



Journée thématique : Fibres Optiques

# Les technologies fibrées pour les lasers impulsionnels.

Philippe Roy, Marie-Alicia Malleville, Baptiste Leconte,  
Romain Dauliat, and Raphaël Jamier

*Univ. Limoges, CNRS, XLIM, UMR 7252, F-87000 Limoges, France*



Université  
de Limoges



# Laser de puissance, qu'est ce que ça veut dire ?

À Fibre

La fibre optique devient le lien

Les fibres optiques

**La communauté scientifique travaille dur pour rendre les sources laser fibrées pertinentes pour de nombreuses applications :**

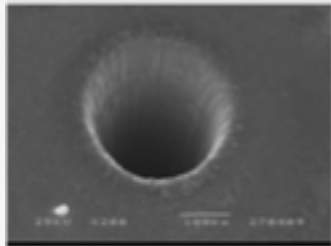
- Multiple 100kW-range CW fibre laser sources are now available (multimode)
- Multiple kW-range CW fibre laser sources are now available (diffraction limited beam)
- Multiple 10mJ-range are demonstrated in ns pulsed regime
- Multiple 10MW-range are demonstrated in fs pulsed regime
- Thermal load is now a major problem
- Nonlinear distortions and spectral conversions are more and more detrimental

d'émission (à cause des petits diamètres de cœur)  
- Les pertes par réflexion et spectral à cause des petits diamètres de cœur

# Applications des lasers à fibre de forte puissance/énergie ...

→ Forte puissance (crête/moyenne) tout en maintenant une émission monomode (1-2  $\mu\text{m}$ )

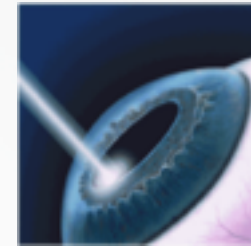
Applications:



Micro hole drilling\*



Climatology / LIDAR



Surgery

→ Pour atteindre des gammes spectrales via des conversions non linéaires de fréquences (supercontinuum, SHG, THG THz generation by Difference Frequency Generation)

Applications:

Nanosecond UV



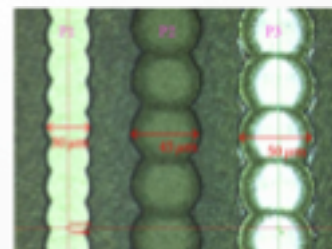
Flex Printed Circuit Board processing

Femtosecond green



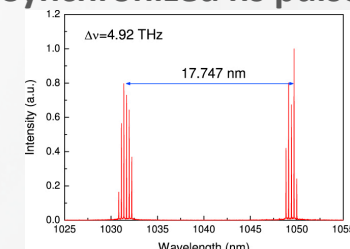
Wafer scribing

Picosecond IR



PV cells scribing

Synchronized ns pulses

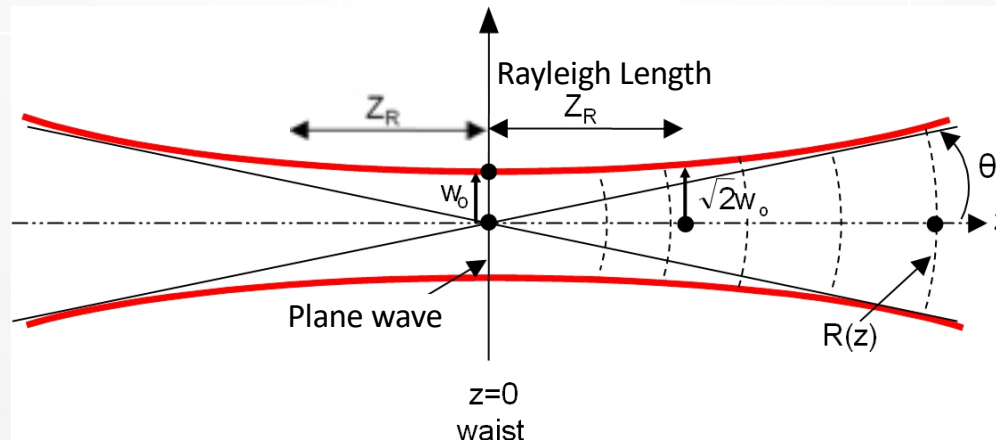


THz Generation

LMA extrême et fibres courtes pour monter en puissance ...

# Quelques chiffres et remarques générales pour comprendre les fibres rigides XLMAs...

	SM Flexible optical fibers	Rod type fibers	Bulk lasers
Core diameter	4 to 15 $\mu\text{m}$	50 $\mu\text{m}$ to 200 $\mu\text{m}$	800 $\mu\text{m}$ to 20cm (LMJ)
Typ. Fiber length	3m to 50m	50cm to 100cm	few cm
$2*Z_R$ (Rayleigh length)	25 $\mu\text{m}$ to 350 $\mu\text{m}$	4mm to 6cm	1m and beyond



Un très faible guidage est suffisant pour assurer le recouvrement entre le cœur dopé et le mode souhaité ...



## Quelques chiffres et remarques générales pour comprendre les fibres rigides XLMAs...

	SM Flexible optical fibers	Rod type fibers	Bulk lasers
Core diameter	4 to 15μm	50μm to 200μm	800μm to 20cm (LMJ)
Typ. Fiber length	3m to 50m	50cm to 100cm	few cm
Maximum refractive index contrast	$10^{-3}$ to $10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-6}$ to $8 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-7}$

$$V_c = \frac{2\pi a}{\lambda} * \sqrt{2n_{\text{core}}\Delta n}$$

**Pour une fibre de 100μm de cœur, un contraste d'indice de  $3 \cdot 10^{-5}$  est suffisant pour propager le second mode**

**Fabrication : les procédés CVD permettent un contrôle de l'indice jusqu'à  $5 \cdot 10^{-4}$  et la résolution du meilleur mesureur de profil d'indice est de  $10^{-4}$**

A.D. Yablon OPTICS LETTERS / Vol. 38, No. 21 /2013

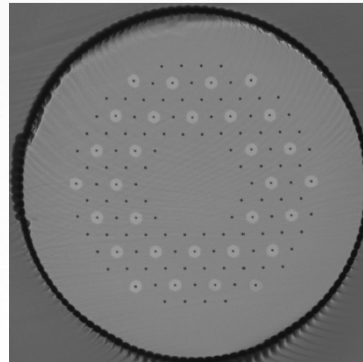


# Principes et structures de quelques fibres rigides XLMAs...

## Comment obtenir un faible guidage ?

- Avec une PCF à petits trous assistés par des résonateurs

DMF

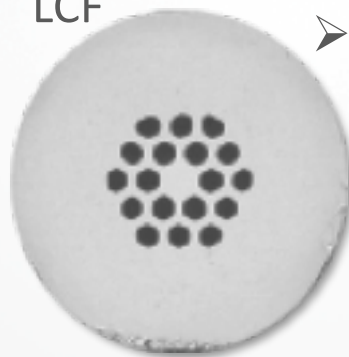


➤ MFD up to 72  $\mu\text{m}$

*Johansen et al.  
Proc. of SPIE, **9728**  
(972801) (2015)*

- Avec des canaux de fuite agissant comme des passoires modales

LCF



➤ MFD up to 64  $\mu\text{m}$

*Dong et al.  
Opt. Exp. **14**(24) (2006)*

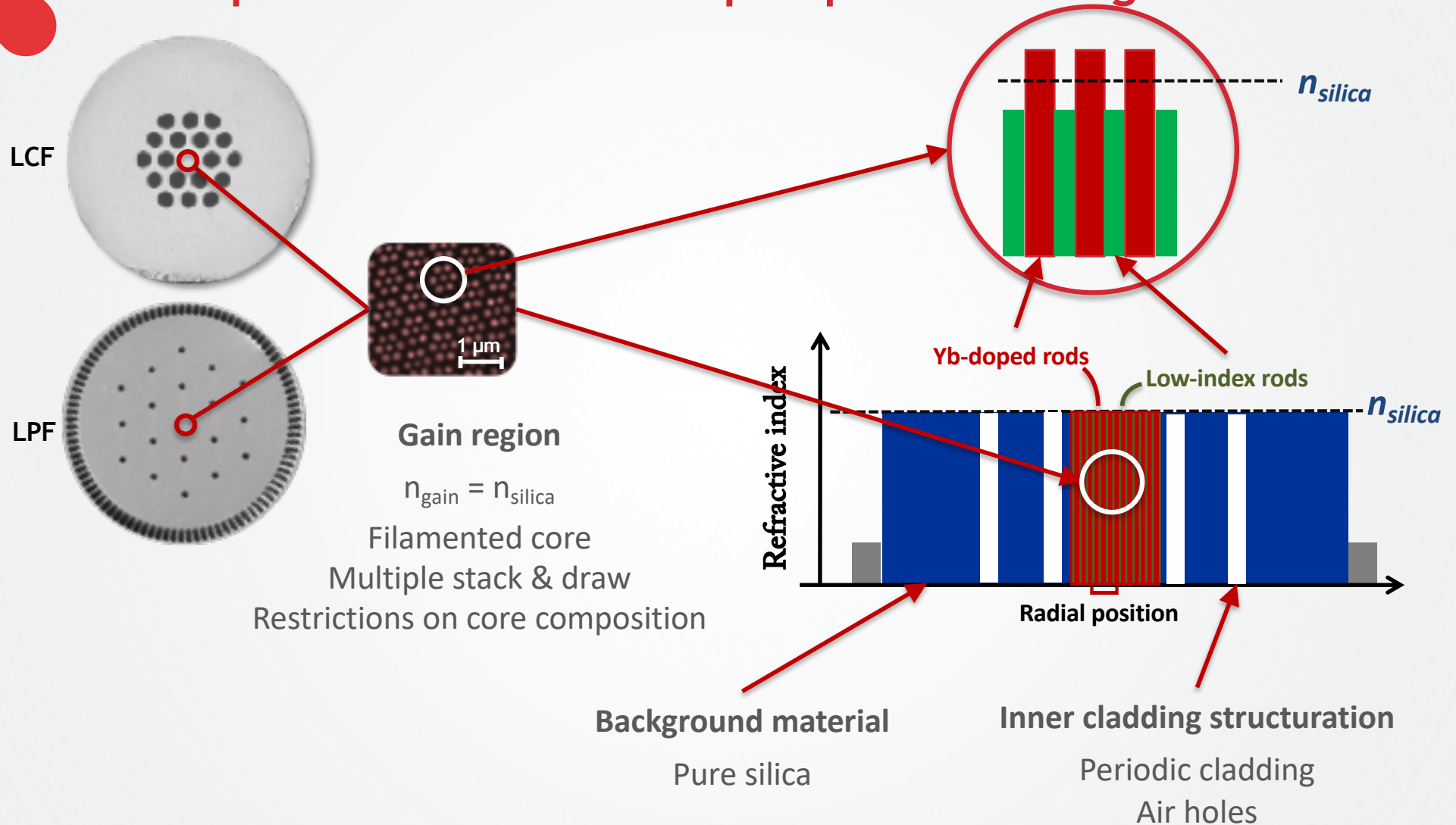
LPF



➤ MFD up to 100  $\mu\text{m}$

*Stutzki et al.  
Opt. Lett , **37** (6)  
(2012)*

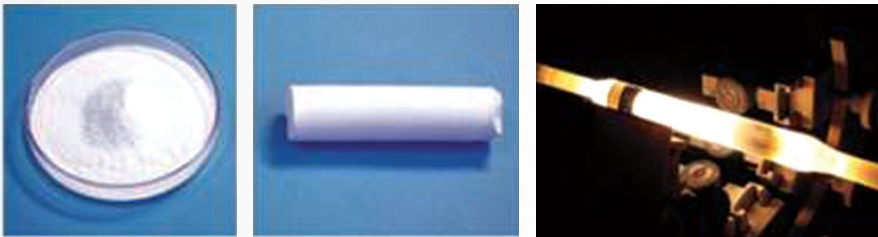
# Principes et structures de quelques fibres rigides XLMAs...



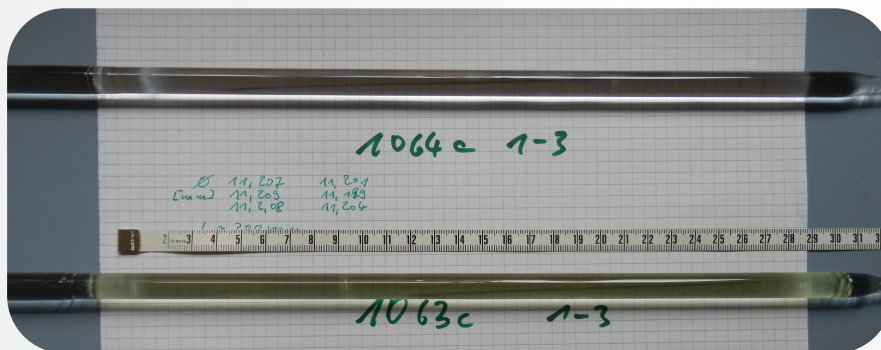
# Quand la méthode de fabrication dirige la conception ...

## LA MÉTHODE REPUSIL

### ➤ FRITTAGE ET VITRIFICATION DE POUDRES DOPÉES



Langner et al., PW (2012)  
Schuster et al. Adv. Opt. Techn. 3(4)(2014)

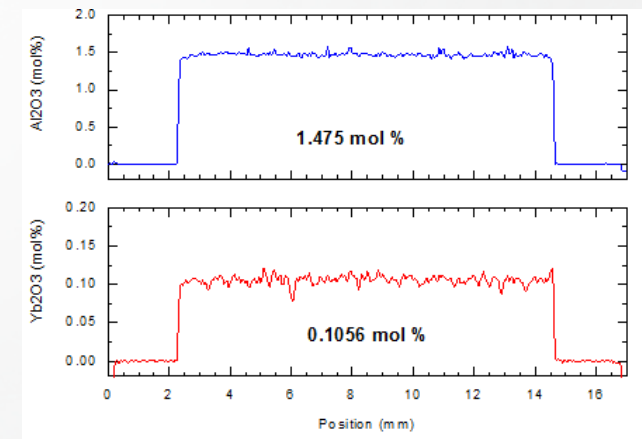


WDX  
caracterisation

### ➤ AVANTAGES DU REPUSIL

Grande qualité optique  
Production de grands volumes  
Maîtrise de l'indice ( $10^{-5}$ )

Rapide  
Peu coûteux

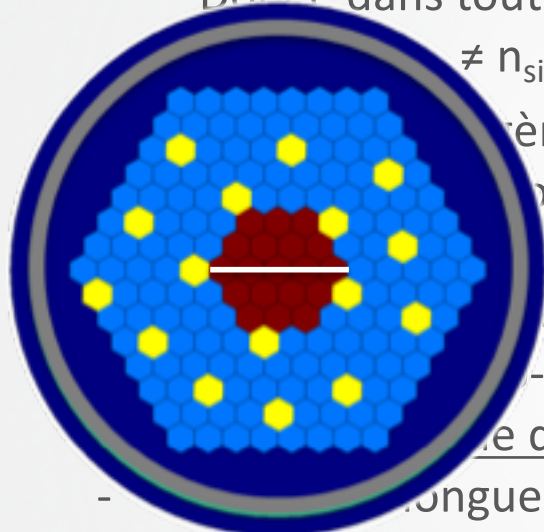




# Quand la méthode de fabrication dirige la conception ...

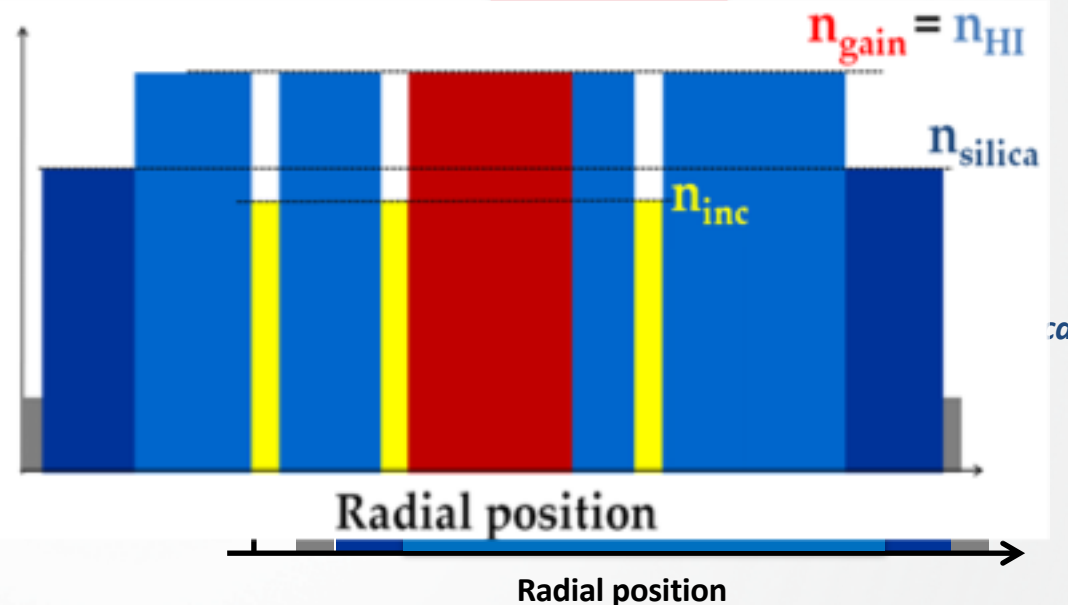
La région à gain est :

Donnée dans tout le volume



- $\neq n_{\text{silica}}$
- ène
- ût
- on donnée
- e dopage l
- -noircissem
- e dopage dor
- longueur d'absor
- Même photo-noircissement

Refractive index



Un second matériau homogène est nécessaire :

- Il doit être passif (par exemple silice dopée Al)
- Il doit être parfaitement adapté en indice



## Quelques chiffres et remarques générales pour comprendre les fibres rigides XLMAs...

	SM Flexible optical fibers	Rod type fibers	Bulk lasers
Core diameter	4 to 15 $\mu$ m	50 $\mu$ m to 200 $\mu$ m	800 $\mu$ m to 20cm (LMJ)
Typ. Fiber length	3m to 50m	50cm to 100cm	few cm
Maximum refractive index contrast	$10^{-3}$ to $10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-6}$ to $8 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-7}$
S/V	4000 to 50000	400 to 1600	10 to 50
Heat load	Insensitive	To be considered	Very sensitive

Pour un cœur de 100 $\mu$ m, un contraste d'indice de  $3 \cdot 10^{-5}$  est suffisant pour propager le second mode alors que la charge thermique peut engendrer à elle seule un contraste d'indice parabolique de l'ordre de  $10^{-4}$



**Les fibres rigides (Rod type) sont indispensables pour obtenir de fortes puissances crêtes**

**Que savons nous désormais des fibres “rod type” ?**

**Une émission monomode est possible malgré des tailles de coeurs supérieures à 50µm**

**Le contraste d'indice coeur gaine doit être extrêmement faible,  $< 8.10^{-5}$  pour 50µm**

**Très sensibles à la charge thermique**

**Le plus court est le mieux !**

**La technologie poudre rend la fabrication possible**

**Mais qu'est ce qui est réellement indispensable dans le concept  
Et pourquoi proposons nous des gaines apériodiques ?**



Université  
de Limoges

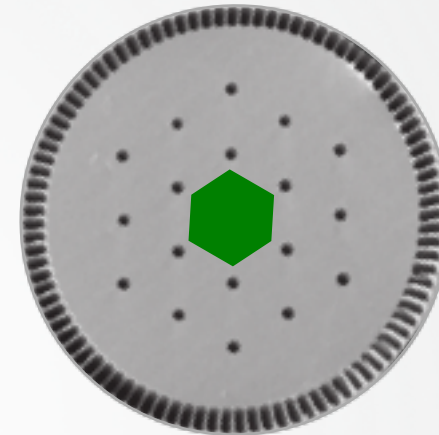


# Le confinement modale dans les LPF XLMA LPF avec les mains ! Le rôle de l'apériodicité dans les LPF...

Qu'est ce qui est indispensable dans les concepts actuels ?

Le nombre de couches ?

Le rapport cœur/gaine ?



Pour une PCF standard, plus le nombre de couches est élevé, plus les pertes sont faibles !

Mais nous n'avons besoin que d'un guidage faible sur 50cm à 1m ...

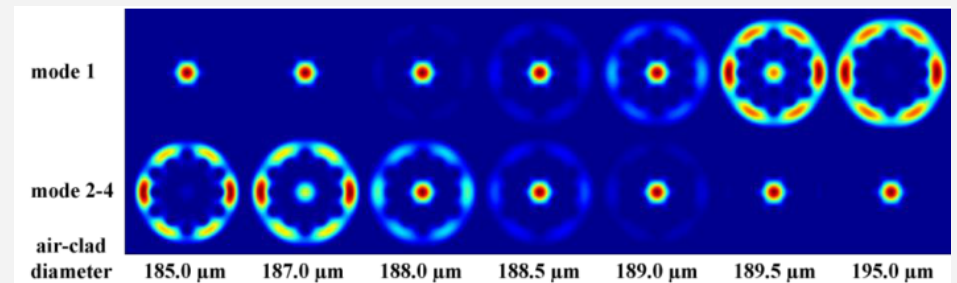
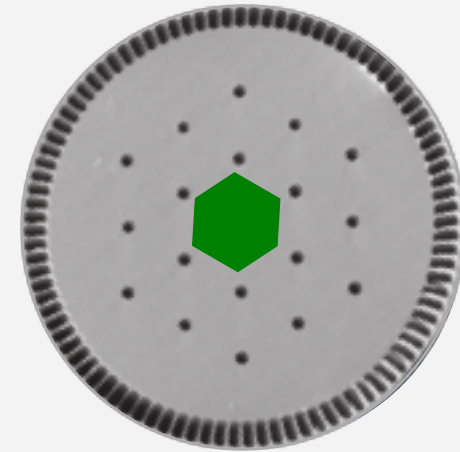
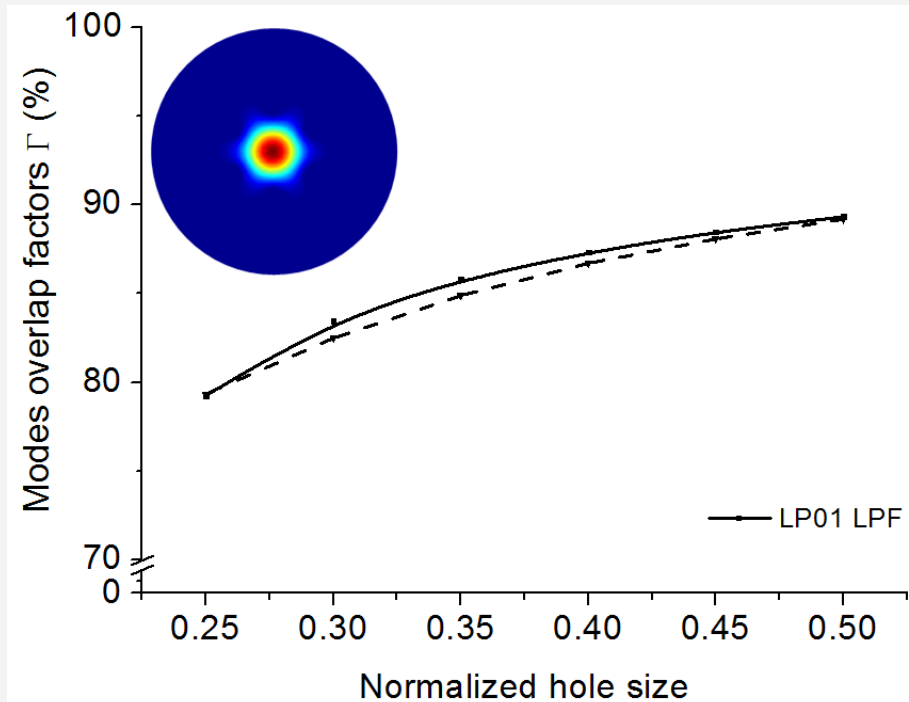
Et du fait de la présence de la gaine d'air, tous les modes se propagent sans pertes !

**Le critère pertinent est le recouvrement des modes sur la zone de gain !**



# Le confinement modale dans les LPF XLMA's LPF avec les mains ! Le rôle de l'apériodicité dans les LPF...

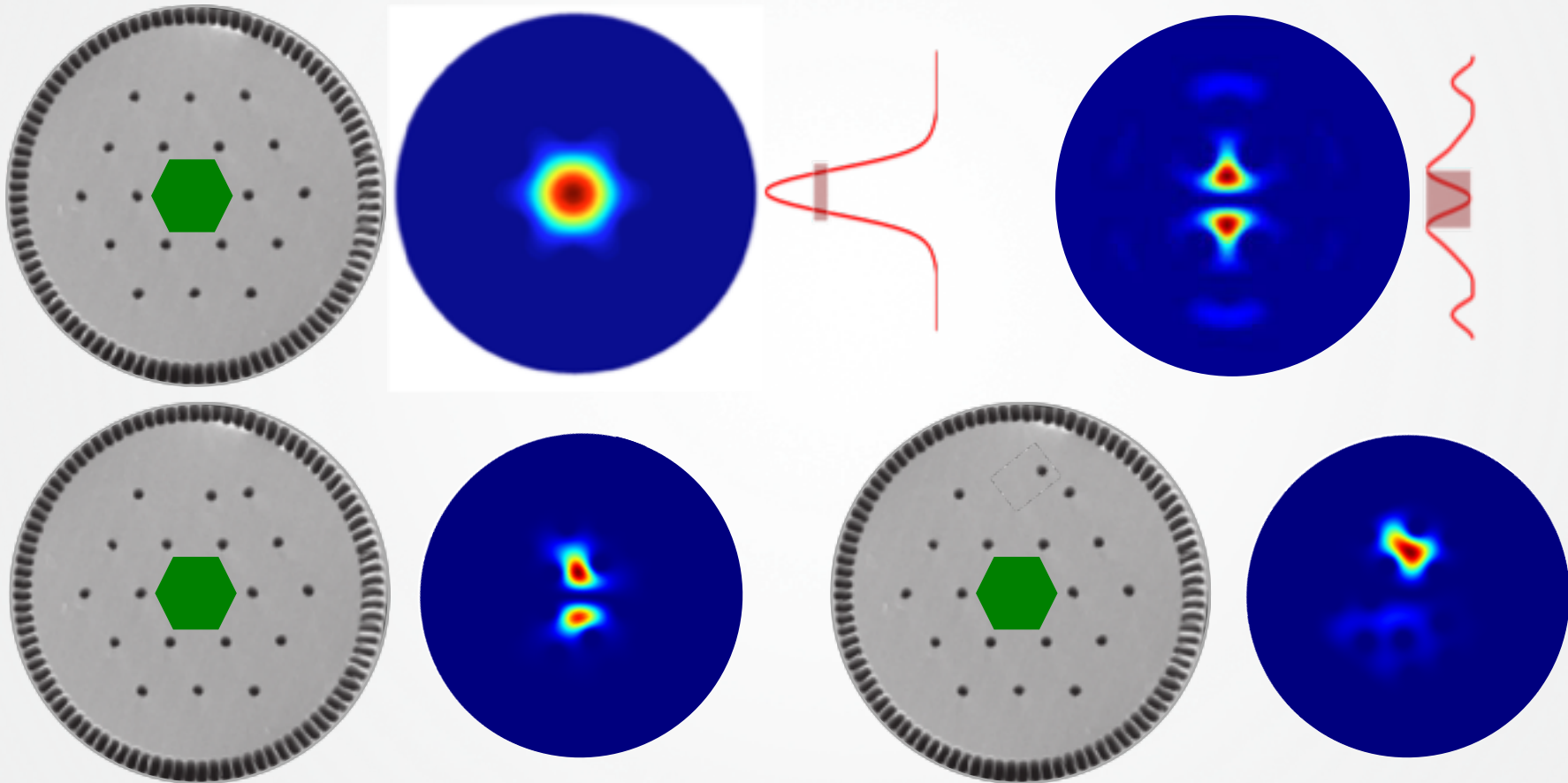
Mais la deuxième couche permet d'éviter les couplages parasites avec les modes de gaine qui délocalisent le mode fondamental



IAP Jena

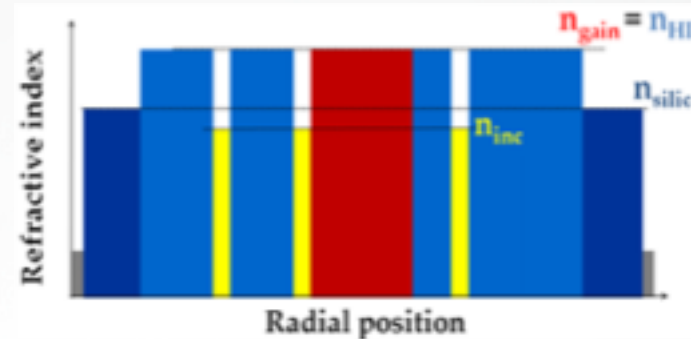
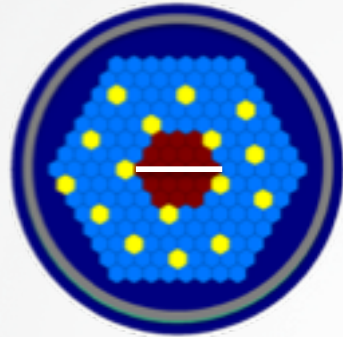
# Le confinement modale dans les LPF XLMA's LPF avec les mains ! Le rôle de l'apériodicité dans les LPF...

Qu'en est il de l'apériodicité ?



# Introduction aux fibres rigides apériodiques type LPF

## Concept



**Ytterbium-doped core**

**Index-matched passively doped cladding (doped with aluminium)**

**Solid low-index inclusions (doped with fluorine)**

**Pure silica**

**Pump cladding**

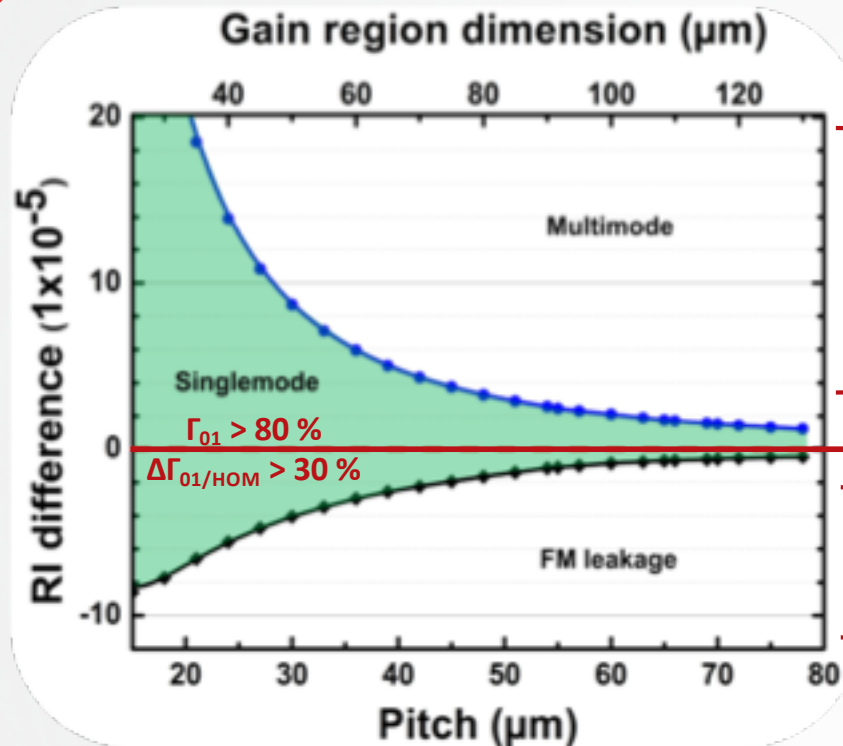
*A. Benoît et al, Opt. Lett. 39, 4561 (2014)*

## Principaux avantages :

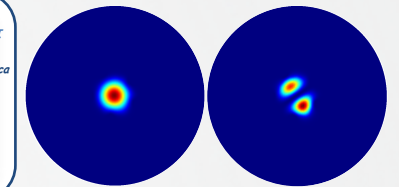
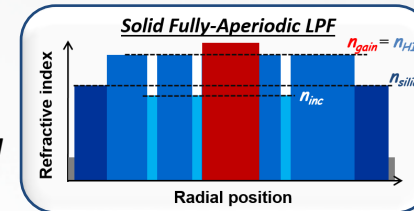
- Gaine apériodique
  - Exacerber la délocalisation des modes d'ordre élevés
  - Prévention des couplages entre modes de gaine et mode de cœur
- Dopage homogène du cœur (taux de dopage local plus faible)
- Moins de charge thermique et de photo-noircissement

# Quelques données théorique pour comprendre la vie réelle

## Tolérance sur l'indice de réfraction pour une fibre "froide"

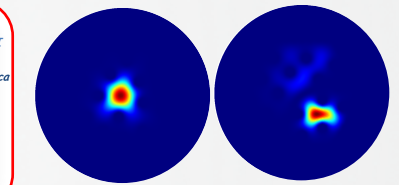
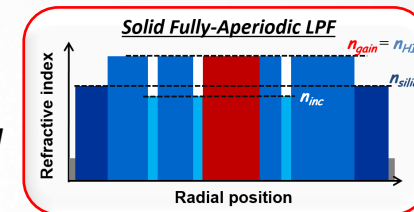


$n_{core} > n_{HI}$



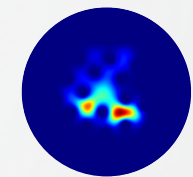
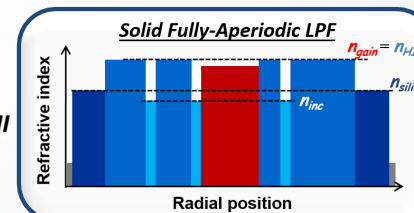
At least two guided modes

$n_{core} = n_{HI}$



Single-mode propagation

$n_{core} < n_{HI}$



LP01 mode coupled with a cladding mode

Overlap factor

$$\Gamma = \frac{\iint_{Ag} |E|^2 dS}{\iint_{Atot} |E|^2 dS}$$

Modal discrimination

$$\Delta\Gamma = \Gamma_{01} - \Gamma_{HOM}$$





## Les fibres “rod type” dans la vie réelle

**Le contrôle de l'indice de réfraction du coeur est essentiel**

**Une inhomogénéité du coeur dégrade la qualité de faisceau**

**Un désaccord d'indice coeur/gaine compromet la qualité de faisceau**

**La face sombre des rods :**

**Lentilles thermiques (TL) et instabilités transverses de mode (TMI)**



Université  
de Limoges

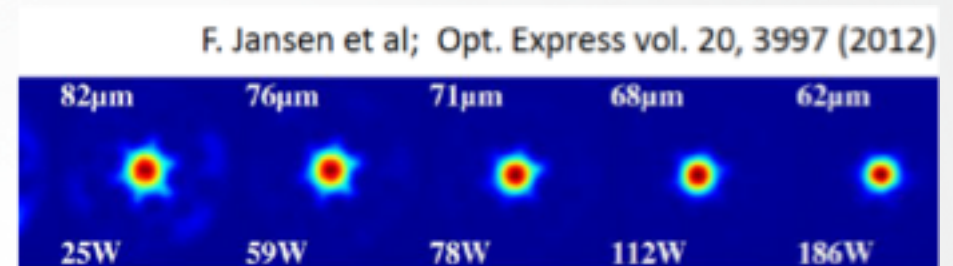


## La face sombre des rods

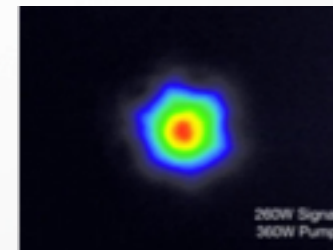
### Les conséquences de la charge thermique :

#### Lentille thermique (TL)

- Réduit l'aire modale sans déstabiliser le mode
- influence indirectement les effets non-linéaires



#### Instabilités transverses modales (TMI)

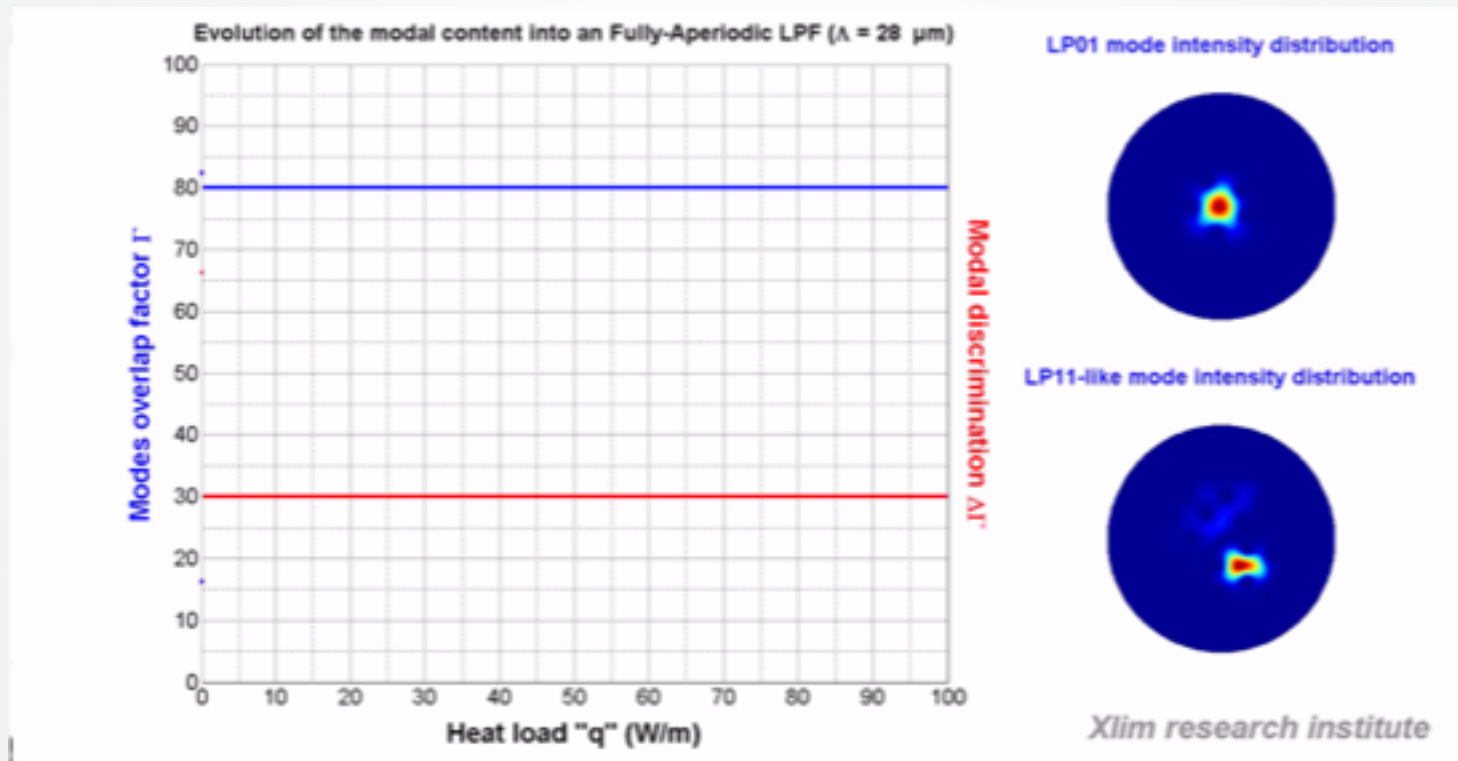


*Eidam et al., Opt. Exp.  
19(4) (2011)*



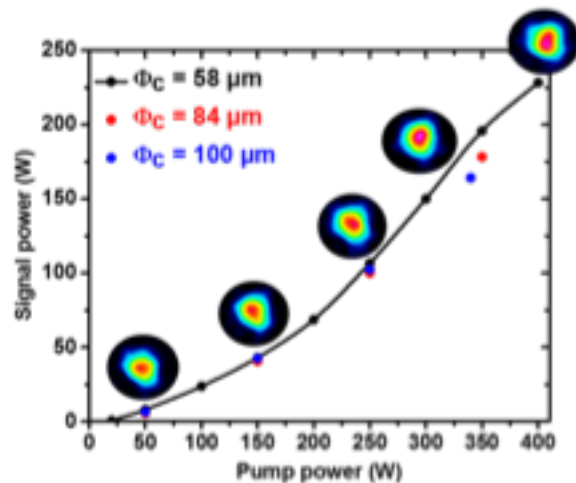
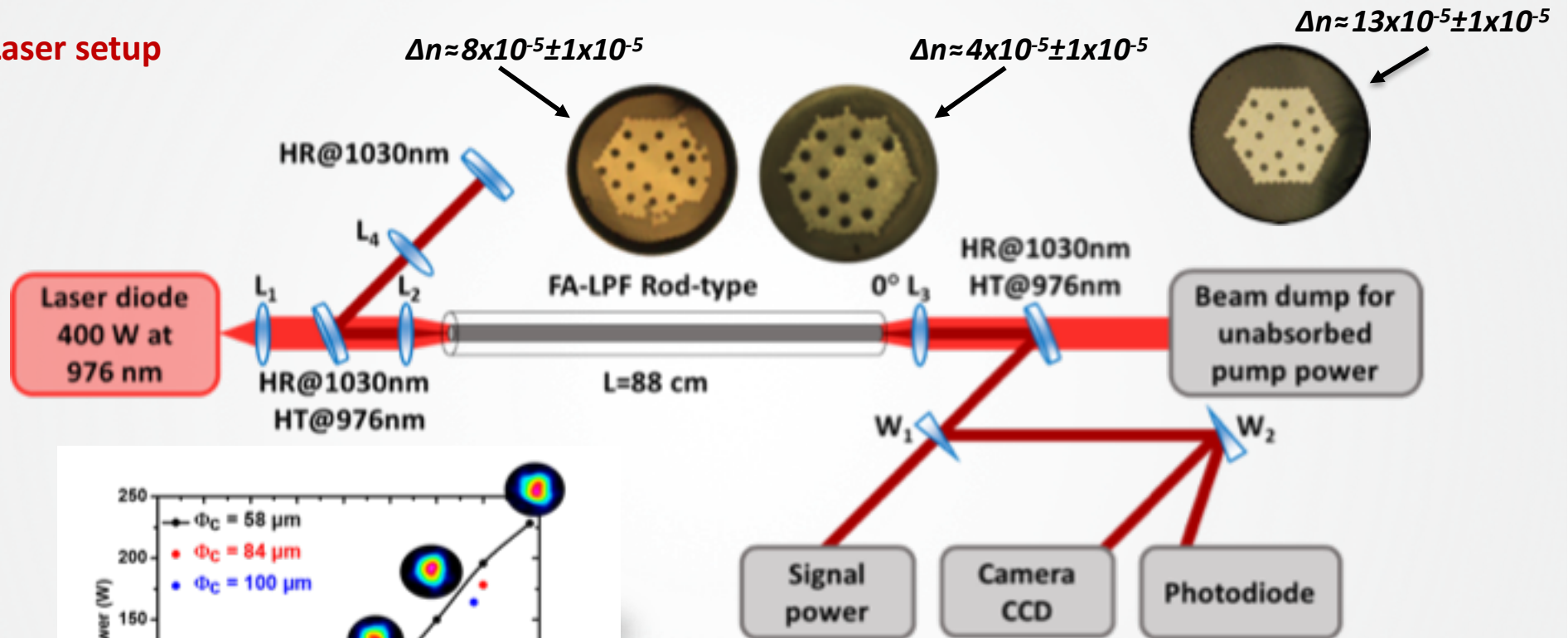
## La face sombre des rods

Les modes d'ordre haut sont délocalisés dans la gaine lorsque la fibre est froide, ils se re-confinent dans le cœur avec l'élévation de la température !



# Observation expérimentale des TMI

## Laser setup



$$\Delta n \approx +8 \times 10^{-5} \pm 1.5 \times 10^{-5} - \Phi_c = 58/84/100 \mu\text{m}$$

Même puissance extraite pour tous les diamètres de coeur et indices de réfraction



## Observation expérimentale des TMI

MFD  $\approx 50\mu\text{m}$

$\Delta n$	Core diameter ( $\mu\text{m}$ )	MFD ( $\mu\text{m}$ )	V	TMI power threshold (W)
$13 \times 10^{-5}$	65	49	2,9	55-60
$8 \times 10^{-5}$	58	43	1,8	100-105
$4 \times 10^{-5}$	62	46	1,5	145-150

MFD  $\approx 60\mu\text{m}$

$\Delta n$	$\Phi_c$ ( $\mu\text{m}$ )	MFD ( $\mu\text{m}$ )	$P_{\text{TMI}}$ threshold (W)
$8 \times 10^{-5}$	84	$\approx 62$	80-85
$4 \times 10^{-5}$	76	$\approx 58$	100-105

Pour  $\Phi_c$  fixe, augmenter le  $\Delta n$  abaisse le seuil TMI

*Malleville et al., Proc. SPIE 10512, Fiber Lasers XV: Technology and Systems, 1051206 (26 February 2018)*

## Observation expérimentale des TMI

$$\Delta n \approx 8 \times 10^{-5} \pm 1 \times 10^{-5}$$

Core diameter ( $\mu\text{m}$ )	MFD ( $\mu\text{m}$ )	TMI power threshold (W)
58	$\approx 43$	100-105
84	$\approx 62$	80-85
100	$\approx 74$	55-60

$$\Delta n \approx 4 \times 10^{-5} \pm 1 \times 10^{-5}$$

Core diameter ( $\mu\text{m}$ )	MFD ( $\mu\text{m}$ )	TMI power threshold (W)
76	$\approx 58$	100-105
90	$\approx 67$	65-70

Pour  $\Delta n$  fixe, augmenter  $\Phi_c$  abaisse le seuil TMI

*Malleville et al., Proc. SPIE 10512, Fiber Lasers XV: Technology and Systems, 1051206 (26 February 2018)*

*M. N. Zervas, Proc. SPIE Vol. 10083 100830M-1, 2017*



## Les fibres “rod type” dans la vie réelle

**Le contrôle de l'indice de réfraction du coeur est essentiel**

**Les lentilles thermiques (TL) et les instabilités transverses de mode (TMI) constituent des limitations**

**Quelles stratégies pour la montée en puissance ?**

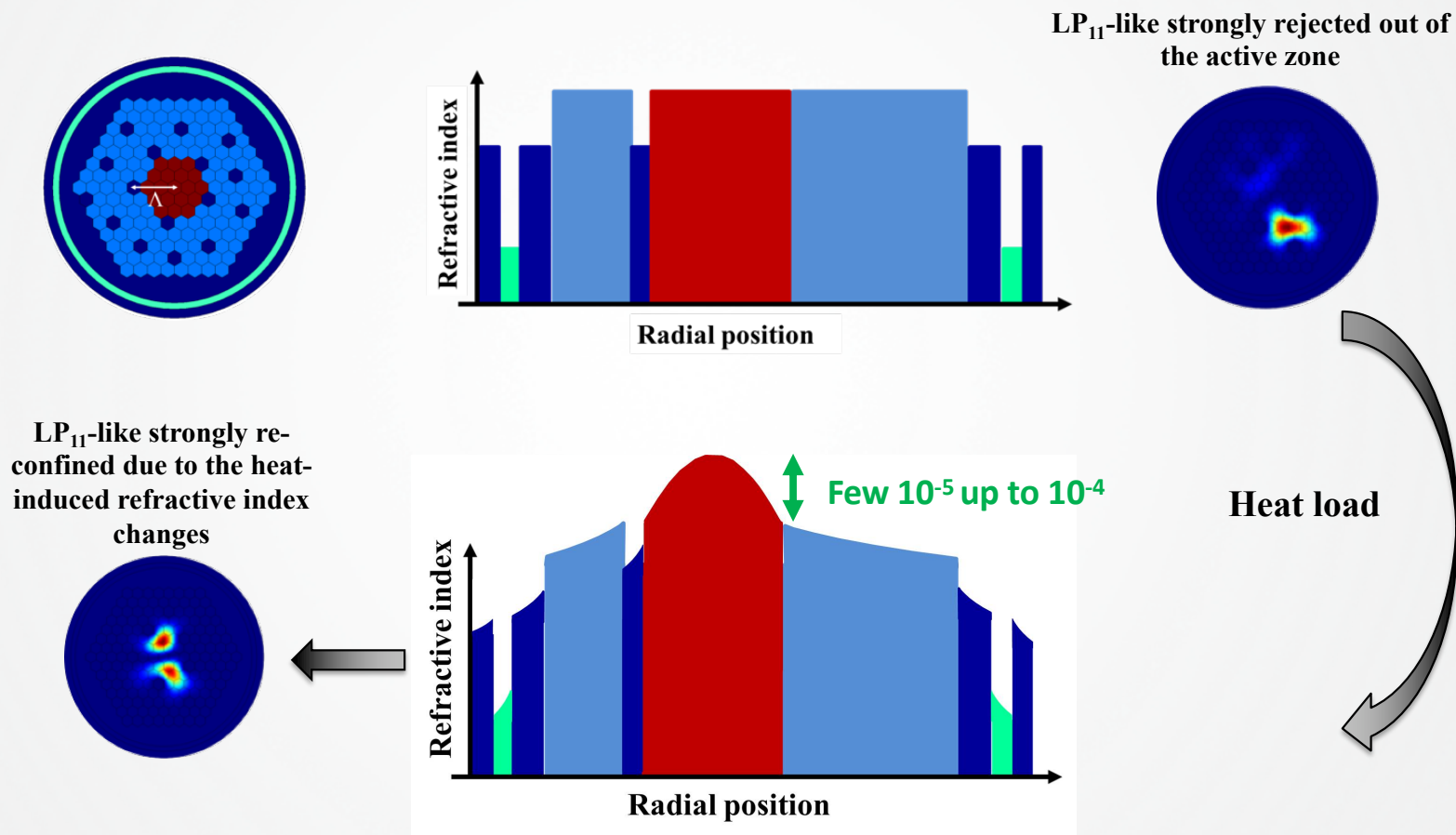


Université  
de Limoges



## Quelques perspectives pour aller plus loin

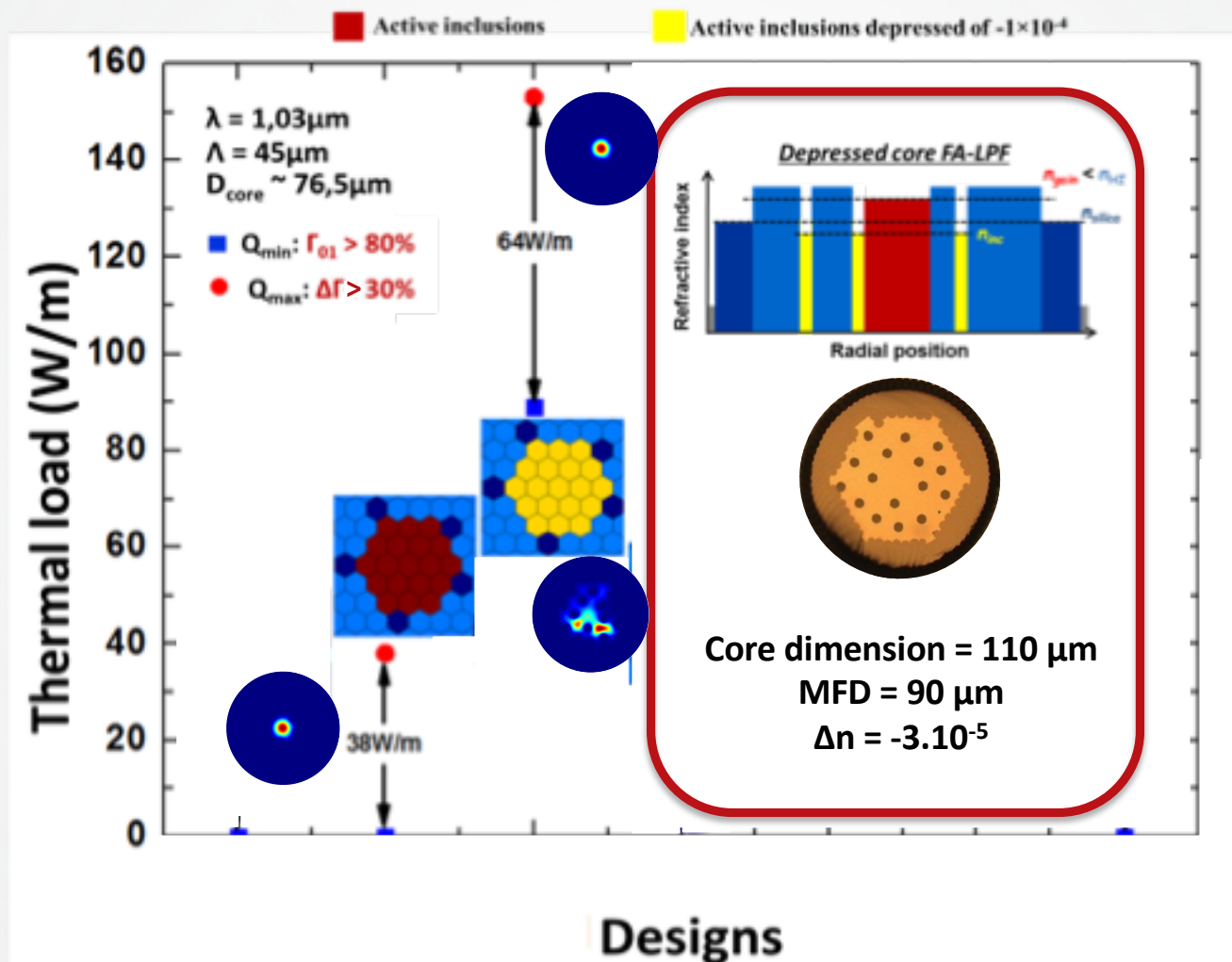
### La pré-compensation de la charge thermique





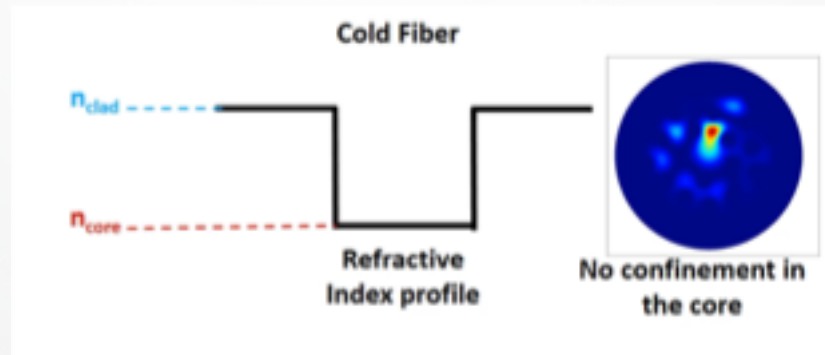
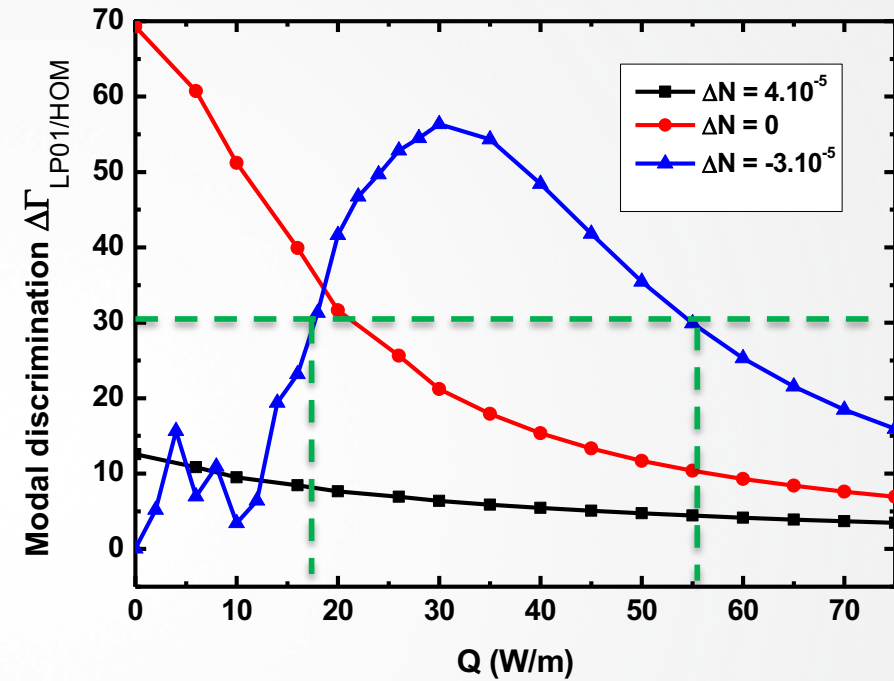
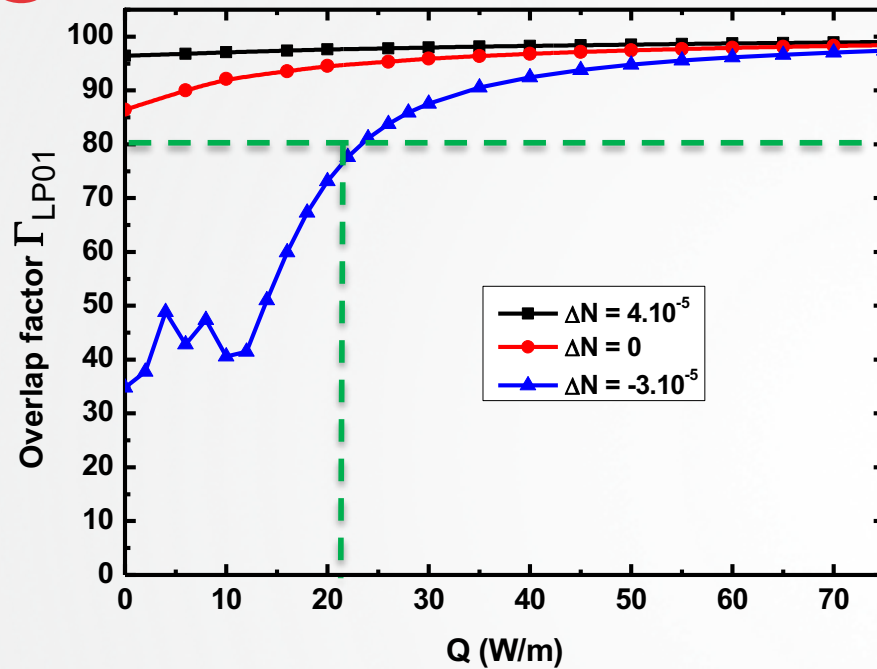
## Quelques perspectives pour aller plus loin

### La pré-compensation de la charge thermique



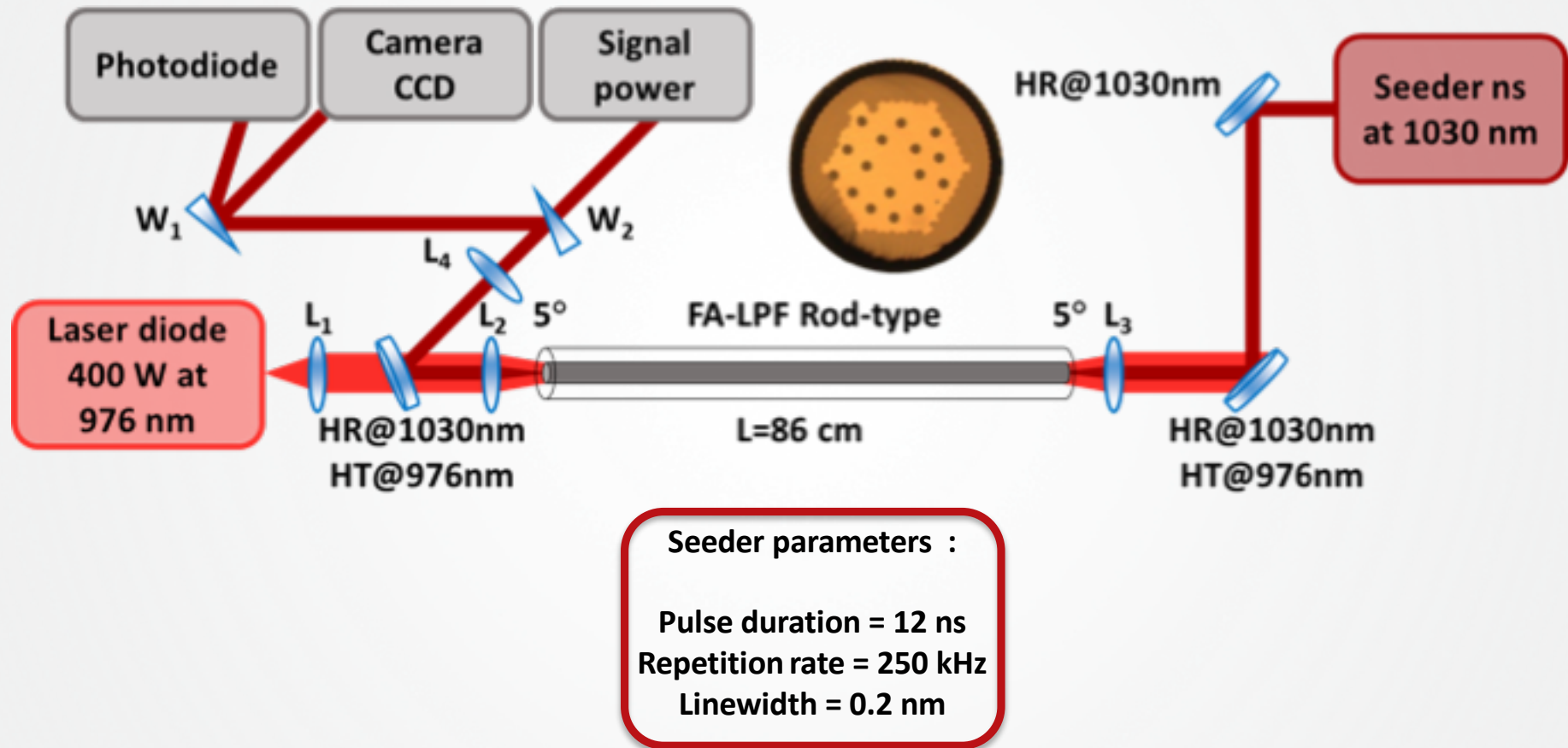
*Darwich et al, Applied Opt. 55(32) (2016)*

## Etude numérique pour un coeur de 110 $\mu\text{m}$ et différents $\Delta N$

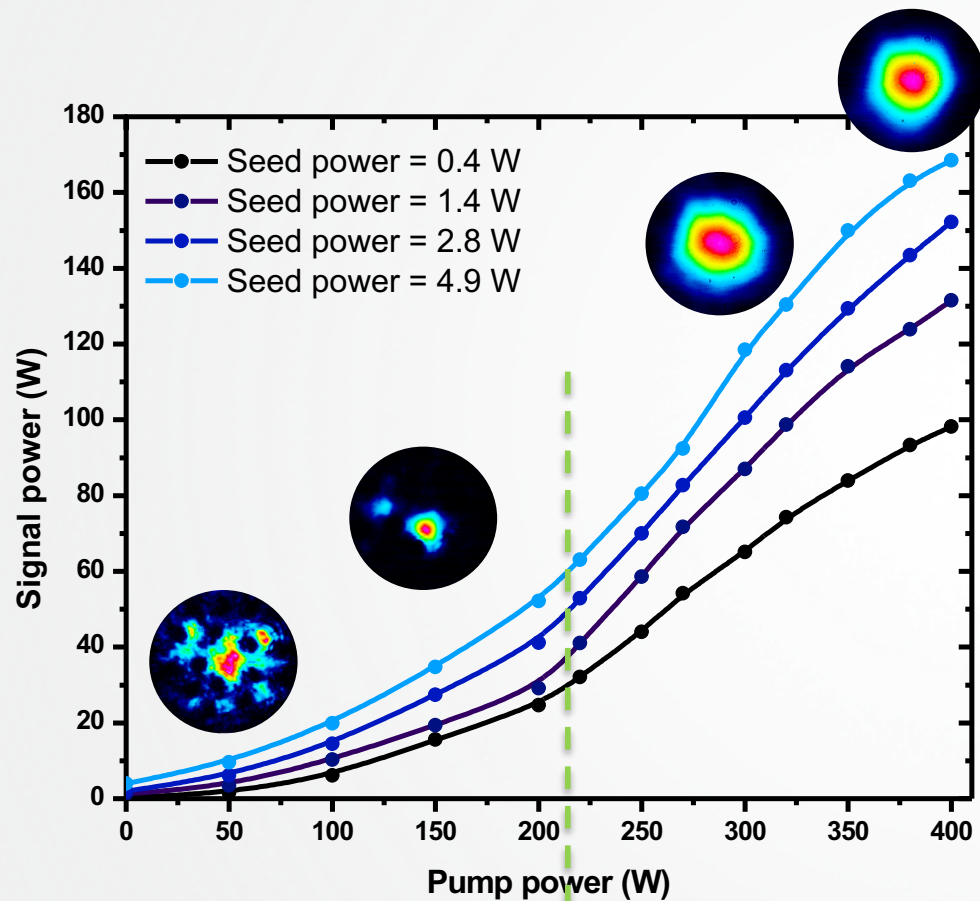


# Montage expérimentale

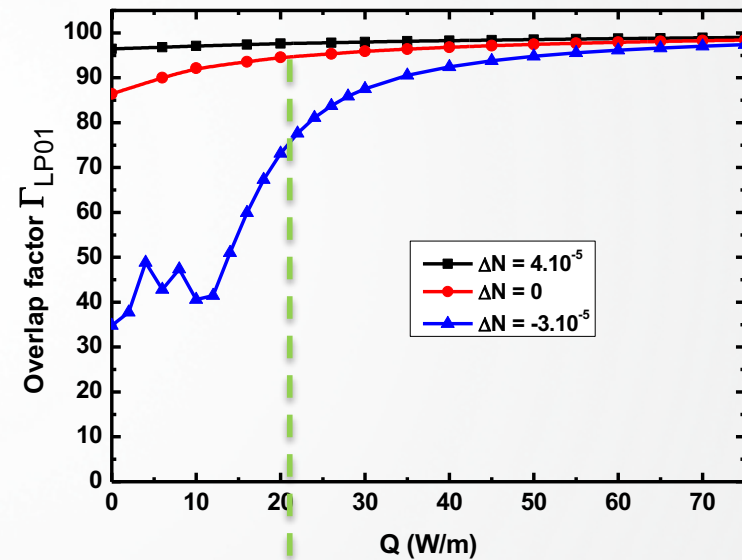
## L'architecture "MOPA"



## Résultats expérimentaux



Confinement du LP01



→ Bon accord avec le modèle malgré une estimation grossière



## Conclusion

### Lasers impulsionnels de puissance à fibres rigides

- La méthode de fabrication peut permettre des concepts innovants via l'apériodicité y compris pour des cœurs monomodes de plus de 100  $\mu\text{m}$
- Démonstration d'une fibre FA-LPF à cœur dopé Yb pré-compensé thermiquement de diamètre supérieur à 110  $\mu\text{m}$
- Confinement du mode fondamental à plus de 200 W de puissance moyenne

### Perspectives

- Aller vers des cœurs toujours plus grands (150 and 180  $\mu\text{m}$  à l'étude)
- Les fibres Rod type sont attendues dans la gamme kW (puissance moyenne)
- Des matériaux à coefficients de dilatation négatifs sont à l'étude ...





Merci pour votre attention



Université  
de Limoges

