les fibres microstructurées, un accord parfait d'indice entre le cœur et le matériau constituant le fond de la gaine est demandé pour conserver une bonne qualité du faisceau émis, et un faible excès d'indice dans le cœur va re-confiner les HOMs dans le cœur [Dauliat13.a].

III.3.2. Variation de l'indice de réfraction dans une fibre optique microstructurée

La structure aperiodique présentée dans le chapitre 2 va être étudiée en tenant compte de la variation de l'indice de réfraction due au chargement thermique induit dans la fibre.

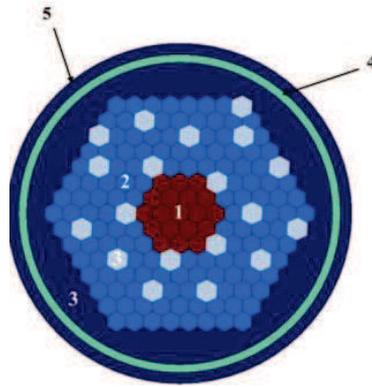


Figure 32: Différents domaines indiciels (numérotés de 1 à 5) dans la structure aperiodique A-LPF.

Dans cette partie, l'indice de réfraction dans chaque domaine présenté dans la figure 32a a été modifié et reformulé en suivant la démarche détaillée dans la partie III.3.1. Il faut noter que dans le domaine 4 (la gaine d'air), la conductivité thermique (K_{ac}) a été prise en compte. Ce paramètre dépend du nombre de ponts en silice, de leur épaisseur et de leur longueur [Limpert03].

Les différents paramètres physiques et géométriques utilisés dans notre calcul sont présentés dans le tableau 4. Ces paramètres sont communs dans toutes les structures étudiées et ils ne dépendent pas de la longueur d'onde de travail.

Tableau 4 : Les différents paramètres physiques et géométriques utilisés dans notre modèle numérique

<i>Chargement thermique Q, W/m</i>	Variable
<i>Conductivité thermique de la silice pure ou dopée K_{si}, $W.m^{-1}.K^{-1}$</i>	1,38
<i>Conductivité thermique de la gaine d'air, K_{ac}, $W.m^{-1}.K^{-1}$</i>	0,088
<i>Coefficient du transfert thermique, h, $W.m^{-2}.K^{-1}$</i>	80
<i>Température de refroidissement, T_c, K</i>	298
<i>Pitch Λ, μm</i>	45
<i>Diamètre du cœur estimé, D_c, μm</i>	~75
<i>Diamètre extérieur, mm</i>	1

Dans ce travail, la comparaison entre les structures va être réalisée en se basant sur la valeur du chargement thermique Q . Cette valeur peut être convertie en puissance de signal ou de pompage en utilisant l'équation 3.13 [Johansen13, Coscelli16]. Dans cette équation, la conversion dépend de certaines propriétés de la fibre comme sa longueur et son absorption linéique. Toutefois, cette relation prend en compte le chargement thermique dû aux défauts quantiques mais ne tient pas compte de celui apporté par le photonoirissement.

Donc les valeurs obtenues en puissance peuvent être surestimées. Alors, si on garde le chargement thermique Q comme référence, les structures peuvent être comparées quant à leur capacité à garantir une délocalisation efficace des HOMs en présence d'un certain niveau de chargement thermique, indépendamment des autres propriétés de la fibre.

$$Q = \frac{1-10^{-\alpha dL/10}}{dL} \left(1 - \frac{\lambda_p}{\lambda_s}\right) \frac{P_{signal}}{\eta} \quad (3.13)$$

Où α (dB/m) est le coefficient d'absorption de la pompe, dL est la longueur de la fibre, λ_p et λ_s sont les longueurs d'onde de pompe et de signal, η est l'efficacité laser de la fibre, et P_{signal} est la puissance de signal (émise).

Dans ce travail, une LPF avec un pitch de $45\mu\text{m}$ (LPF45) a été identifiée comme fibre référence pour évaluer nos structures. Cette fibre a été choisie parce que c'est une fibre commerciale très utilisée dans les laboratoires de recherche et dans l'industrie des lasers à fibre. Elle possède un diamètre de cœur autour de $75\mu\text{m}$, et le diamètre des trous d'air normalisé (d/Λ) est de 0,3. Dans cette fibre, et dans les fibres microstructurées qui possèdent les mêmes caractéristiques géométriques, pour un chargement thermique de $Q = 100\text{W/m}$, la différence d'indice de réfraction apparaissant entre le centre du cœur de la fibre et l'interface avec l'air (variation entre les domaines 1 et 5 dans la figure 32) est de l'ordre de quelques 10^{-4} . En outre, cette variation devient quelques 10^{-5} si on compare l'indice au centre du cœur avec l'indice à l'interface cœur/gaine (l'interface entre les domaines 1 et 2 dans la figure 32). Avec cette différence d'indice et en prenant en compte la taille exceptionnelle du cœur, une fibre effectivement monomode peut devenir multimode. Un schéma illustratif de la variation du profil d'indice dans une A-LPF est montré dans la figure 33. On peut voir clairement comment l'indice de réfraction change de manière quadratique dans le cœur et logarithmique ailleurs. Il faut noter que cette image est réalisée pour donner une idée claire et visible sur le profil d'indice dans notre structure sous chargement thermique, mais les niveaux indicels présentés sont arbitraires.

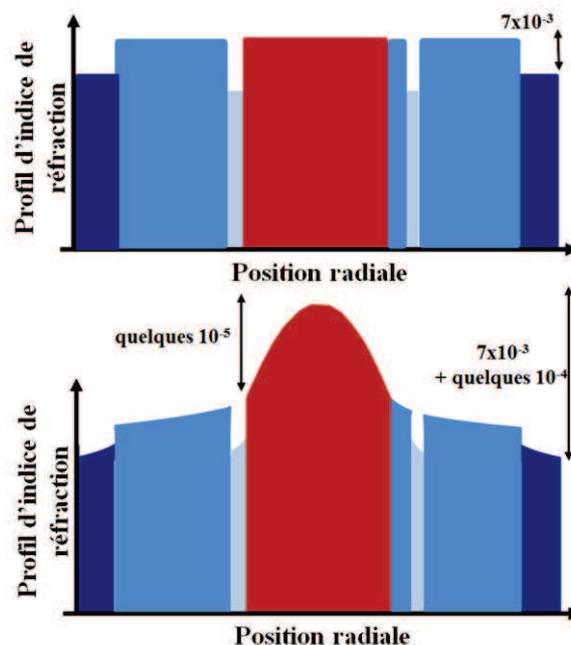


Figure 33 : Profil d'indice de réfraction d'une A-LPF sans (en haut) et avec (en bas) chargement thermique.

Dans une fibre microstructurée à très grande aire modale comme les LPF, DMF et A-LPF, les indices de réfraction des matériaux qui constituent le cœur et le "fond" de la gaine doivent être parfaitement égaux pour avoir une bonne délocalisation des HOMs due à la disposition des inclusions bas indice. Un léger excès d'indice de réfraction dans le cœur va re-confiner les HOMs et dégrader la qualité du faisceau émis (de la même manière une légère dépression d'indice dans le cœur va déconfiner le mode fondamental et affecter l'efficacité de la fibre). Comme la charge thermique apporte un excès d'indice dans la partie centrale de la fibre, elle va provoquer un reconfinement des HOMs. Il est donc particulièrement intéressant de concevoir une structure qui permet de garder une bonne délocalisation des modes d'ordre supérieur même sous un fort chargement thermique.

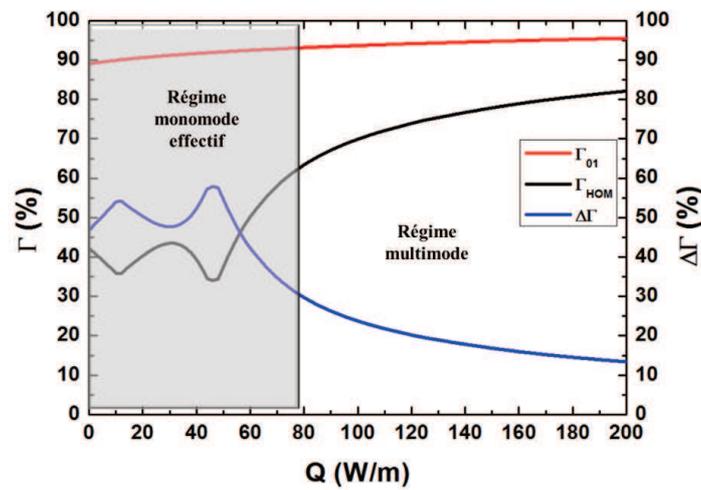
III.3.3. Comparaison d'une structure LPF et A-LPF sous chargement thermique

La modification de l'indice de réfraction sous l'influence de chaleur renforce le recouvrement des modes avec le milieu due au gradient d'indice supplémentaire induit à l'intérieur du cœur. Ce changement augmente le recouvrement des HOMs avec le milieu à gain. Nous avons repris ici les deux structures LPF et A-LPF présentées précédemment dans la figure 17 (pour une valeur de pitch de $45\mu\text{m}$) et nous avons réalisé une étude numérique comparative permettant d'observer leur capacité à toujours délocaliser les HOMs en présence d'un chargement thermique (Q) variant de 0 jusqu'à 200W/m . Cette étude numérique est faite pour $\lambda = 2\mu\text{m}$. Pour chaque valeur de Q , le contenu modal a été étudié en calculant le facteur de recouvrement des 100 premiers modes avec la zone de gain. Les mêmes critères que ceux définis dans le paragraphe II.1 ont été utilisés dans cette partie pour définir le régime monomode. Pour rappel, on considère que l'on a un comportement quasi-monomode lorsque le recouvrement du mode fondamental avec la zone de gain est supérieur à 80% et lorsque la discrimination modale est supérieure à 30% ($\Gamma_{01} > 80\%$, $\Delta\Gamma > 30\%$). Deux nouveaux paramètres sont introduits ici afin de comparer la performance des structures étudiées. Le premier paramètre est noté Q_{max} et représente la valeur du chargement thermique maximum pouvant être supporté par la structure pour garder une propagation quasi-monomode. Autrement dit, pour $Q > Q_{\text{max}}$, la discrimination modale devient inférieure à 30%. Q_{max} correspond donc au seuil du régime multimode. Le deuxième paramètre est noté Q_{min} et représente la valeur de chargement thermique nécessaire pour que le mode fondamental soit suffisamment confiné dans le cœur afin d'être bien amplifié durant sa propagation (i.e. avoir un recouvrement supérieur à 80%). Q_{min} représente donc le seuil de fonctionnement de la fibre. Ces critères sont définis arbitrairement et qu'ils ne reflètent pas les seuils exacts d'apparition des IM. Ces seuils dépendent des conditions d'utilisation des fibres. Ils ne sont pertinents que pour comparer des fibres entre elles.

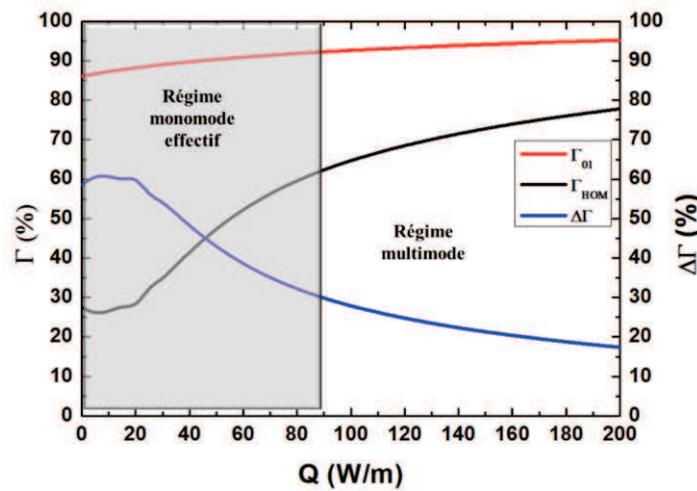
L'évolution du facteur de recouvrement avec la zone de gain, d'une part du mode fondamental et d'autre part du mode d'ordre supérieur le plus confiné dans le cœur, en fonction du chargement thermique Q apportée à la structure est représentée dans les deux graphiques de la figure 34. Sur ces mêmes graphiques, l'évolution de la discrimination modale en fonction de Q est aussi représentée. Dans les deux structures, LPF (figure 34.a) et A-LPF (figure 34.b), le pitch est de $45\mu\text{m}$ (équivalent à un cœur autour de $75\mu\text{m}$) et la longueur d'onde est de $2\mu\text{m}$.

Dans les deux structures étudiées ici, les facteurs de recouvrement des modes avec la zone de gain augmentent avec le chargement thermique (courbes noire et rouge dans la figure 34). Cette augmentation est due à la variation du profil d'indice de réfraction expliquée

précédemment. Dans le cas de la LPF (figure 34.a), une compétition entre deux modes d'ordre supérieur (mode LP_{11} et mode LP_{12}) apparaît pour un faible chargement thermique ($Q < 50W/m$) avant que le mode LP_{11} prenne le dessus et devienne le mode d'ordre supérieur le plus confiné [Stutzki14] lorsque $Q > 50W/m$ (courbe noire dans la figure 34.a). Cela explique que les courbes n'évoluent pas de façon régulière dans cette zone. Il est à noter que ce phénomène peut être aussi observé plus tard dans ce manuscrit, dans la figure 39, où la distribution d'intensité des modes est tracée en fonction de Q . La discrimination modale représentée en bleu dans la figure 34.a diminue progressivement avec l'augmentation du chargement thermique, à cause du confinement des HOMs dans la zone de gain, jusqu'à atteindre une valeur inférieure à 30% pour une valeur de Q de 80W/m. Donc le seuil de régime multimode (Q_{max}) dans une LPF45 à $2\mu m$ est de 80W/m. La zone grise représente la bande de fonctionnement où la fibre a un comportement quasi-monomode. C'est-à-dire quand Q est plus grand que Q_{min} et plus petit que Q_{max} .



(a)



(b)

Figure 34 : Graphiques représentent l'évolution des facteurs de recouvrement du mode fondamental (en rouge) et du mode d'ordre supérieur le plus confiné (en noir) avec la zone de gain, ainsi que l'évolution de la discrimination modale (en bleu) en fonction du chargement thermique dans (a) une LPF et (b) une A-LPF ($\Lambda = 45\mu m$, $\lambda = 2\mu m$). L'encart gris représente la zone de fonctionnement monomode de la structure (c'est-à-dire pour $\Delta\Gamma > 30\%$).



Passons maintenant à la structure A-LPF dont les résultats obtenus sont représentés sur la figure 34.b. Les facteurs de recouvrement et la discrimination modale ont la même tendance que celle déjà observée dans le cas de la LPF. En comparant les deux graphes, on peut remarquer que la zone grise dans la figure 34.b est plus large. L'élargissement de cette dernière observée ici montre que la valeur de Q_{\max} dans une A-LPF est plus importante que dans une LPF. En effet le paramètre Q_{\max} dans une A-LPF vaut 90W/m, soit une valeur 12,5% plus grande que dans le cas de la LPF standard. Ces résultats montrent que la structure aperiodique a une meilleure capacité à délocaliser les HOMs sous la présence de chargement thermique en comparaison de la structure LPF. Autrement dit la structure A-LPF peut supporter une quantité de chargement thermique plus importante avant d'engendrer l'apparition du régime multimode. Par conséquent, les instabilités modales transverses dans une A-LPF seront atteintes à des niveaux de puissance plus élevés que dans une LPF. Néanmoins, il est important de rappeler que nos critères de comparaison permettent de comparer les propriétés de confinement de fibres optiques mais ne donnent en aucun cas une estimation quantitative des seuils des instabilités modales dans les architectures de lasers ou d'amplificateurs utilisant ces mêmes fibres.

Dans notre structure A-LPF, l'asymétrie de la microstructuration de la gaine fait que la distance entre deux inclusions bas indice « diamétralement » opposé délimitant le cœur de la fibre varie suivant l'axe de mesure utilisé. Pour cela, nous préférons donner le diamètre du champ de mode (MFD) guidé ou bien son aire effective plutôt que de parler de diamètre de cœur ou de diamètre de champ de mode. L'aire effective du mode guidé est calculée en utilisant l'équation 3.14 et il est alors possible de calculer un MFD équivalent en utilisant l'équation 3.15.

$$MFA = \frac{(\iint_{\text{totale}} E^2)^2}{\iint_{\text{totale}} E^4} \quad (3.14)$$

$$MFD = 2 \sqrt{\frac{MFA}{\pi}} \quad (3.15)$$

Le MFD ou l'aire effective du mode fondamental sont des caractéristiques très importantes dans les fibres utilisées pour la montée en puissance. Leur augmentation permet de repousser le seuil d'apparition des effets non linéaires. La potentielle variation du MFD avec le chargement thermique dans une LPF et dans une A-LPF est donc une information très importante. L'évolution du MFD du mode fondamental calculée en fonction du chargement thermique variant entre 0 et 200 W/m est représentée sur la figure 35 pour les deux types de structures. Dans les deux cas, le MFD diminue avec Q à cause de la variation quadratique de l'indice de réfraction dans le cœur, qui limite l'étalement du champ. A 0W/m le MFD dans une A-LPF (ligne rouge) est plus grand que dans une LPF (ligne noire). Cette différence est due à l'utilisation de cinq inclusions bas-indice au lieu de six pour délimiter le cœur. Ces résultats concordent avec ceux de la figure 34. Dans la figure 35, les parties en trait plein correspondent aux valeurs de MFD calculées dans la zone de fonctionnement optimale des deux structures (zone de régime quasi-monomode correspondant aux zones grisées de la figure 34). Les parties en trait pointillé correspondent quant à elles aux MFD calculés dans la zone du régime multimode. L'aire effective obtenue dans une LPF au seuil du régime multimode est de $2875\mu\text{m}^2$ et est quasiment identique à la valeur obtenue dans la A-LPF ($2843\mu\text{m}^2$).



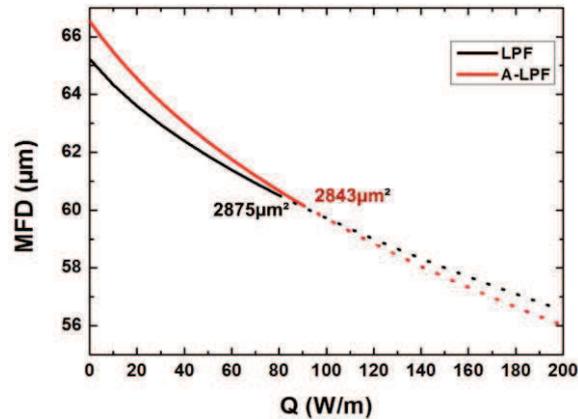


Figure 35 : Evolution du diamètre du champ du FM en fonction du chargement thermique dans une LPF (en noir) et une A-LPF (en rouge). Le régime monomode est représenté en trait plein et le régime multimode est représenté en trait pointillé. La valeur de l'aire effective du FM calculée à Q_{max} est ajoutée pour chaque structure. Avec $\Lambda = 45\mu\text{m}$ et $\lambda = 2\mu\text{m}$.

Le but maintenant est d'améliorer encore la performance de notre structure. C'est-à-dire d'optimiser la structuration de la gaine afin de garder le mode LP_{11} en dehors du cœur pour la valeur de chargement thermique la plus élevée possible (autrement dit repousser fortement la valeur de Q_{max}).

III.3.4. Optimisation de la structure A-LPF

Dans la structure A-LPF proposée dans la section II.1, le seuil du régime multimode à $\lambda = 2\mu\text{m}$ pour un cœur de $75\mu\text{m}$ (pitch de $45\mu\text{m}$) est de 90W/m (cf. Fig. 34). Cette valeur est 12,5% plus importante que la valeur obtenue dans une fibre standard LPF (80W/m) de dimension comparable. Cette valeur est limitée par le re-confinement du mode LP_{11} dans le cœur. Donc, pour essayer de repousser la valeur du paramètre Q_{max} , le confinement du mode LP_{11} a été étudié en fonction du chargement thermique appliquée dans la structure A-LPF. A titre d'exemple la figure 36.a et 36.b montre la distribution d'intensité du mode LP_{11} (suivant les deux axes de polarisation) pour un Q de 30W/m . Les trajets suivis par ce mode, à travers les canaux de fuite faits en silice dopée aluminium (correspondant au matériau de fond de la gaine optique), pour se rapprocher du cœur sont représentés par des flèches grises sur la figure 36.c. En outre, afin d'évacuer ce mode vers l'extérieur du cœur, les étapes suivantes ont été réalisées :

- Distinguer les inclusions bas-indices qui participent au confinement du mode LP_{11} pendant la montée en chargement thermique en définissant les zones où le mode LP_{11} se localise (flèches grises dans la figure 36.c).
- Changer la position de ces inclusions dans le but d'élargir les zones de fuite et avoir une délocalisation plus efficace du mode LP_{11} . Ce changement est marqué à l'aide des flèches jaunes dans la figure 36.d.
- Eliminer les inclusions bas-indices qui sont très loin de la zone d'interaction avec le champ, ce qui nous permet de simplifier la microstructuration. Ces inclusions sont marquées par des cercles blancs sur la figure 36.d.
- Ajouter une inclusion (marquée par un cercle noir sur la figure 36.d) d'indice bas afin de préserver un bon recouvrement du mode fondamental avec le milieu à gain.

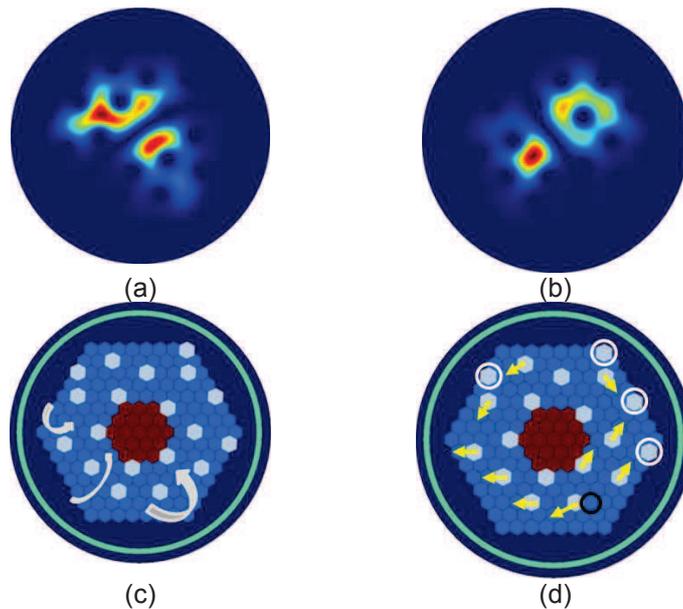


Figure 36 : (a et b) Distribution d'intensité calculée du mode LP_{11} suivant les deux axes de polarisation dans la structure A-LPF pour un chargement thermique valant $Q = 30 \text{ W/m}$. (c et d) Synthèse des étapes suivies pour optimiser la structure A-LPF.

Donc, notre structure optimisée appelée structure complètement apériodique (FA-LPF) est composée de 169 cellules. Parmi ces cellules, on a :

- 19 cellules dopées avec des ions de terres rares qui forment le milieu à gain de la fibre.
- 134 cellules dopées passivement avec un indice de réfraction égal à l'indice du cœur actif (pour un chargement thermique nul).
- 16 inclusions bas-indice (silice dopée ou silice pure selon les cas) placées d'une manière permettant de réduire le recouvrement du mode LP_{11} avec le cœur.

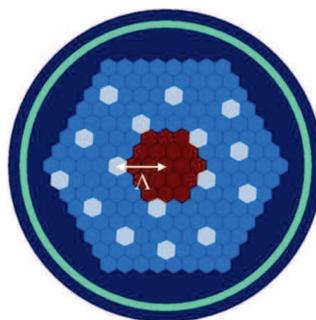


Figure 37: Section transverse modélisée d'une FA-LPF.

III.3.4.1. Performance de la structure FA-LPF sous chargement thermique

Dans cette partie, l'étude du contenu modal de la structure de fibre FA-LPF est réalisée jusqu'à une valeur de chargement thermique de 200 W/m . Le calcul a été mené sur les 100 premiers modes et ce pour une longueur d'onde de $2 \mu\text{m}$. Les mêmes critères numériques que ceux détaillés précédemment ont été utilisés pour évaluer la performance de la structure FA-LPF : un facteur de recouvrement du mode fondamental supérieur à 80% (définissant le paramètre Q_{\min}) et une discrimination modale supérieure ou égale à 30% (définissant le paramètre Q_{\max}). Ici aussi le pitch est fixé à $45 \mu\text{m}$, ce qui conduit à un cœur de $75 \mu\text{m}$.

Pour une fibre froide, c'est-à-dire sans chargement thermique, le mode LP₁₁ est complètement délocalisé vers l'extérieur du cœur et son recouvrement avec la zone du cœur est inférieur à 16%. Sa distribution d'intensité est montrée dans la figure 39 pour un Q de 0W/m.

On constate qu'au cours de cette augmentation de la valeur de chargement thermique, le recouvrement de ce mode LP₁₁ avec le cœur augmente. En comparant les valeurs de Γ_{11} à chaque valeur de Q dans une FA-LPF avec celles d'une LPF et A-LPF, on peut conclure facilement que la structure FA-LPF réduit le confinement du mode LP₁₁.

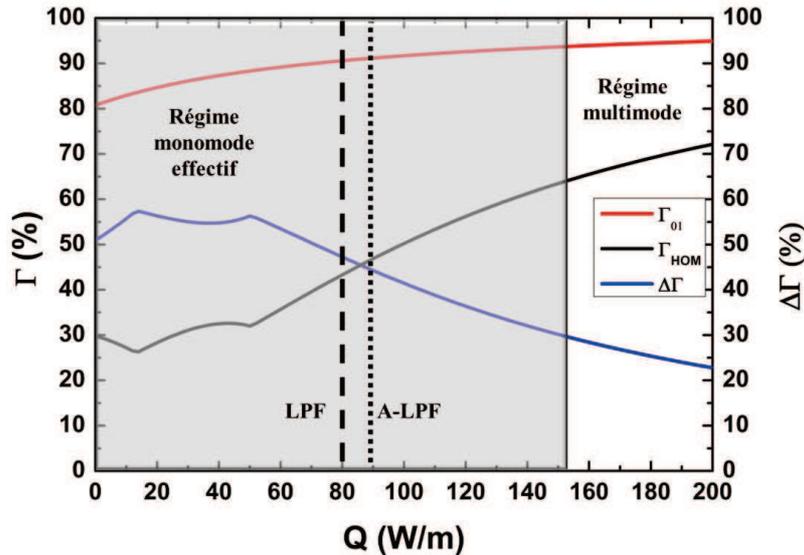


Figure 38 : Evolution du facteur de recouvrement du mode fondamental (en rouge), du mode d'ordre supérieur le plus confiné (en noir) et de la discrimination modale (en bleu) dans une FA-LPF en fonction du chargement thermique. La zone grise représente la zone de fonctionnement monomode (c'est-à-dire pour $\Delta\Gamma > 30\%$). De plus, le seuil du régime multimode est représenté en ligne discontinue pour une LPF, et en ligne pointillée pour une A-LPF. Avec $\Lambda = 45\mu\text{m}$ et $\lambda = 2\mu\text{m}$.

Pour une meilleure compréhension, les évolutions du facteur de recouvrement du HOM le plus confiné et de la discrimination modale sont tracées en fonction du chargement thermique de la même manière que nous l'avons déjà vu sur la figure 34. Les courbes illustrées ici dans la figure 38 possèdent la même tendance que les courbes présentées dans la figure 34. Les facteurs de recouvrement du mode fondamental et du mode d'ordre supérieur le plus confiné dans la zone de gain augmentent sous l'influence du chargement thermique, et réciproquement la discrimination modale décroît. On constate cependant que le mode fondamental est un peu moins confiné dans le cœur de la fibre par rapport à la structure A-LPF, ceci venant de la grande distance entre les inclusions d'indice bas qui entourent le cœur. Cette réduction de confinement du FM est rapidement compensée quand une certaine quantité de chaleur se génère dans la fibre. En regardant l'évolution de la discrimination modale (courbe bleue sur la figure 38), une amélioration très marquante de la valeur du paramètre Q_{max} est observée. Dans cette structure FA-LPF, $\Delta\Gamma$ devient en effet inférieur à 30% quand la valeur du chargement thermique dépasse 152W/m. Ceci correspond à une valeur 68% plus grande que celle obtenue avec la structure A-LPF et 90% plus grande que celle obtenue avec la structure LPF. Donc la structure FA-LPF offre une très large bande de fonctionnement monomode due à la structuration originale de sa gaine.

Afin de comparer les trois structures LPF, A-LPF, FA-LPF d'une façon simple quant à leur capacité à repousser le re-confinement du mode LP_{11} avec l'augmentation du chargement thermique, la distribution de l'intensité du mode LP_{11} a été calculée dans chaque structure et ce pour différentes valeurs du chargement thermique. La figure 39 synthétise ces calculs. On rappelle que la distribution de l'intensité est calculée dans des fibres ayant un pitch de $45\mu\text{m}$, équivalent à un cœur autour de $75\mu\text{m}$, et à une longueur d'onde de $2\mu\text{m}$. La comparaison est faite sur des valeurs de chargement thermique de 0, 30, 60, 90, 120, 150, et 180W/m . De plus, le seuil du régime multimode (Q_{max}) qui correspond à chaque structure est clairement indiqué sur la figure 39 par la présence d'une étoile. On voit clairement que la structure FA-LPF a une capacité notable à délocaliser efficacement le mode LP_{11} même pour des valeurs de chargement thermique très importantes.



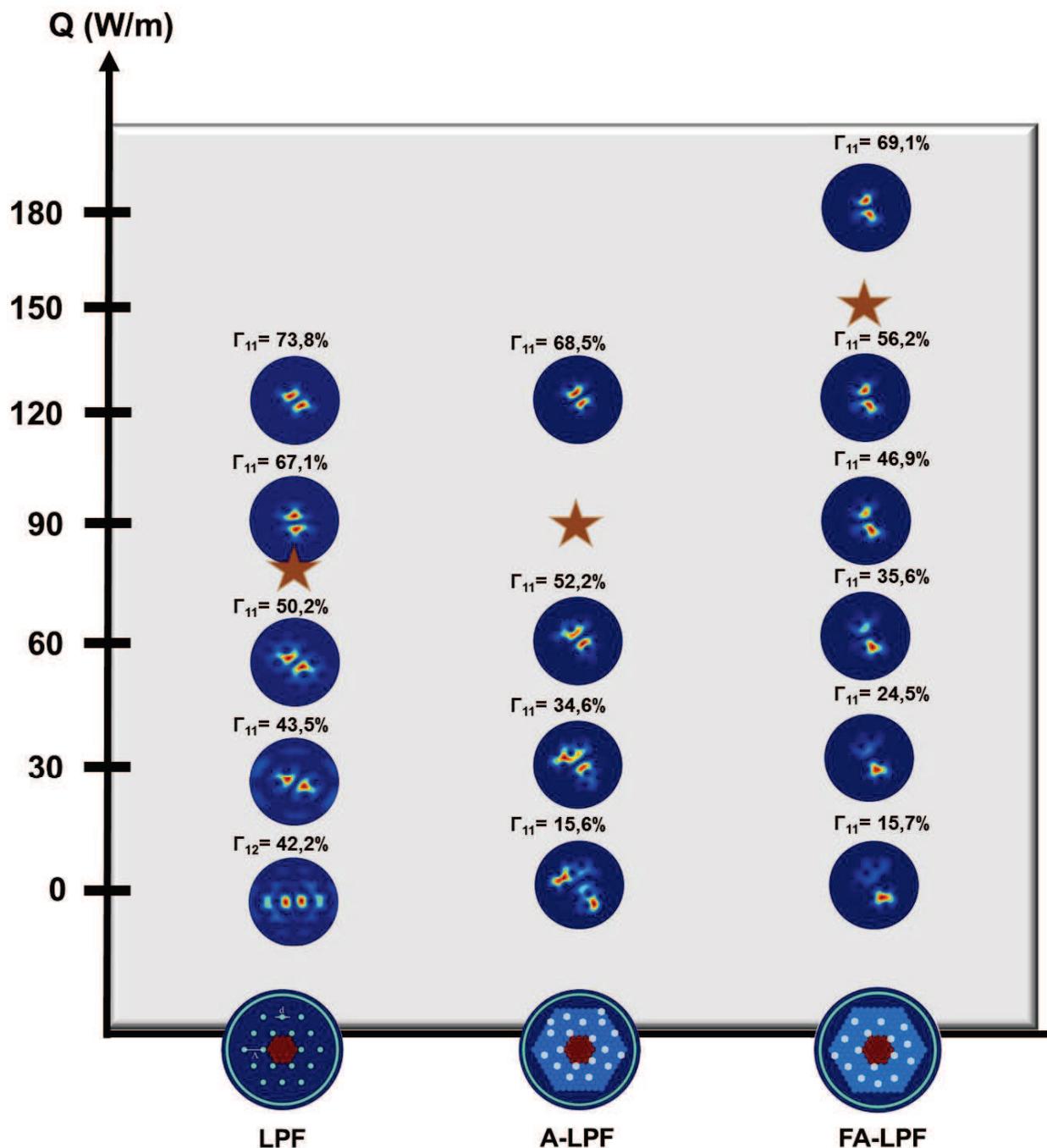


Figure 39 : Comparaison faite entre les 3 architectures de fibre (LPF, A-LPF et FA-LPF) portant sur la distribution de l'intensité du champ électrique du mode LP₁₁ en fonction du chargement thermique appliqué. Pour chaque distribution de l'intensité du mode LP₁₁ simulée, le facteur de recouvrement du mode LP₁₁ avec la zone de gain (rappelée en rouge dans les profils d'indice des 3 structures) est également calculé. La valeur de Q_{max} pour chacune des structures est symbolisée par une étoile. Le pitch ici est de 45µm et la longueur d'onde est de 2µm.

L'étude comparative menée montre clairement que l'architecture FA-LPF supporte des valeurs de chargement thermique plus importantes que la structure A-LPF tout en conservant une propagation monomode effective. Nous avons donc choisi, suite à cette étude, de porter tous nos efforts à partir de maintenant sur cette architecture FA-LPF. C'est

donc cette structure que l'on comparera dorénavant à la fibre de référence (LPF) qui représente à ce jour l'état de l'art des fibres à très large aire modale.

Le mode fondamental guidé dans l'architecture FA-LPF est légèrement moins confiné que celui guidé dans une structure LPF standard, ceci s'expliquant simplement par la présence de cinq inclusions délimitant le cœur au lieu de six. Cette caractéristique se retrouve aussi en comparant les facteurs de recouvrement du FM avec la zone de gain dans les deux structures (cf. figure 34.a et figure 38). Il est à noter cependant que même en l'absence d'un chargement thermique ($Q = 0\text{W/m}$), le mode fondamental a suffisamment de recouvrement avec le milieu à gain ($\Gamma_{01} > 80\%$) pour être bien amplifié durant sa propagation. La figure 40 compare l'évolution du MFD du mode fondamental guidé dans chacune des deux structures (FA-LPF et LPF) en fonction du chargement thermique appliquée à la fibre. Lorsque le chargement thermique croît, le mode fondamental se confine beaucoup plus rapidement dans le cœur de la FA-LPF que dans celui de la LPF. Ce phénomène se traduit par une diminution du MFD de ce mode autrement dit par une diminution de son aire effective. On constate toutefois que, quel que soit le chargement thermique considéré, l'aire effective du FM est supérieure dans le cas de la structure FA-LPF.

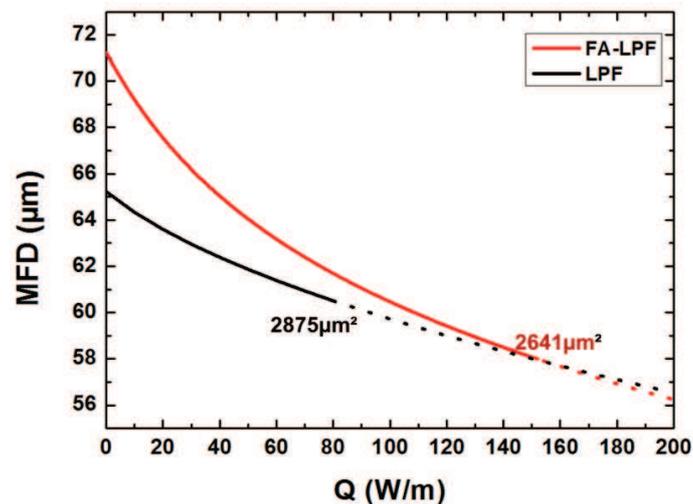


Figure 40 : Evolution du diamètre du champ du FM guidé dans une structure LPF (en noir) et dans une structure FA-LPF (en rouge) en fonction du chargement thermique. Le régime monomode est représenté en trait plein et le régime multimode est représenté en trait pointillé. La valeur de l'aire effective du FM calculée à Q_{\max} est ajoutée pour chaque structure. Avec $\Lambda = 45\mu\text{m}$ et $\lambda = 2\mu\text{m}$.

III.3.5. Etude suivant la longueur d'onde et les dimensions

Dans les parties précédentes, l'étude théorique comparative menée entre les différentes structures a été faite pour une seule longueur d'onde et une seule dimension de cœur ($\lambda = 2\mu\text{m}$ et $\Lambda = 45\mu\text{m}$ correspond à un D_c équivalent de $75\mu\text{m}$). Afin de montrer la versatilité de notre architecture FA-LPF, nous avons calculé le paramètre Q_{\max} dans les structures LPF et FA-LPF pour une longueur d'onde de travail variant de 800nm à 2200nm avec un pas de 200nm . Le pitch des structures reste invariant et égal à $45\mu\text{m}$. En raison de l'étalement du champ, le confinement des HOMs décroît lorsque la longueur d'onde augmente. Ainsi, le seuil de régime multimode augmente avec la longueur d'onde comme le montre la figure 41. On constate aussi sur cette même figure que la valeur du paramètre Q_{\max} est toujours plus importante dans l'architecture FA-LPF que dans la structure LPF (quasiment deux fois plus élevée) et ce indépendamment de la longueur d'onde de travail.

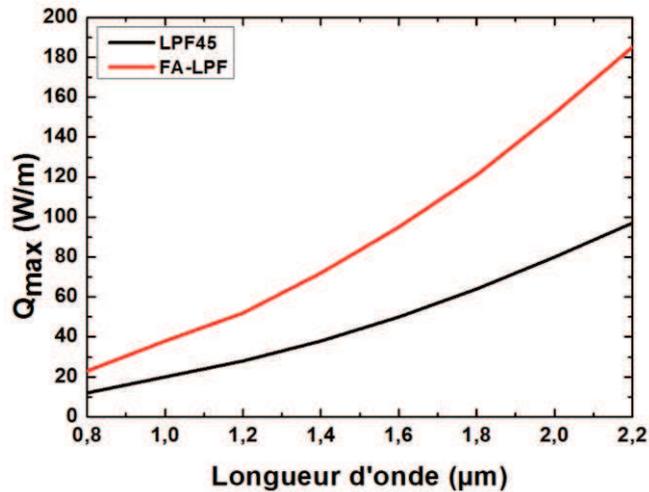
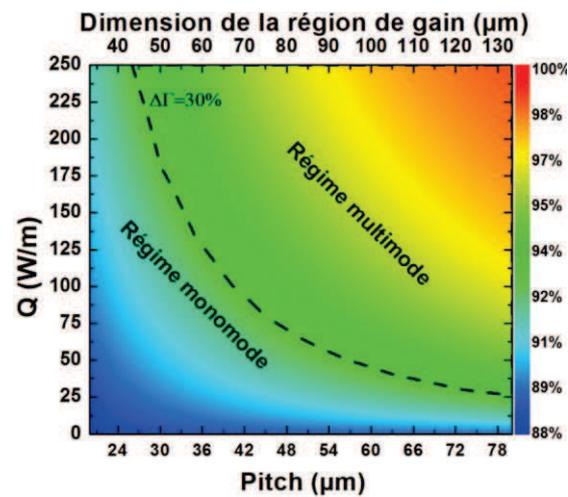
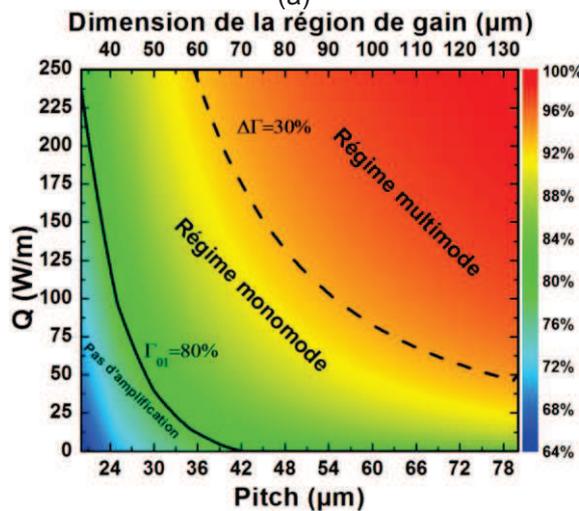


Figure 41 : Calcul de la valeur du seuil d'apparition du régime multimode (défini par le paramètre Q_{max}) en fonction de la longueur d'onde de travail dans une architecture FA-LPF (ligne rouge) et une structure LPF (ligne noire). Le pitch dans les deux structures est fixé à $45\mu\text{m}$.



(a)



(b)

Figure 42 : Cartographies 3 D de la variation du Γ_{01} avec le chargement thermique et la taille de la zone active dans une (a) LPF et (b) FA-LPF. Les lignes continues et discontinues définies la zone où le régime de fonctionnement de la fibre est monomode, c'est-à-dire entre Q_{min} et Q_{max} . La longueur d'onde d'opération est de $2\mu\text{m}$.



La dernière étude numérique réalisée sur la structure FA-LPF est présentée dans la figure 42. Dans cette cartographie en 3D, la variation du facteur de recouvrement du mode fondamental (Γ_{01}) en fonction d'une part du chargement thermique et d'autre part du pitch variant entre 20 et 80 μm est calculée pour une longueur d'onde de 2 μm , dans une structure LPF (figure 42.a) et dans une structure FA-LPF (figure 42.b). De plus, les valeurs limites Q_{\min} ($\Gamma_{01} > 80\%$) et Q_{\max} ($\Delta\Gamma > 30\%$) qui définissent théoriquement le régime de fonctionnement quasi-monomode sont mises en évidence par des lignes noires continues et discontinues respectivement.

La comparaison entre les deux cartographies nous permet de déduire que la structure FA-LPF est adaptable à différente taille de cœur, et le seuil du régime multimode est toujours plus élevé que celui obtenu dans une structure LPF classique. Cependant, dans les structures FA-LPF présentant des dimensions de zone de gain inférieure à 55 μm , on constate que le mode fondamental peut ne pas être suffisamment confiné. Par contre ce problème peut être résolu en augmentant le chargement thermique au sein de la fibre, c'est-à-dire en augmentant la puissance de pompage (quelques dizaines de Watts en fonction des propriétés de la fibre).

III.4. Pré-compensation des effets thermiques dans une FA-LPF

Dans la partie précédente, la structure de la gaine a été optimisée afin d'améliorer la délocalisation des HOMs sous chargement thermique, donc dans le but de repousser le seuil d'apparition des instabilités modales transverses. Toutefois, les modes d'ordre supérieur pourront être à nouveau guidés dans le cœur de la fibre à cause de la variation du profil d'indice de réfraction apportée par le chargement thermique induit dans la fibre. Réfléchir à l'ajout d'une structuration indiciel du cœur semble alors être indispensable afin de délocaliser encore plus fortement ces modes d'ordre élevé.

La première idée qui vient à l'esprit est la fabrication d'un cœur avec un profil d'indice ayant exactement la forme opposée (cf. figure 43.b) à celle induite à cause du chargement thermique (augmentation quadratique de l'indice, cf. figure 43.a).



Figure 43 : (a) Variation de l'indice de réfraction dans un cœur sous chargement thermique, et (b) le profil d'indice à réaliser durant la fabrication.

Le niveau de contrôle de la variation de l'indice de réfraction requis dans ce cœur serait alors bien inférieur à 1×10^{-5} alors que les technologies CVD qui permettent de réaliser des gradients d'indice ne peuvent guère dépasser 1×10^{-4} . Cela nous oblige à utiliser un profil en forme d'escalier et non pas parabolique, la "hauteur" de chaque marche devant être contrôlable technologiquement et du coup d'environ 1×10^{-4} . En effet, si on regarde la manière dont est conçu le cœur d'une FA-LPF, on peut distinguer trois zones différentes, notées de 1 à 3 en fonction de la distance au centre du cœur de la fibre. Ces 3 zones sont représentées dans la figure 44. Dans ce premier exemple de structuration du cœur, la zone 1 est dépressée de 1×10^{-4} vis-à-vis de l'indice du fond de la gaine passive (constituant ici

notre référence), la zone 2 étant quant à elle dépressée de 2×10^{-4} et la cellule centrale constituant simultanément le centre du cœur et la zone 3 étant dépressée de 3×10^{-4} . Le problème avec une telle structure dite « en marche d'escalier » est le faible recouvrement du mode fondamental avec le milieu à gain lorsque la fibre est froide puisque celle-ci se comporte comme un anti-guide. Rappelons les deux critères numériques que nous nous fixons pour définir le régime monomode : un facteur de recouvrement du mode fondamental supérieur à 80% ($\Gamma_{01} > 80\%$) et une discrimination modale supérieure à 30% ($\Delta\Gamma > 30\%$). Prenons le cas d'une FA-LPF avec un pitch de $45\mu\text{m}$, et supposons que son cœur possède le même profil d'indice que la figure 44. A une longueur d'onde de $2\mu\text{m}$, le facteur de recouvrement du mode fondamental ne dépasserait pas 80% avant que le chargement thermique devienne supérieur à 190W/m . Pour atteindre un tel niveau de chargement thermique à $2\mu\text{m}$ et en faisant l'hypothèse grossière que seul le défaut quantique contribue à l'échauffement thermique (en supposant aussi que 60% de la puissance absorbée est libérée comme chaleur), la fibre devrait alors absorber une puissance de 316W à 790nm . En outre, pour des valeurs de chargement thermique inférieures à 190W/m , l'indice effectif du mode fondamental est suffisamment faible pour que ce mode soit couplé avec des modes de gaine, donc il ne peut pas être bien guidé dans le cœur. De plus, comme les indices de réfraction des zones 1 et 2 sont plus élevés que celui de la zone 3, et comme la distribution d'intensité du mode LP_{11} est localisée dans ces zones périphériques, ce premier mode d'ordre supérieur va rapidement pouvoir être confiné (pour $Q=290\text{W/m}$). Tout ceci conduit alors à l'obtention d'une bande de fonctionnement de 100W/m , ce qui est une valeur plus faible que celle obtenue avec une FA-LPF ayant un profil de cœur homogène et de même indice que le matériau de fond de la gaine (152W/m , cf. fig. 38). L'approche intuitive présente donc des limites et nous allons, dans le prochain paragraphe, changer la méthode de travail en ciblant des modifications du cœur en fonction de leur impact sur le confinement des champs. Il s'agira de repousser le seuil d'apparition du régime multimode tout en gardant un confinement élevé du mode fondamental.

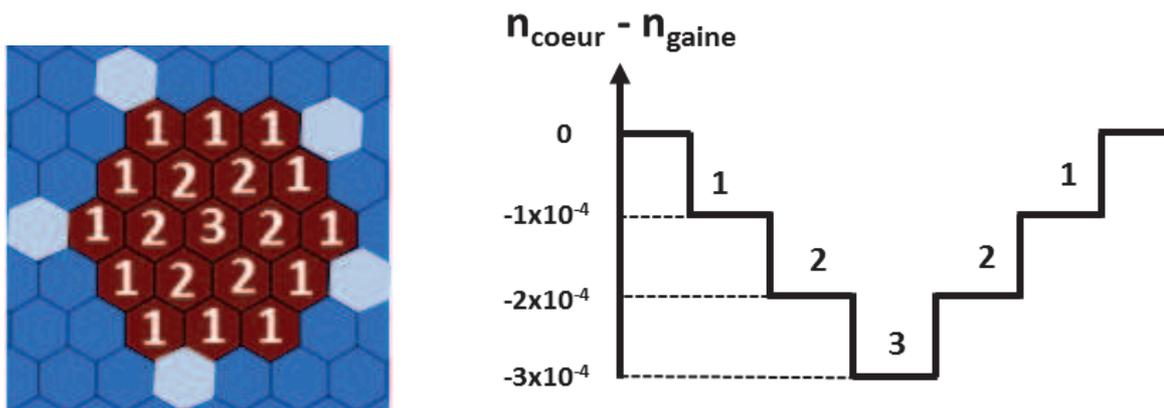


Figure 44 : un zoom sur le cœur d'une FA-LPF, à gauche, et le profil d'indice de réfraction en forme d'escalier, à droite.

III.5. Structuration du cœur : principe et résultats

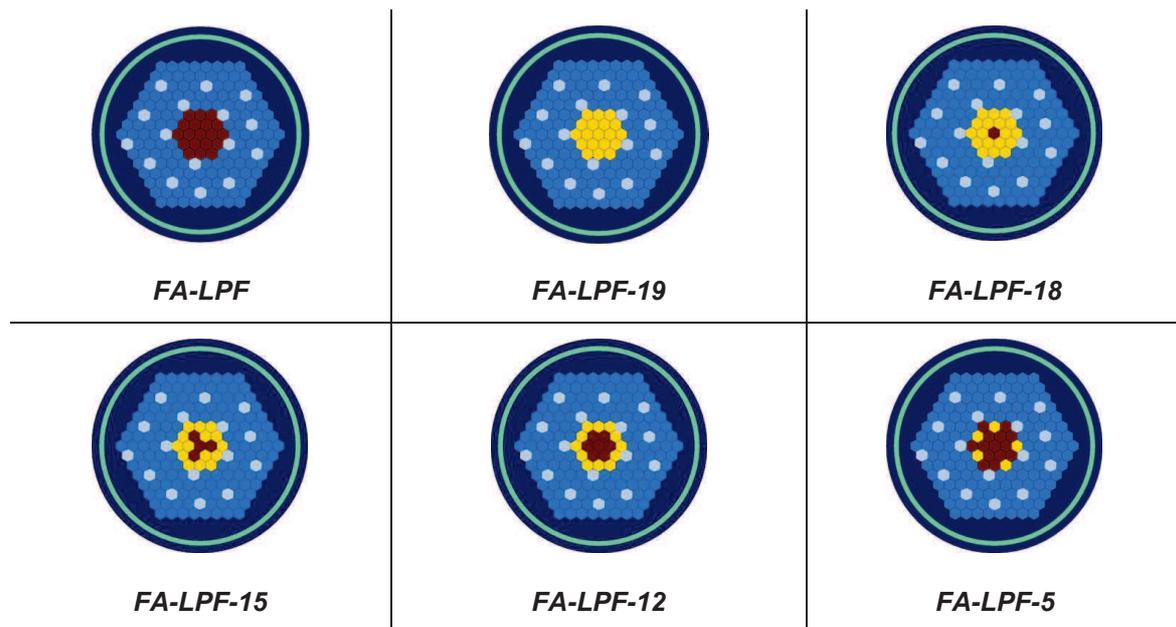


Figure 45 : Les différents modèles à pré-compensation d'indice proposés. Les inclusions en jaune ont un indice de réfraction inférieur de 1×10^{-4} en comparaison avec l'indice de la silice dopée passivement représentée en bleu. Rappelons que l'indice de la zone bleu est aussi égal à l'indice des cellules actives représentées en rouge. La zone de gain correspond dans tous les cas à l'association des cellules jaunes et rouges (dans ces cellules, le dopage en ions de terres rares est identique).

Plusieurs structures ont été étudiées en tenant compte des limites technologiques en terme de contrôle d'indice. Pour chacune, le seuil de confinement du mode fondamental et la plage d'utilisation (plage de valeurs de chargement thermique Q pour lesquelles un comportement monomode est possible) ont été évalués. Ces modèles sont nommés « FA-LPF- n » avec « n » le nombre de cellules dépressées dans le cœur (rappelons que le cœur est constitué de 19 cellules élémentaires). Il est important de préciser que, même dépressée, la cellule élémentaire considérée appartenant au cœur est toujours dopée avec des ions de terres rares (pas de modification de la concentration) et est partie prenante de la zone de gain. L'abaissement de l'indice de réfraction est obtenu en modifiant la part d'aluminium utilisé comme co-dopant.

Pour commencer, l'indice de réfraction des 19 cellules formant le milieu à gain a été dépressé de 1×10^{-4} (cf. cellules jaunes de la structure FA-LPF-19 montrée sur la figure 45) par rapport à l'indice de la silice dopée Al^{3+} constituant le matériau de fond de la gaine optique (couleur bleue sur la figure 45). Pour une fibre avec un pitch de $45 \mu m$, et à une longueur d'onde de travail de $2 \mu m$, les facteurs de recouvrement des 100 premiers modes de cœur ont été calculés en suivant le même principe expliqué antérieurement. Pour cette structure FA-LPF-19, la valeur de Q_{min} obtenue (c'est-à-dire quand Γ_{01} devient supérieur à 80%) est de $88 W/m$ au lieu de $0 W/m$ pour la structure FA-LPF « classique » (prise comme référence ici). De plus, le seuil du régime multimode Q_{max} (au-delà duquel $\Delta\Gamma$ devient inférieur à 30%) est de $260 W/m$. Il est à noter que cette valeur est 1,7 fois plus grande que la valeur atteinte dans le cas de la FA-LPF « classique » ($Q_{max} = 152 W/m$). L'utilisation de cette structure demande la disponibilité d'une diode de pompe suffisamment puissante (puisque pour de faibles puissances de pompe la structure ne permet pas d'assurer le guidage du mode fondamental dans de bonnes conditions), mais elle permet d'accéder à des niveaux de puissance très élevés en assurant toujours l'émission du seul mode fondamental.

Les résultats obtenus pour toutes les structures étudiées sont représentés et comparés sur la figure 46. Q_{\min} est représenté par des carrés bleus et Q_{\max} par des cercles rouges. La plage d'utilisation pour laquelle la fibre autorise l'émission du seul mode fondamental correspond à la différence entre les deux valeurs limites, $\Delta Q = Q_{\max} - Q_{\min}$, et est symbolisée par des doubles flèches sur la figure 46. De plus, le résultat atteint par une LPF45 (fibre de référence commercialisée), pour laquelle Q_{\min} vaut 0W/m et Q_{\max} 80W/m, est aussi montré pour mettre en évidence la pertinence de nos modèles. Des résultats expérimentaux obtenus avec une FA-LPF dopée ytterbium ayant un cœur entièrement dépressé sont également présentés dans l'annexe 1. Ces derniers valident la pertinence de nos calculs et de l'approche théorique utilisée pour évaluer la performance des différentes structures.

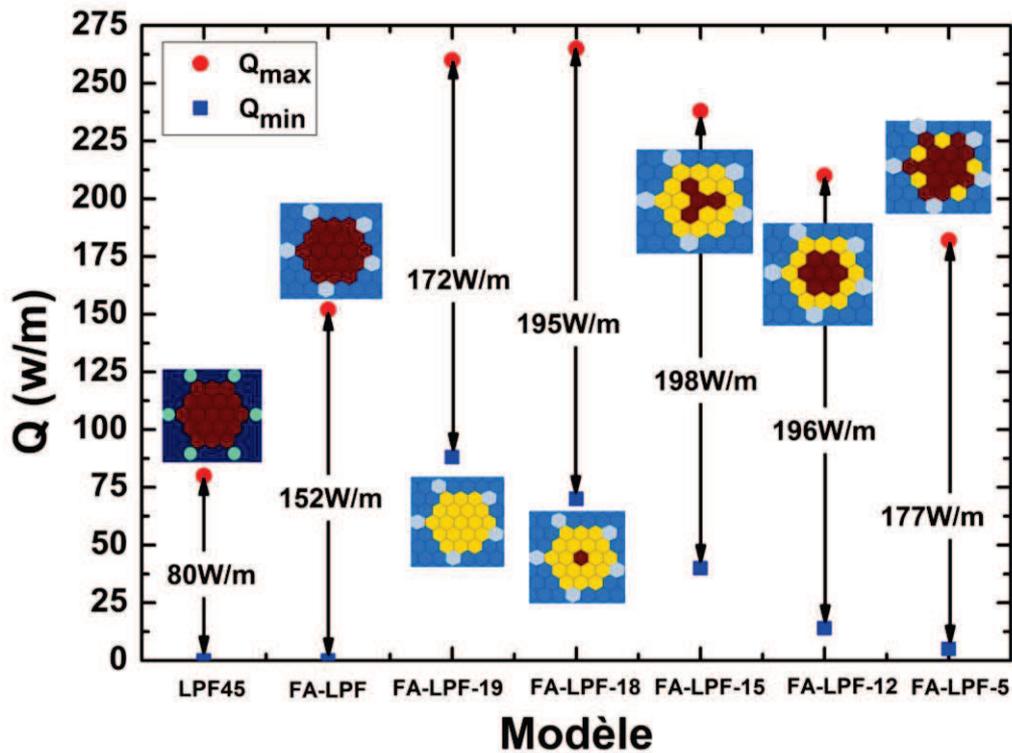


Figure 46 : Représentation graphique des différents résultats obtenus pour chaque exemple de structuration indiciaire du cœur proposé. Le seuil du régime monomode, Q_{\min} , est représenté par des carrés bleus et le seuil du régime multimode, Q_{\max} , est représenté par des cercles rouges. En outre, un zoom sur le design de la structure du milieu à gain est ajouté en insert pour chaque modèle. Les inclusions en jaune ont un indice de réfraction abaissé de 1×10^{-4} en comparaison de l'indice de la gaine optique. Le résultat obtenu avec la LPF air-silice est aussi montré. Le pitch ici est de $45 \mu\text{m}$ et la longueur d'onde est de $2 \mu\text{m}$.

Dans le but de diminuer la valeur de Q_{\min} et de garder la valeur de Q_{\max} la plus élevée possible, le nombre des cellules dépressées dans la zone de gain a été progressivement réduit (structure FA-LPF-19 \rightarrow structure FA-LPF-5) afin de déterminer les couronnes ou les cellules qui agissent principalement sur le confinement des modes d'ordre supérieur et non pas sur le mode fondamental. Dans le cas de la structure FA-LPF-18, la cellule élémentaire centrale du cœur a été conservée, autrement dit son indice n'est pas abaissé contrairement à celui des autres cellules élémentaires (cf. figure 45). On peut alors constater que cela a permis de diminuer la valeur de Q_{\min} jusqu'à 70W/m. De plus, la valeur de Q_{\max} a été

légèrement augmentée valant maintenant 265W/m. Ces résultats montrent que la dépression de la cellule centrale a seulement une influence sur le mode fondamental et non sur les modes d'ordre supérieur. Cela est relativement logique puisque le mode LP_{11} par exemple présente un faible recouvrement avec la cellule centrale. En observant les résultats obtenus avec les structures suivantes, on peut remarquer que les valeurs de Q_{\min} et de Q_{\max} diminuent progressivement en réduisant le nombre des inclusions dépressées au centre du cœur, jusqu'à avoir une valeur pour Q_{\min} de 5W/m avec la structure FA-LPF-5. Dans cette dernière fibre, le seuil du régime multimode est obtenu pour un chargement thermique de 182W/m et la largeur de la bande de fonctionnement de cette fibre vaut donc $\Delta Q = 177W/m$. Les cinq cellules dépressées ont toutes été placées sur la deuxième couche du cœur (couche la plus extérieure du cœur correspondant à la zone 1 dans la figure 44) et elles sont en outre positionnées entre les inclusions bas-indice appartenant à la gaine optique (inclusions de couleur bleu clair sur les figures 45 et 46) et délimitant le cœur en suivant la distribution du champ électrique du mode LP_{11} . Ces cinq inclusions permettent de diminuer l'indice effectif de ce mode d'ordre élevé et par conséquent de réduire son recouvrement avec le milieu à gain.

L'amplitude de la dépression utilisée précédemment (1×10^{-4}) est une valeur réaliste d'un point de vue technologique, c'est la plus faible qui peut être contrôlée par la méthode REPUSIL (cette méthode sera présentée dans le prochain chapitre). Donc rendre le processus de fabrication moins compliqué revient à assouplir la tenue de cette valeur limite par exemple en l'augmentant jusqu'à -2×10^{-4} . Cette dernière variation peut être contrôlée et mesurée plus facilement que la valeur de -1×10^{-4} . Les mêmes architectures présentées dans la figure 45 ont été à nouveau étudiées en faisant donc passer la valeur de la dépression des cellules concernées de -1×10^{-4} à -2×10^{-4} . Les résultats obtenus sont présentés dans la figure 47 (les cellules jaunes de la figure 45 sont remplacées ici par des cellules oranges). On peut remarquer que ces résultats ont la même tendance que ceux obtenus précédemment. La seule différence est que les valeurs de Q_{\min} et Q_{\max} sont plus élevées, on observe une sorte de translation des bandes de fonctionnement optimum vers des valeurs de charge thermique plus grande. Ceci s'explique par le fait que les inclusions du cœur ayant un indice abaissé ont une influence plus importante sur les indices effectifs des modes de cœur et par conséquent sur le confinement du mode fondamental et des modes d'ordre supérieur.

Prenons, à titre d'exemple, le modèle FA-LPF-19 où le cœur est entièrement dépressé de 2×10^{-4} . Le seuil de fonctionnement de cette fibre est très haut et il faut que la charge thermique déposée dans la fibre dépasse 183W/m pour que le mode fondamental devienne suffisamment bien guidé afin d'être correctement amplifié. De plus, le seuil d'apparition du régime multimode est de 380W/m. La différence entre ces deux valeurs limites s'élève alors à 192W/m au lieu de 172W/m obtenu dans le cas précédent pour une dépression de 1×10^{-4} . Cela montre donc que l'abaissement de l'indice du cœur à 2×10^{-4} améliore encore la délocalisation des modes d'ordre supérieur sous chargement thermique.

Intéressons-nous maintenant à la structure FA-LPF-5. C'est cette dernière qui donne les meilleurs résultats en terme de seuil de fonctionnement car elle représente le Q_{\min} le plus faible, valant 9W/m. La largeur de bande de fonctionnement, ΔQ , pour cette structure, est de 194W/m avec un seuil de régime multimode calculé à 205W/m. Cette largeur de bande de fonctionnement monomode est ainsi 2,5 fois plus importante que celle accessible via une LPF air-silice standard (80W/m) de même dimension géométrique. Donc, on peut s'attendre



à ce que le seuil d'apparition des instabilités modales soit fortement repoussé dans cette fibre.

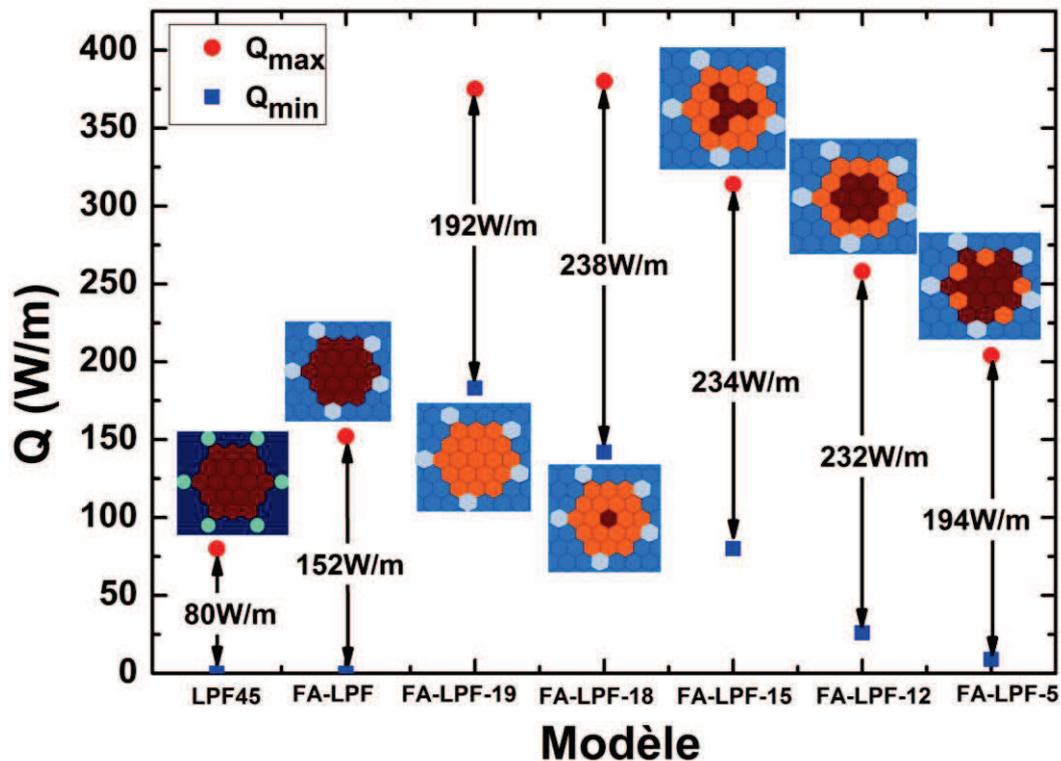


Figure 47 : Représentation graphique des différents résultats obtenus pour chaque exemple de structuration indicielle du cœur proposé. Le seuil du régime monomode, Q_{min} , est représenté par des carrés bleus et le seuil du régime multimode, Q_{max} , est représenté par des cercles rouges. En outre, un zoom sur le design de la structure du milieu à gain est ajouté en insert pour chaque modèle. Les inclusions en orange ont un indice de réfraction abaissé de 2×10^{-4} en comparaison de l'indice de la gaine optique. Le résultat obtenu avec la LPF air-silice est aussi montré. Le pitch ici est de $45 \mu m$ et la longueur d'onde est de $2 \mu m$.

Pour chacune des structures de fibre présentées sur la figure 47, l'évolution de l'aire effective du mode fondamental (MFA) en fonction du chargement thermique déposé est représentée dans la figure 48. Dans chacun des cas, les courbes en trait continu correspondent au calcul fait lorsqu'on se situe dans le régime monomode ($Q_{min} < Q < Q_{max}$) et les courbes en trait pointillé correspondent au calcul fait dans la zone où la propagation est multimode ($Q > Q_{max}$). Comme on pouvait s'y attendre, la variation de l'indice de réfraction de la structure du au chargement thermique provoque une diminution drastique du MFA et ce dans toutes les structures considérées. De plus, les valeurs des MFA calculées pour $Q = Q_{min}$ dans les structures FA-LPF-18, FA-LPF-15 et FA-LPF-12 sont plus faibles que les valeurs obtenues par les autres modèles. Cette diminution du MFA est liée directement au profil d'indice du cœur. En effet, pour ces trois modèles, la partie centrale du cœur a un indice plus élevé que la partie extérieure, ce qui tire le mode fondamental vers le centre du cœur et diminue son aire effective. En outre, en comparant les différentes courbes de la figure 48, on remarque que la structure FA-LPF-19 permet de conserver une valeur de MFA assez importante avec un seuil d'apparition du régime multimode très élevé. Malheureusement, cette fibre doit être bien chauffée pour que le mode fondamental soit bien confiné ($Q_{min} \gg 0$).

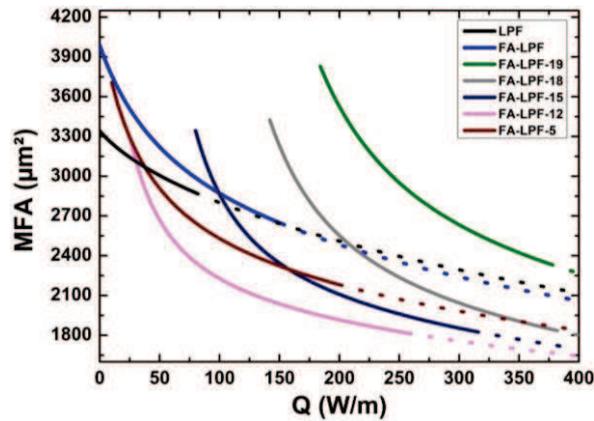


Figure 48 : Evolution de l'aire effective du mode fondamental en fonction du chargement thermique déposé pour chaque structure proposée. La dépression des cellules de cœur concernées est fixée à 2×10^{-4} . Les courbes en trait continu correspondent au calcul fait lorsqu'on se situe dans le régime monomode ($Q_{\min} < Q < Q_{\max}$) et les courbes en trait pointillé correspondent au calcul fait dans la zone où la propagation est multimode ($Q > Q_{\max}$). Le pitch ici est de $45 \mu\text{m}$ et la longueur d'onde est de $2 \mu\text{m}$.

La structure FA-LPF-5 a l'avantage de ne faire intervenir qu'un faible nombre de cellules dépressées en indice dans le cœur de la fibre. Ce faible nombre peut permettre de simplifier la fabrication de la structure mais surtout il limite le volume de matériau dépressé à fabriquer. On s'intéresse donc plus particulièrement dans la suite à cette architecture. On a cherché à regarder l'évolution de la bande de fonctionnement quasi-monomode de la fibre (délimitée par Q_{\min} et Q_{\max}) pour un abaissement indiciel des 5 cellules de cœur concernées de -1×10^{-4} , -2×10^{-4} , -3×10^{-4} et -4×10^{-4} . Les résultats sont montrés sur la figure 49. Les modèles sont appelés FA-LPF-5(m) où m indique la valeur de la dépression. On peut observer que l'augmentation du contraste d'indice permet d'assurer une propagation quasi-monomode suivant une gamme de chargement thermique plus large (Q_{\max} augmenté). Cependant, lorsque le contraste d'indice augmente, on constate que la structure FA-LPF-5 devient inefficace aux faibles niveaux de chargement thermique (Q_{\min} s'écarte de 0).

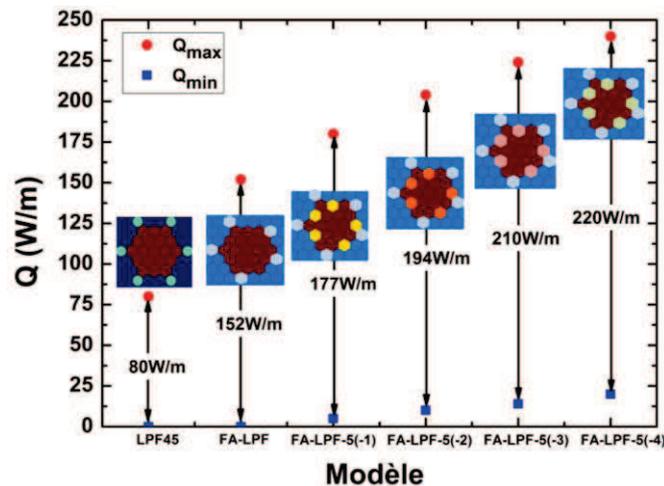


Figure 49 : Représentation graphique des différents résultats obtenus avec la structure FA-LPF-5 pour cinq inclusions dépressées de 1×10^{-4} (en jaune), 2×10^{-4} (en orange), 3×10^{-4} (en rouge clair) et 4×10^{-4} (en vert). Le seuil de régime monomode, Q_{\min} , est représenté par des carrés bleus. De plus, le seuil du régime multimode, Q_{\max} , est représenté par des cercles rouges. En outre, un zoom sur la zone du milieu à gain est ajouté en insert pour chaque modèle. Les résultats obtenus avec la LPF air-slice et La FA-LPF sont aussi montrés. Le pitch ici est de $45 \mu\text{m}$ et la longueur d'onde est de $2 \mu\text{m}$.

L'évolution de la valeur du MFA pour des variations de la charge thermique allant de 0W/m jusqu'à 250W/m a été calculée dans les différents modèles présentés dans la figure 49. Les résultats sont montrés dans la figure 50. On peut remarquer que pour un chargement thermique inférieur à 30W/m, les FA-LPF-5(m) présentent toutes des valeurs de MFA plus grandes que celle obtenue avec la LPF air-silice standard. De plus, pour une valeur fixe de Q, le MFA diminue quand le niveau de dépression devient plus important. En effet, quand la dépression augmente, elle empêche l'étalement du champ en confinant le FM dans la zone centrale du cœur. L'utilisation d'une dépression élevée facilite donc la fabrication (moins de contrainte sur la valeur de l'indice) mais elle diminue la valeur du MFA.

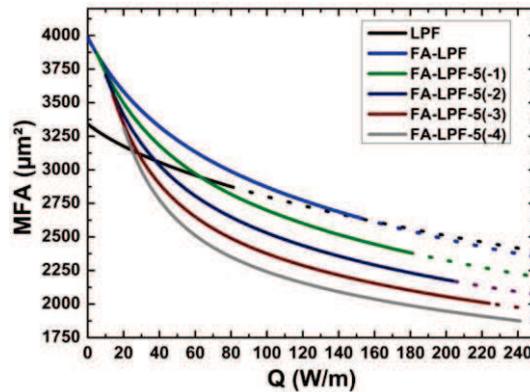


Figure 50 : Evolution de l'aire du champ du mode fondamental en fonction du chargement thermique et ce dans chaque modèle de fibre montré dans la figure 49. Les courbes en trait continu correspondent au calcul fait lorsqu'on se situe dans le régime monomode ($Q_{\min} < Q < Q_{\max}$) et les courbes en trait pointillé correspondent au calcul fait dans la zone où la propagation est multimode ($Q > Q_{\max}$). Le pitch ici est de $45\mu\text{m}$ et la longueur d'onde est de $2\mu\text{m}$.

En complément, on a comparé le seuil d'apparition du régime multimode (Q_{\max}) dans les quatre fibres suivantes : LPF air-silice, FA-LPF, FA-LPF-5(-1) et FA-LPF-5(-2) et ce pour des dimensions de la zone de gain (équivalent à la zone de cœur) variant de $33\mu\text{m}$ jusqu'à $133\mu\text{m}$. Les résultats obtenus sont illustrés dans la figure 51. Indépendamment de la taille du cœur, le modèle de fibre avec les 5 inclusions dépressées de 2×10^{-4} possède la plus grande valeur de Q_{\max} .

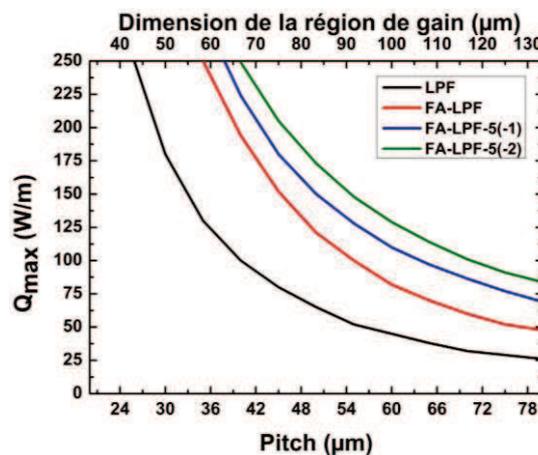


Figure 51 : Variation du seuil d'apparition du régime multimode (défini par Q_{\max}) en fonction du pitch ou de la taille de la zone de gain dans une LPF air-silice (en noir), FA-LPF (en rouge), FA-LPF-5(-1) (en bleu) et FA-LPF-5(-2) (en vert) à une longueur d'onde de $2\mu\text{m}$.

Enfin, sur la figure 52, nous montrons la dépendance de Q_{max} à la longueur d'onde pour 3 structures de fibre : la LPF air-silice, la FA-LPF et la FA-LPF-5(-1). Pour chacune d'elles, la taille de la structure reste ici constante (le pitch est fixé à $45\mu\text{m}$). La courbe qui correspond à la FA-LPF-5(-1) (représentée en bleu sur la figure 52) est toujours plus haute que les courbes correspondant aux fibres LPF (courbe en noir) et FA-LPF (courbe en rouge) indépendamment de la longueur de travail. C'est-à-dire qu'indépendamment de la nature des ions de terres rares utilisés pour former le milieu à gain, la structure de fibre du type FA-LPF-5(-1) va permettre de repousser le seuil des instabilités modales transverses et d'accéder à des niveaux de puissance plus élevés que les niveaux atteints par les deux autres fibres. Il faut noter que dans une FA-LPF-5, lorsque la longueur d'onde diminue, les 5 plots dépressés dans le cœur, qui sont tous situés sur la couronne la plus externe du cœur, peuvent permettre à cette même couronne externe d'agir comme une gaine. Le mode LP_{11} peut ainsi se retrouver à nouveau guidé dans le cœur. Par exemple, à une longueur d'onde de travail de $1\mu\text{m}$, si la dépression d'indice dans la FA-LPF-5 est de 2×10^{-4} le mode LP_{11} va être confiné dans les zones 2 et 3 du cœur telles que symbolisées dans la figure 44. Donc la valeur limite de dépression dans une FA-LPF-5 à $1\mu\text{m}$ est de 1×10^{-4} . Par contre, utilisée à une longueur d'onde de $2\mu\text{m}$, la structure proposée peut tolérer une dépression d'indice plus forte, jusqu'à -4×10^{-4} .

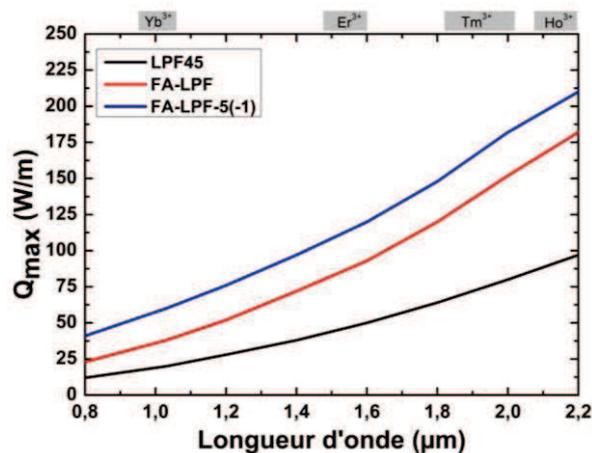


Figure 52 : Evolution de la valeur du seuil d'apparition du régime multimode en fonction de la longueur d'onde dans 3 structures de fibre : LPF (courbe noire), FA-LPF (courbe rouge) et FA-LPF-5(-1) (courbe bleu). Le pitch dans toutes les structures est fixé à $45\mu\text{m}$.

III.6. Conclusion

Les résultats obtenus dans ce chapitre montrent que la fabrication d'une fibre avec une structure complètement apériodique, quelque soit la nature des ions de terres rares utilisés (Yb^{3+} , Er^{3+} , Tm^{3+}), offre un seuil d'apparition du régime multimode quasiment deux fois plus élevé qu'avec une LPF standard indépendamment de la taille du cœur de la fibre. En supposant bien sûr que dans les deux cas une adaptation parfaite d'indice de réfraction entre le cœur et la gaine soit assurée. Par conséquent, l'augmentation de la valeur de Q_{max} va permettre de repousser le seuil d'apparition des instabilités modales transverses, donc de monter en puissance sans dégrader la qualité du faisceau émis. Ensuite, plusieurs exemples de structuration du cœur ont été proposés numériquement afin de repousser encore plus le seuil d'apparition du régime multimode sous l'influence du chargement thermique. Ces

concepts sont basés sur la dépression de l'indice de réfraction de certaines inclusions constituant le cœur de la fibre.

On a notamment montré que la structuration du cœur peut avoir une influence sur le seuil des régimes monomode et multimode ainsi que sur la valeur du MFA. Par exemple, une fibre avec un cœur entièrement dépressé (FA-LPF-19) va avoir une grande valeur de MFA mais son seuil de fonctionnement en régime monomode est assez élevé ($Q_{\min} \gg 0$). En outre, la fibre FA-LPF-5 possède un seuil de fonctionnement très faible, mais son MFA est petit. Donc une solution magique n'existe pas, il faut donc perdre sur un paramètre pour en optimiser un autre et inversement. Tout dépend de ce que veut l'utilisateur.

Maintenant, pour passer à la pratique et envisager la réalisation d'une structure FA-LPF, considérer seulement l'indice de réfraction n'est pas suffisant car les dopages ont une influence sur l'indice mais aussi l'efficacité du laser. Il est donc nécessaire avant d'envisager la fabrication d'une FA-LPF dopée Tm^{3+} de réaliser une étude expérimentale sur la composition chimique du milieu à gain afin de garantir en même temps un bon contrôle d'indice de réfraction et ainsi une bonne efficacité laser.

