



# Les technologies fibrées pour les lasers continus



Raphael JAMIER, Philippe ROY, Marie-Alicia MALLEVILLE, Clara  
ABBOUAB, Baptiste LECONTE, Romain DAULIAT, Nadia TIABI



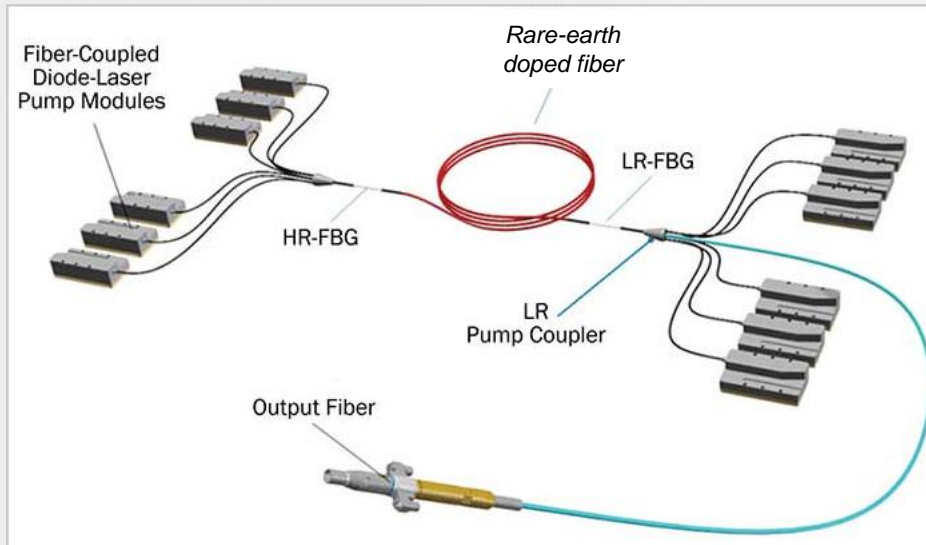
Les communautés  
d'experts



Invitation Journée thématique sur les Fibres Optiques  
Le 28 Juin 2023



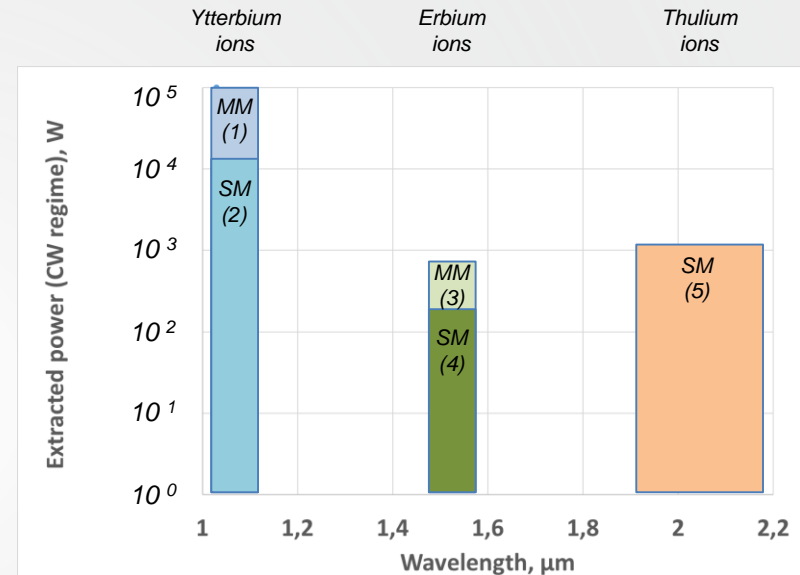
# Laser à fibres : c'est quoi ?



Courtesy of Coherent Inc., extracted from Photonics.com, June 2017

HR-FBG : High-reflectivity fiber Bragg grating

LR-FBG : Low-reflectivity fiber Bragg grating



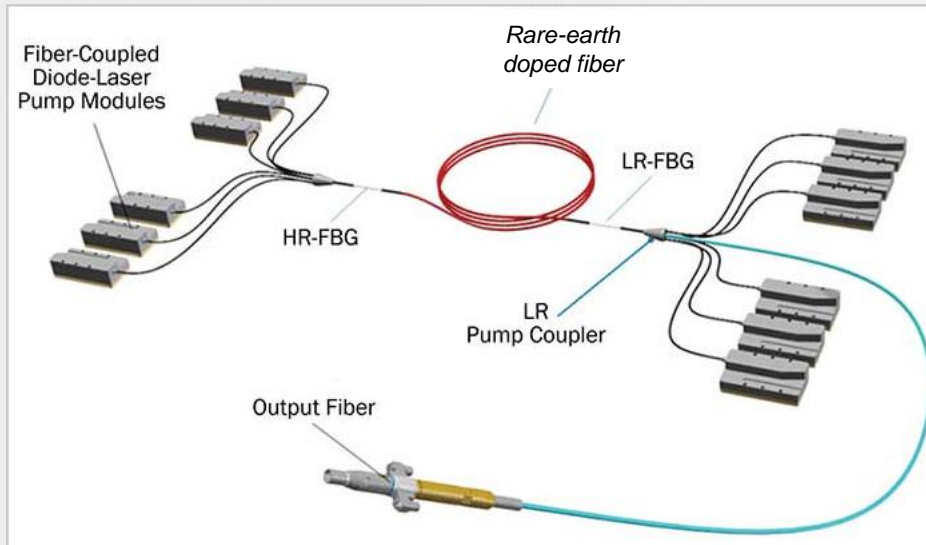
MM : Multimode fiber laser systems

SM : Singlemode fiber laser systems

- (1) Sun et al., « 100kW ultra high power fiber laser », *Optics Continuum*, vol.1, n°9, 2022
- (2) Shiner et al., « The impact of fiber laser technology on the world wide material processing market », *CLEO conference*, paper AF2J.1, USA, 2013
- (3) Lin et al., « 656W Er-doped, Yb-free large-core fiber laser », *Optics Letters*, vol.43, n°13, 2018
- (4) Li et al., « Er/Yb co-doped 345W all-fiber laser at 1535nm using hybrid fiber », *Optics Letters*, vol.48, n°11, 2023
- (5) Anderson et al., « 1.1kW, beam-combinable thulium doped all-fiber amplifier » *Photonics West conference*, paper 116650B, 2021



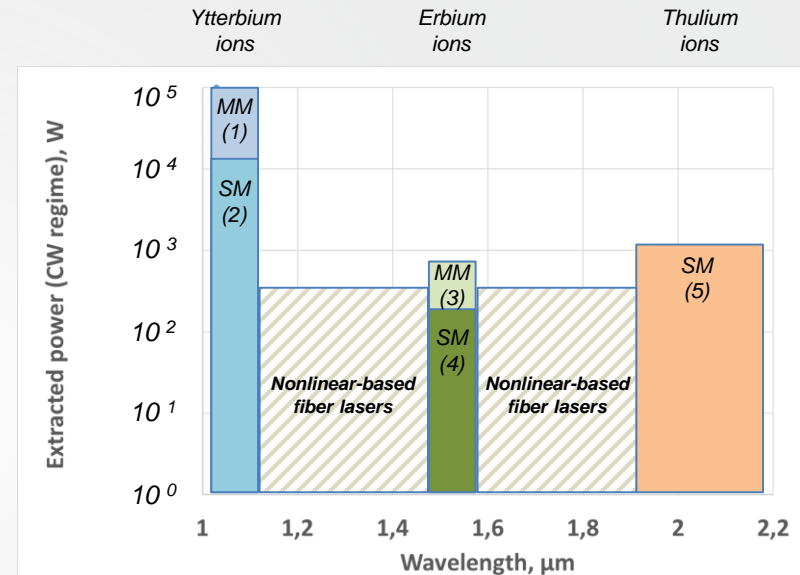
# Laser à fibres : c'est quoi ?



Courtesy of Coherent Inc., extracted from Photonics.com, June 2017

HR-FBG : High-reflectivity fiber Bragg grating

LR-FBG : Low-reflectivity fiber Bragg grating



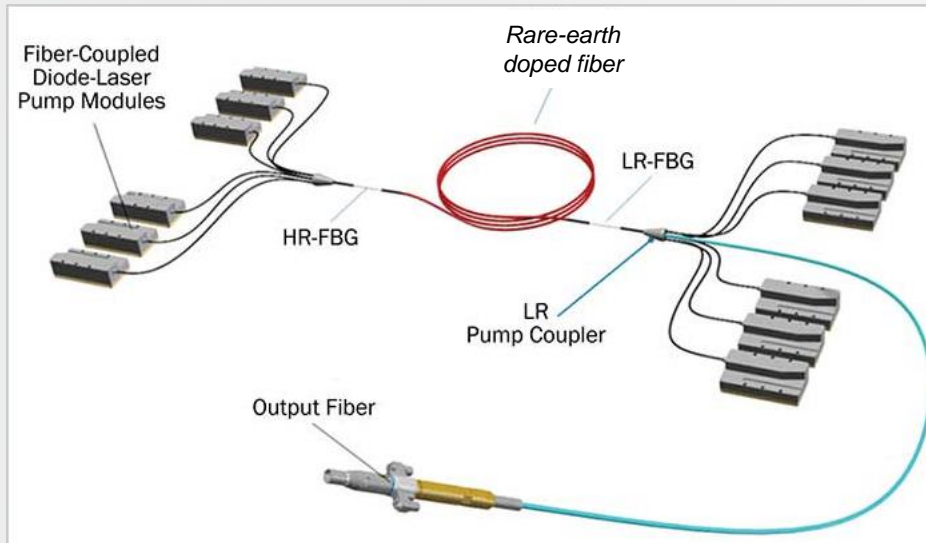
MM : Multimode fiber laser systems

SM : Singlemode fiber laser systems

- (1) Sun et al., « 100kW ultra high power fiber laser », *Optics Continuum*, vol.1, n°9, 2022
- (2) Shiner et al., « The impact of fiber laser technology on the world wide material processing market », *CLEO conference*, paper AF2J.1, USA, 2013
- (3) Lin et al., « 656W Er-doped, Yb-free large-core fiber laser », *Optics Letters*, vol.43, n°13, 2018
- (4) Li et al., « Er/Yb co-doped 345W all-fiber laser at 1535nm using hybrid fiber », *Optics Letters*, vol.48, n°11, 2023
- (5) Anderson et al., « 1.1kW, beam-combinable thulium doped all-fiber amplifier » *Photonics West conference*, paper 116650B, 2021



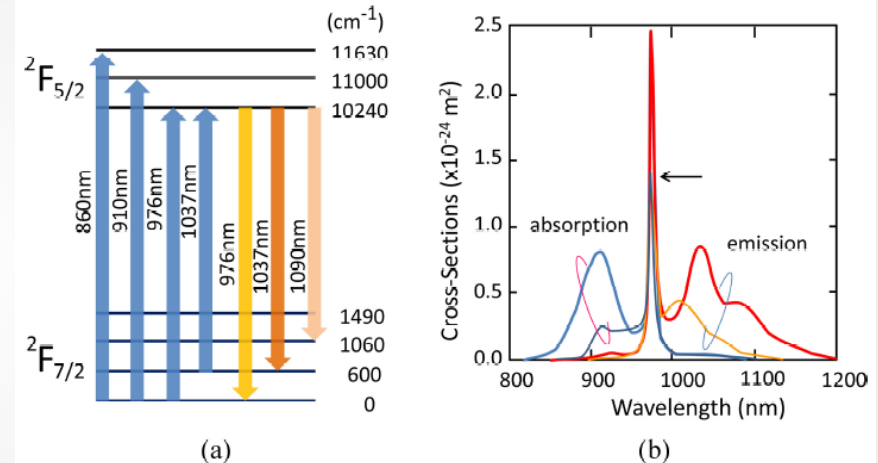
# Pompage direct par diodes laser



Courtesy of Coherent Inc., extracted from Photonics.com, June 2017

HR-FBG : High-reflectivity fiber Bragg grating  
LR-FBG : Low-reflectivity fiber Bragg grating

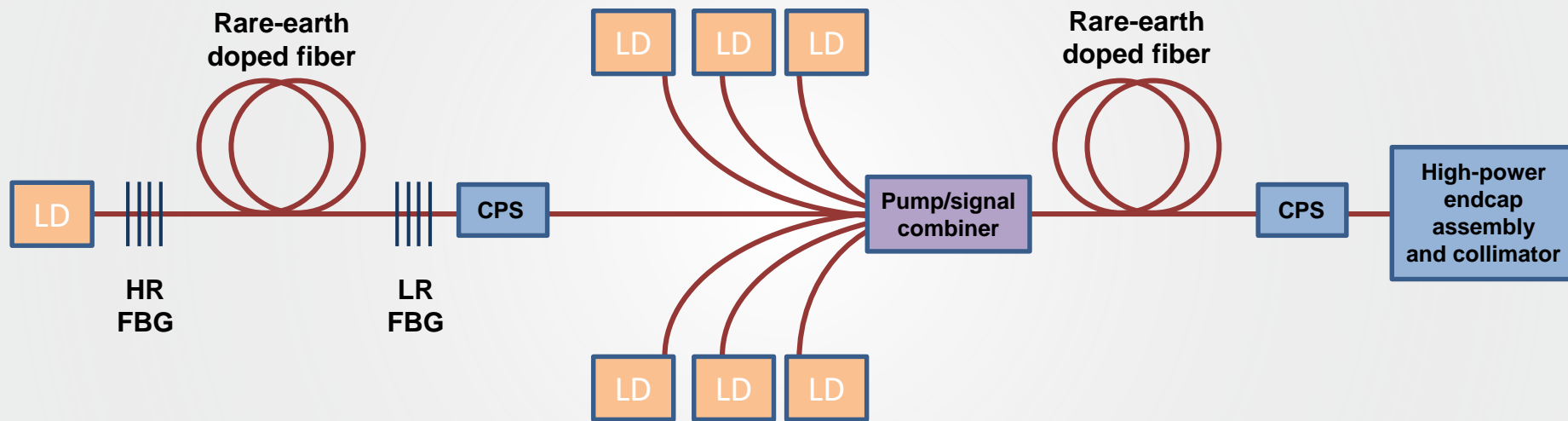
Exemple des spectres d'absorption et d'émission pour les ions Ytterbium dans une matrice silice



ZERVAS and CODEMARD, "High-power fiber lasers: a review", IEEE Journal of selected topics in quantum electronics, vol. 20, n°5, 2014

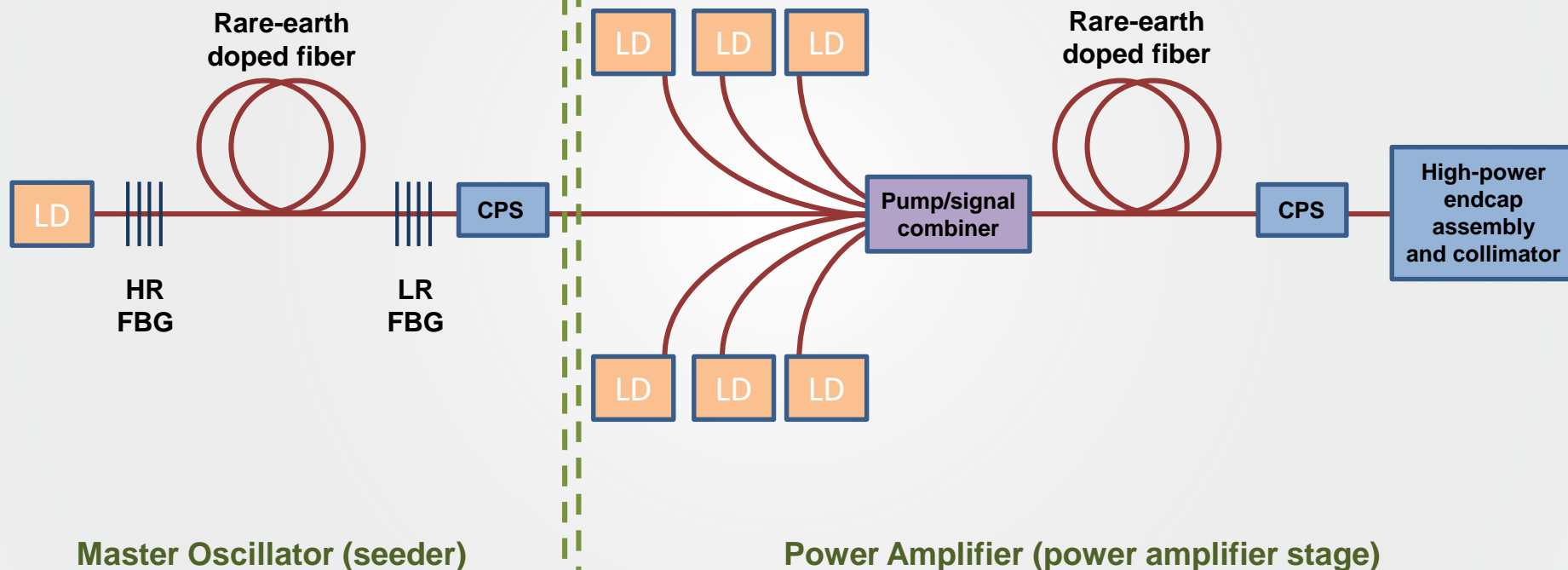


# Autre architecture : le MOPA



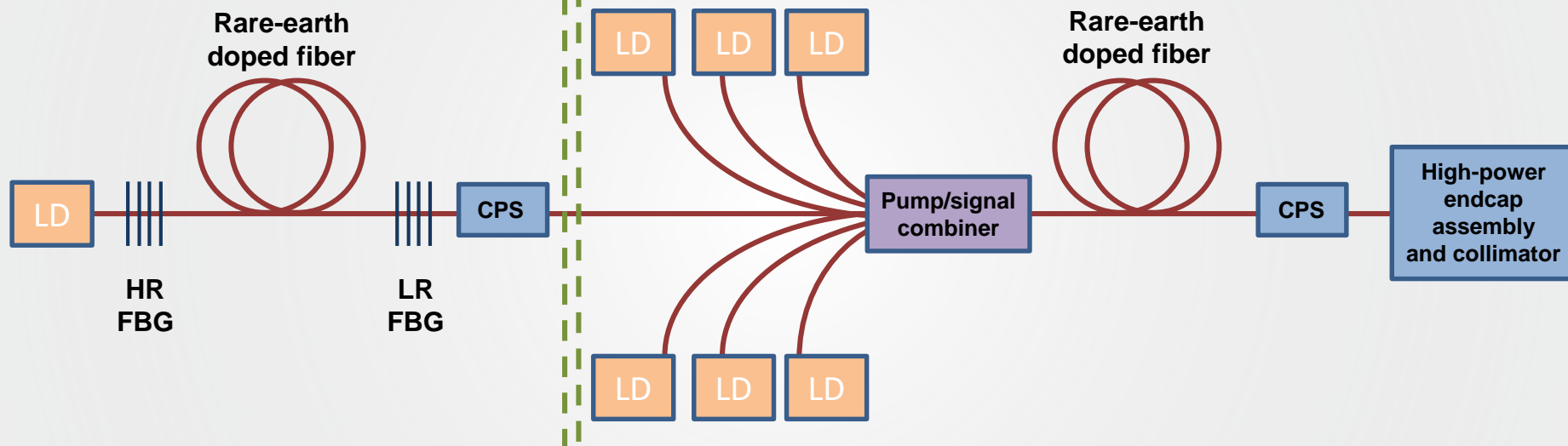


# Autre architecture : le MOPA





# Autre architecture : le MOPA



Avantages : **découplage** de l'étage de gestion des paramètres spatio-temporels de l'étage de montée en puissance

- **Meilleure gestion du spectre** (largeur à mi-hauteur, calage longueur d'onde centrale  $\lambda_{\max}$ )
- **Meilleure gestion de la qualité du faisceau** (excitation préférentielle du mode fondamental dans le booster)
- **Meilleure gestion de la thermique** (meilleure répartition de la charge thermique)





# Laser à fibre : réel bénéfice ?

Comparaison entre un laser à fibre 3 kW et un laser CO<sub>2</sub> 3 kW  
(Applications : *découpe, soudure et traitement métaux épais*)

	CO <sub>2</sub>	Fiber laser
Fiabilité / Durée de vie (heures)	20 000	100 000
Maintenance / Consommables	High	No
Wall-plug efficiency (WPE)	5-10%	> 30%

KAMINSKI, "Laser marking: How to choose the best laser for your marking application", Laser Focus World, April 2011





# Paramètres clés

Puissance optique extraite de signal ( $P_s^{\text{out}}$ )



2



# Paramètres clés

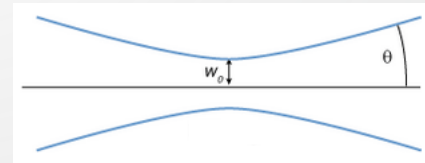
Puissance optique extraite de signal ( $P_s^{\text{out}}$ )

2

## Qualité spatiale du faisceau émis

- **Beam parameter product (BPP)**, exprimé en mm mrad

$$\text{BPP} = \omega_0 \times \theta$$



(BPP  $\uparrow\uparrow \Rightarrow$  qualité du faisceau émis  $\downarrow\downarrow$ )

SIEGMAN, "How to (maybe) measure laser beam quality", in *DPSS Lasers: Applications and Issues*, M. W. Dowley, Ed., Washington, DC, USA: OSA, 1998, pp. 184-199



# Paramètres clés

Puissance optique extraite de signal ( $P_s^{\text{out}}$ )

2

## Qualité spatiale du faisceau émis

- **Beam parameter product (BPP)**, exprimé en mm mrad
- **M<sup>2</sup> factor**, sans unité

SIEGMAN, "How to (maybe) measure laser beam quality", in *DPSS Lasers: Applications and Issues*, M. W. Dowley, Ed., Washington, DC, USA: OSA, 1998, pp. 184-199

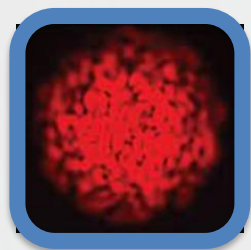
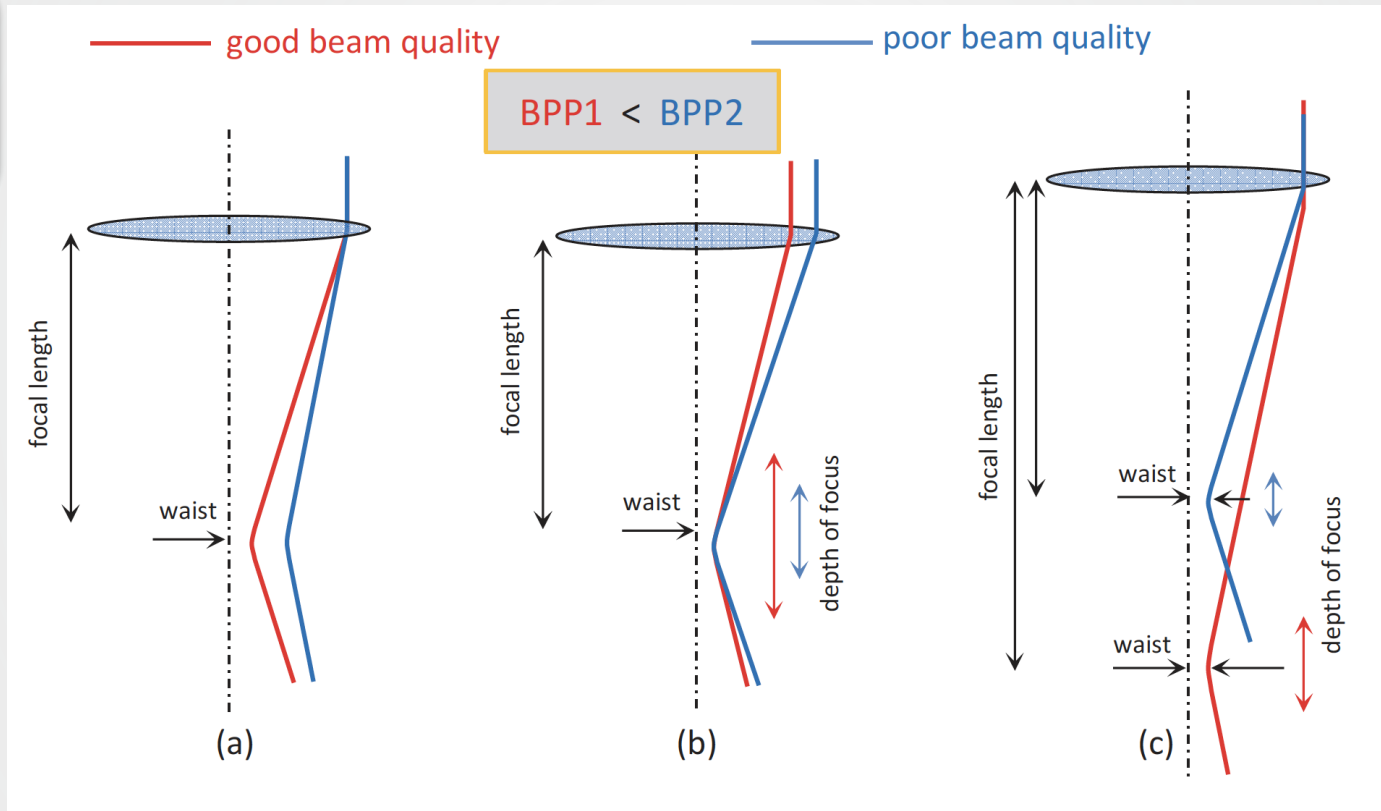
$$M^2 = \frac{BPP_B}{BPP_G} = \frac{\omega_B \times \theta_B}{\omega_G \times \theta_G} = \frac{\pi}{\lambda} \omega_B \theta_B$$

( $M^2 = 1$  pour un faisceau Gaussien, sinon  $M^2 > 1$   
 $M^2 \uparrow \uparrow \Rightarrow$  qualité du faisceau émis  $\downarrow \downarrow$ )





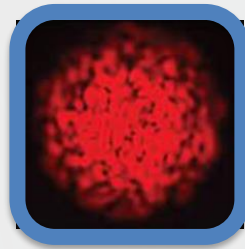
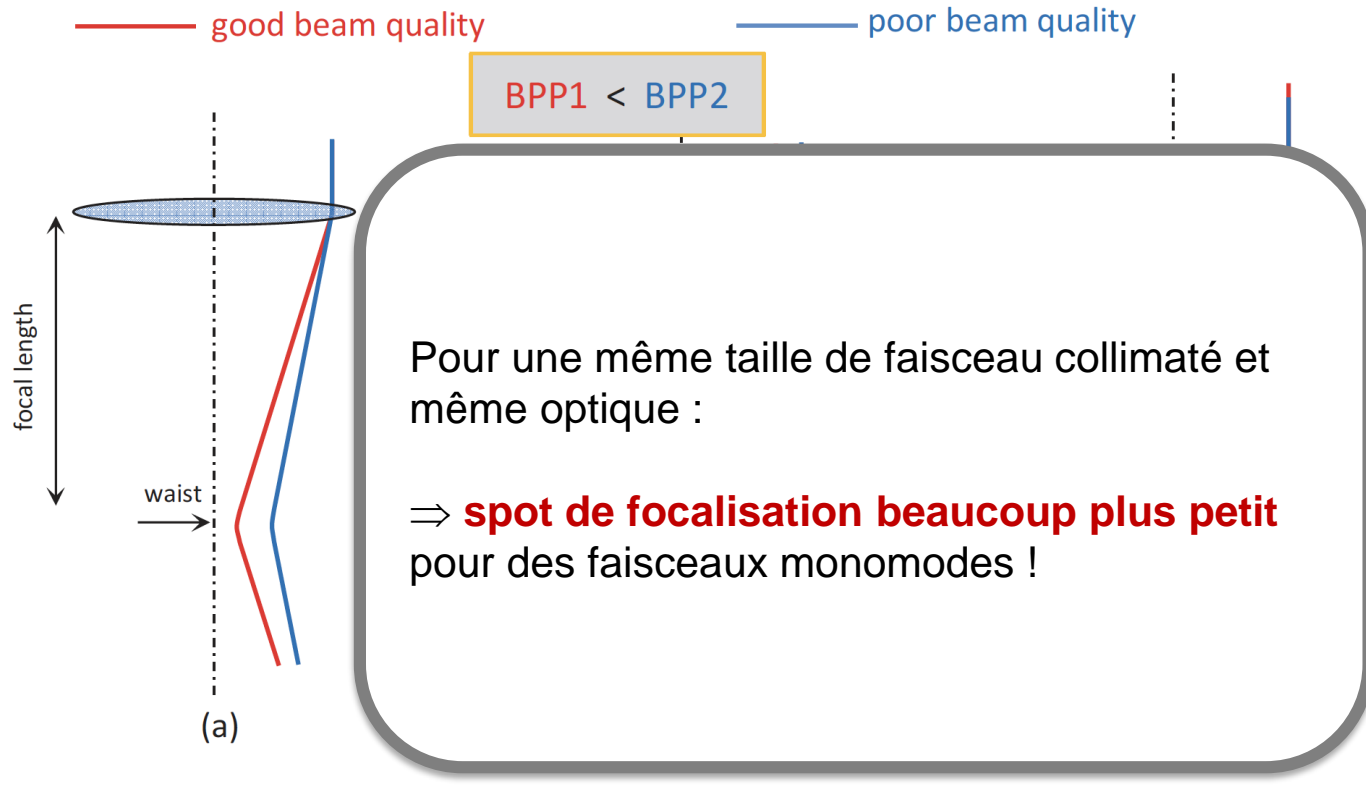
# Impact de la qualité spatiale du faisceau émis



ZERVAS, "High power ytterbium-doped fiber lasers – fundamentals and applications",  
International Journal of Modern Physics B, vol. 28, n°12, 2014



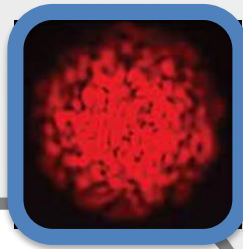
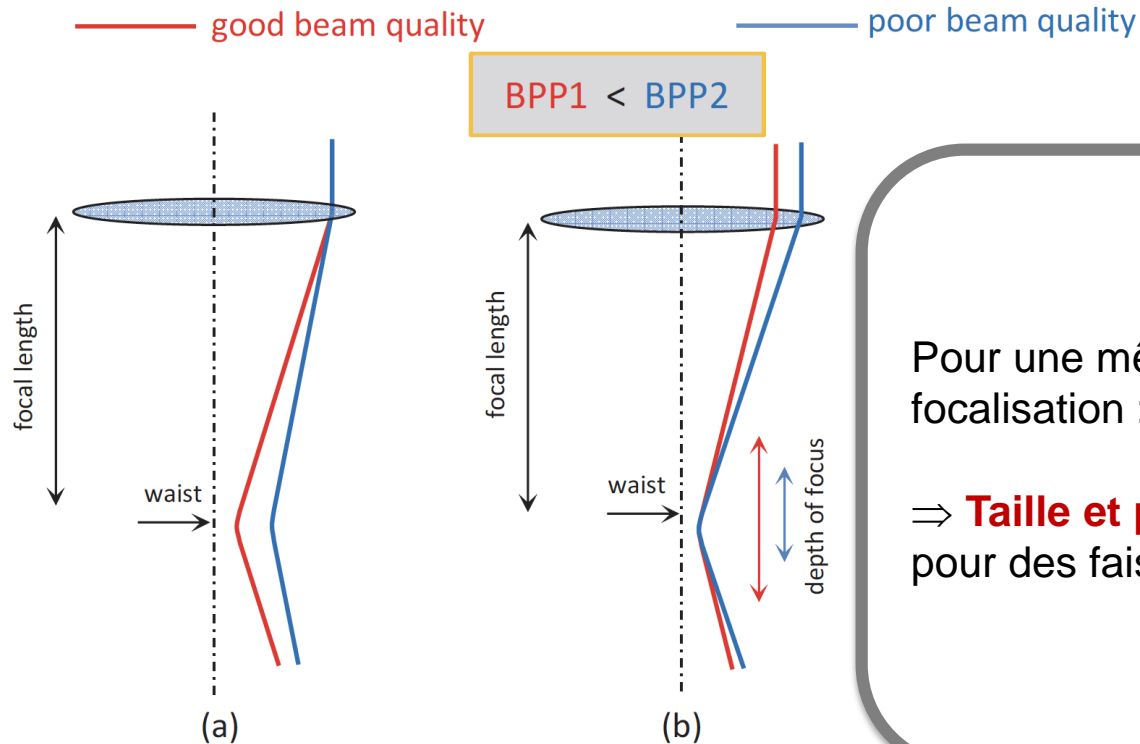
# Impact de la qualité spatiale du faisceau émis



ZERVAS, "High power ytterbium-doped fiber lasers – fundamentals and applications",  
International Journal of Modern Physics B, vol. 28, n°12, 2014



# Impact de la qualité spatiale du faisceau émis



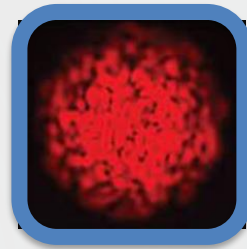
Pour une même taille de spot de focalisation :

⇒ **Taille et poids des optiques ↓↓**  
pour des faisceaux monomodes !

ZERVAS, "High power ytterbium-doped fiber lasers – fundamentals and applications",  
International Journal of Modern Physics B, vol. 28, n°12, 2014



# Impact de la qualité spatiale du faisceau émis



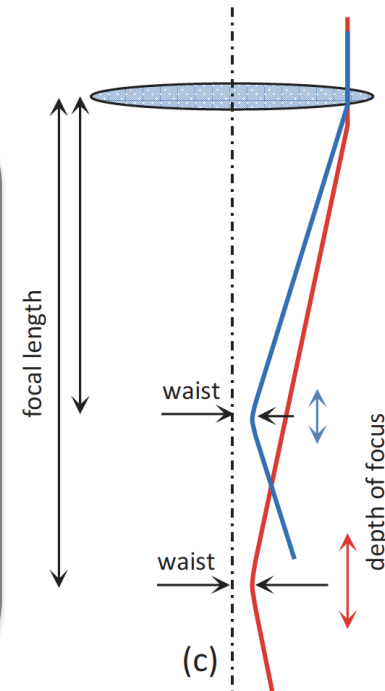
— good beam quality

— poor beam quality

$$BPP1 < BPP2$$

Pour une même taille de faisceau collimaté, même optique et même taille de spot de focalisation :

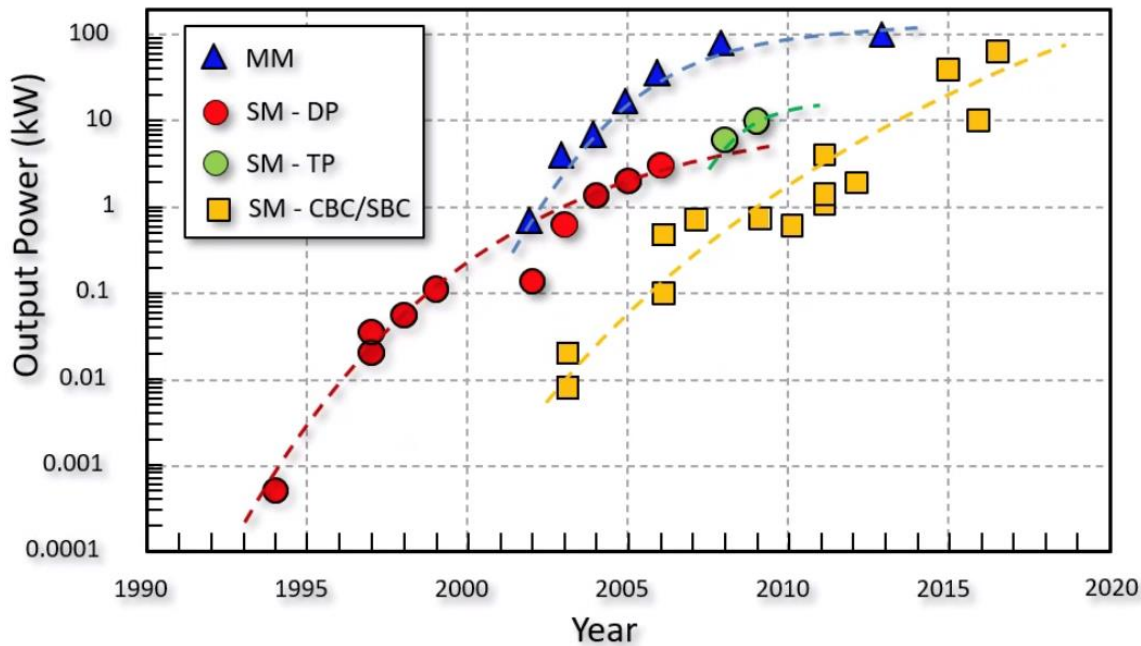
⇒ **spot de focalisation à une distance beaucoup plus grande** pour des faisceaux monomodes !



ZERVAS, "High power ytterbium-doped fiber lasers – fundamentals and applications",  
International Journal of Modern Physics B, vol. 28, n°12, 2014



# Montée en puissance

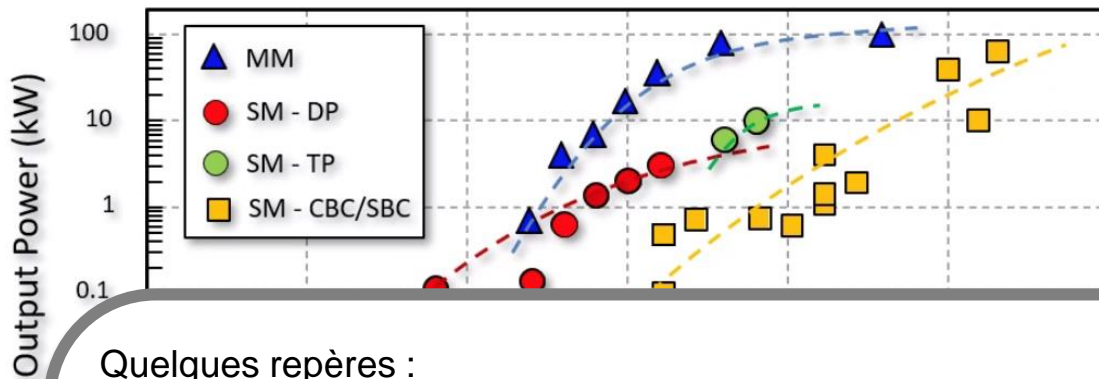


MM : Multimode fiber laser systems  
SM : Singlemode fiber laser systems  
DP : Diode pumped systems  
TP : Tandem pumped systems  
CBC/SBC : Coherent/Spectral beam combination

ZERVAS and CODEMARD, "High-power fiber lasers: a review", *IEEE Journal of selected topics in quantum electronics*, vol. 20, n°5, 2014



# Montée en puissance



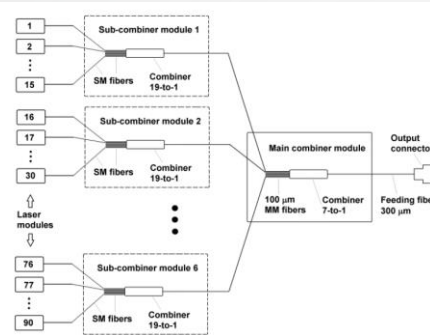
MM : Multimode fiber laser systems  
SM : Singlemode fiber laser systems  
DP : Diode pumped systems  
TP : Tandem pumped systems  
CBC/SBC : Coherent/Spectral beam combination

## Quelques repères :

- **jusqu'à 10 kW** avec des **systèmes à fibre mono-cœur, monomode**
  - pompage direct par diodes lasers (faibles brillances) jusqu'à 3-4 kW
  - pompage résonnant par lasers à fibres (brillances élevées) > 4 kW
- **jusqu'à 60 kW** avec des systèmes ayant des **faisceaux en limite de diffraction** basés sur des phénomènes de **combinaison cohérente** de systèmes lasers à fibre kW-class monomodes
- **jusqu'à 100 kW** avec des **systèmes multimodes** (**combinaison incohérente** de rayonnements issus de systèmes lasers à fibre kW-class monomodes)



# Laser à fibres multimodes 100kW



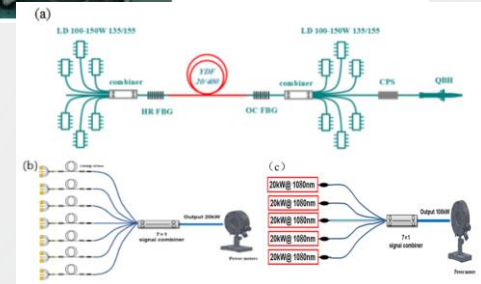
## Quelques chiffres :

- 90 lasers de 1,4 kW
- 3,6 tonnes
- surface au sol = 2,9 m<sup>2</sup>
- volume = 5,4 m<sup>3</sup>
- $M^2 < 50$
- $D_{\text{cœur}}$  (fibre de sortie) = 300μm

FORMIN et al., "100 kW CW Fiber Laser for Industrial Applications",  
International Conference Laser Optics, 14544907, Russia, 2014

## Quelques chiffres :

- 35 lasers de 3 kW
- $M^2 \sim 56$
- $D_{\text{cœur}}$  (fibre de sortie) = 400μm



SUN et al., "100 kW ultra high power fiber laser",  
Optics Continuum, vol. 1, n°9, p. 1932, 2022





# Laser à fibres multi kW-class quasi-monomodes

Principales limitations physiques à surmonter :

- Seuil de dommage du matériau (claquage diélectrique)
- Seuil d'apparition des effets non-linéaires (Raman, Brillouin, Kerr)
- Photo-noircissement
- Seuil d'apparition des instabilités modales transverse (TMI)





# La fibre optique : une brique technologique

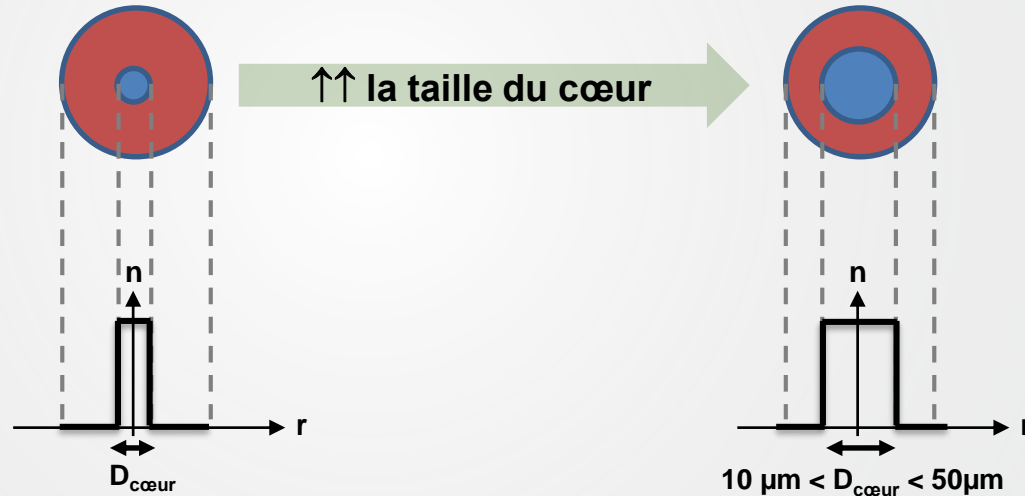
2  
évolutions  
majeures



# La fibre optique : une brique technologique

## Fibres LMA (Large Mode Area)

2  
évolutions  
majeures

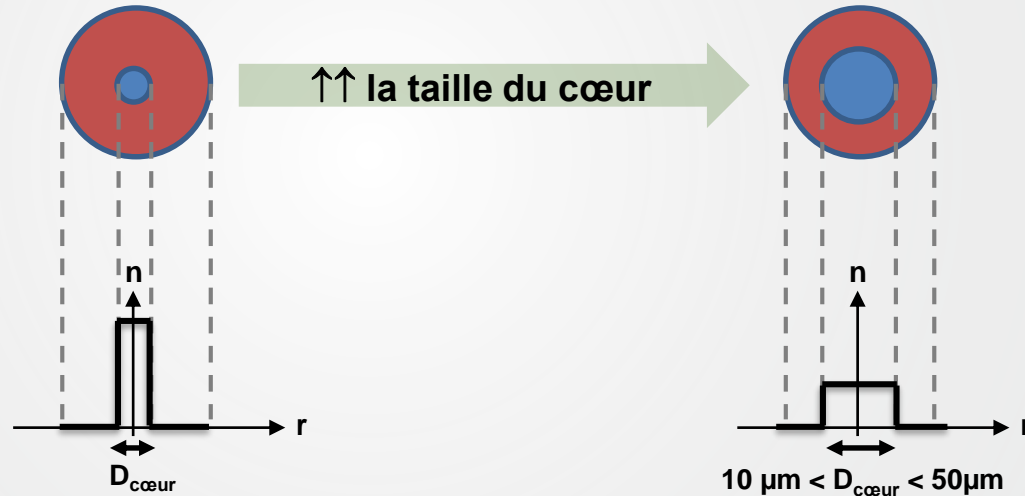




# La fibre optique : une brique technologique

## Fibres LMA (Large Mode Area)

2  
évolutions  
majeures

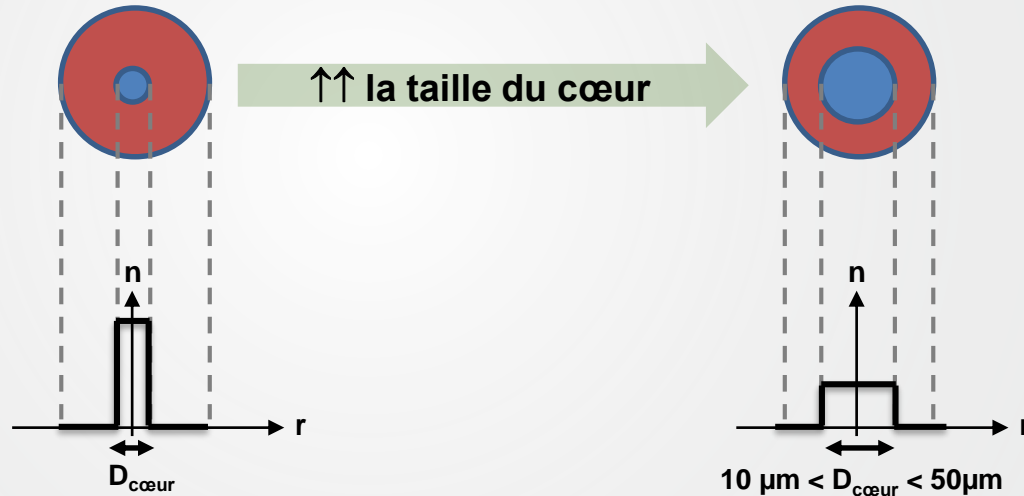




# La fibre optique : une brique technologique

## Fibres LMA (Large Mode Area)

2  
évolutions  
majeures



La fibre reste multimode  
⇒ filtrage modal par la courbure

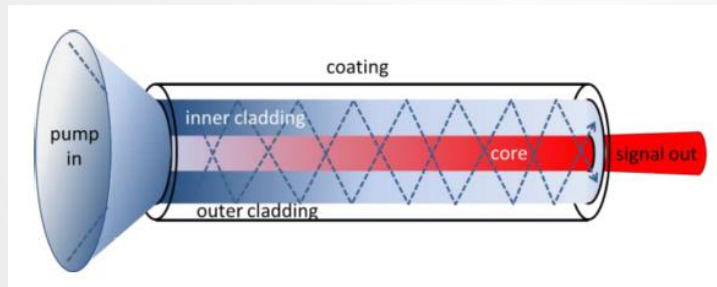


# La fibre optique : une brique technologique

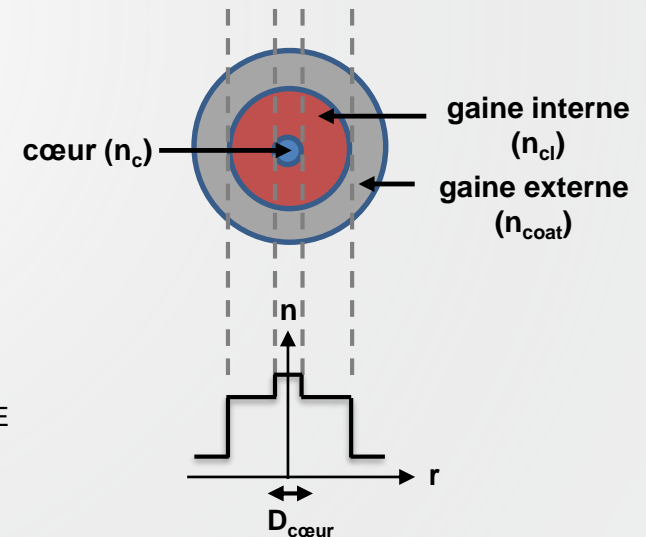
Fibres LMA (Large Mode Area)

Fibres à double gaine

2  
évolutions  
majeures



ZERVAS and CODEMARD, "High power fiber lasers : a review", IEEE Journal of selected topics in quantum electronics, vol. 20, n°5, 2014



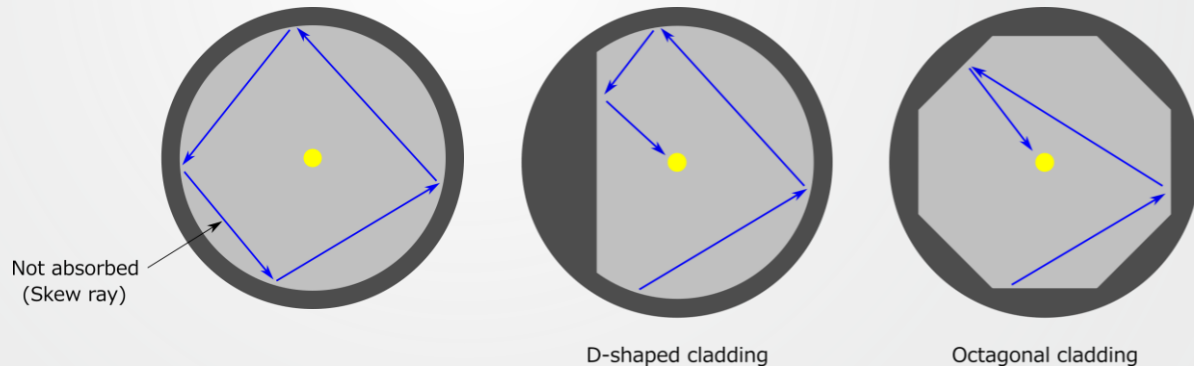


# La fibre optique : une brique technologique

Fibres LMA (Large Mode Area)

Fibres à double gaine

2  
évolutions  
majeures





# La fibre optique : une brique technologique

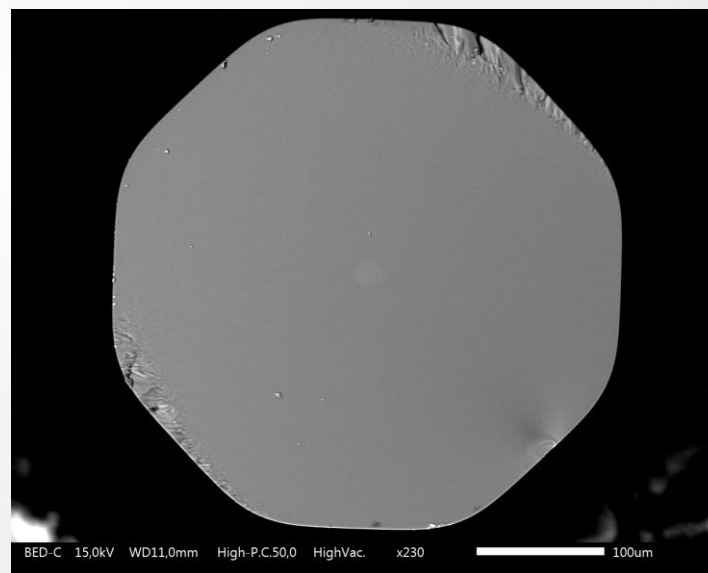
LIEKKI®

Yb1200-20/400 – Large Mode Area Ytterbium Doped Fiber

## Typical Fiber Specifications

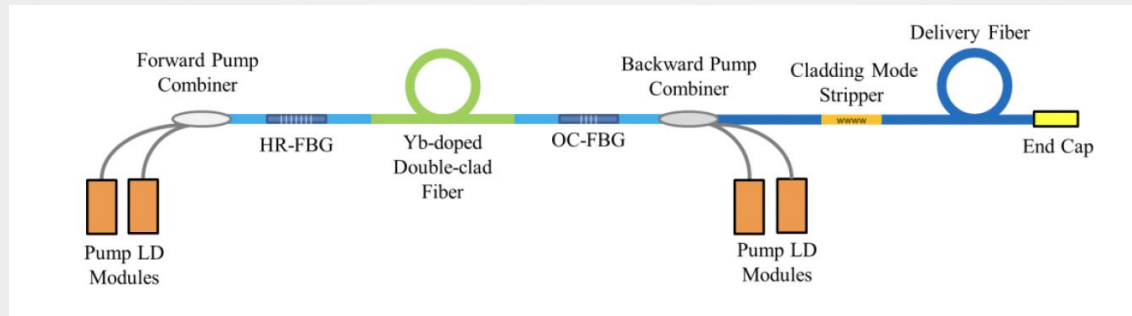
Fiber		LIEKKI® Yb1200-20/400DC (HP)
Optical	Units	
Peak Cladding Absorption at 976 nm (nominal)	dB/m	(2.6)
Cladding Absorption at 920 nm	dB/m	0.55 ± 0.05
Mode Field Diameter <sup>(1)</sup> (nominal)	µm	(17.0)
Core Numerical Aperture (real/NA)		0.065 ± 0.003
Cladding Numerical Aperture, ≥		0.48
Core background loss at 1200 nm, ≤	dB/km	10
Birefringence, ≥	1E-04	-
Geometrical and mechanical		
Core Diameter	µm	20.0 ± 1.5
Core Concentricity Error, ≤	µm	1.2
Cladding Diameter (flat-to-flat)	µm	400 ± 10
Cladding Geometry		Octagonal
Coating Diameter		520 ± 15
Coating Material		Dual coated low index acrylate
Proof Test, ≥	kpsi	100

<sup>(1)</sup> Far-field Mode Field Diameter at 1060nm





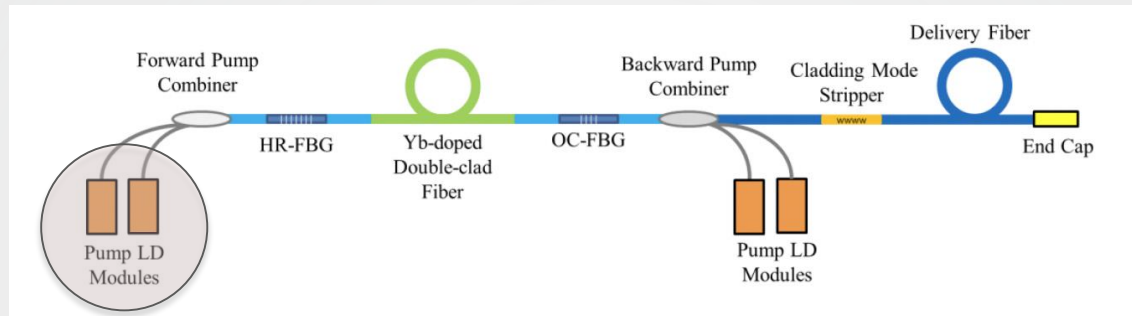
# Des composants indispensables



WANG *et al.*, "8-kW single-stage all-fiber Yb-doped fiber laser with a BPP of 0.50 mm-mrad", SPIE Photonics West conference, paper 11260, 2020



# Des composants indispensables

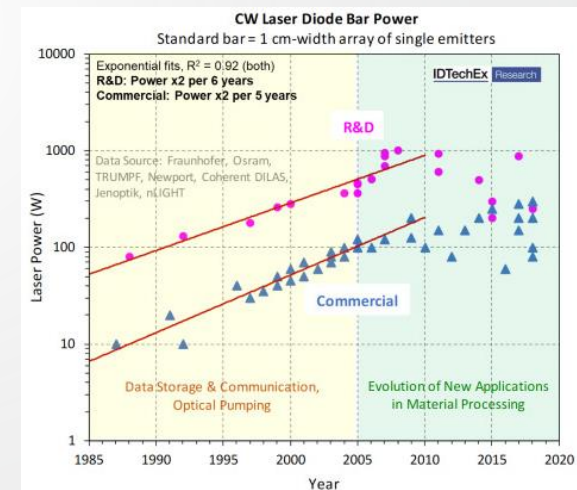


WANG *et al.*, "8-kW single-stage all-fiber Yb-doped fiber laser with a BPP of 0.50 mm-mrad", SPIE Photonics West conference, paper 11260, 2020

- Diodes laser pour pompage optique



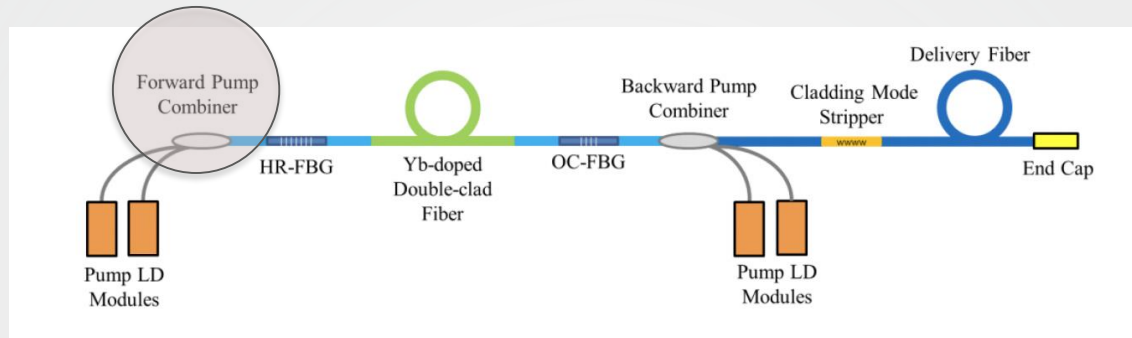
up to 500 W with 200  $\mu\text{m}$  core pigtails



from semiconductor-today.com/news\_items/2019/jul

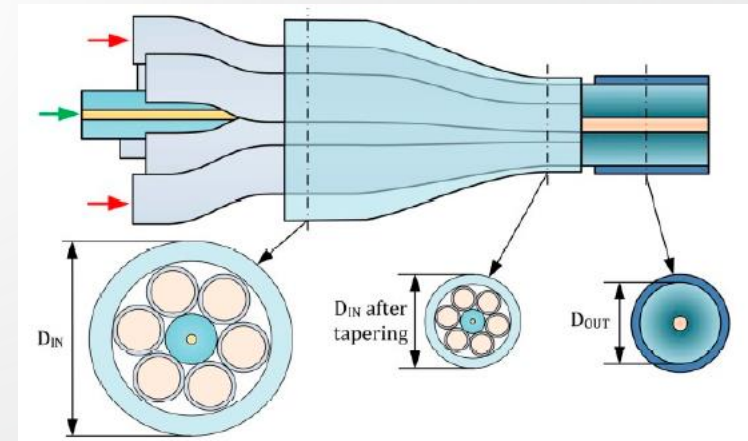


# Des composants indispensables



WANG *et al.*, "8-kW single-stage all-fiber Yb-doped fiber laser with a BPP of 0.50 mm-mrad", SPIE Photonics West conference, paper 11260, 2020

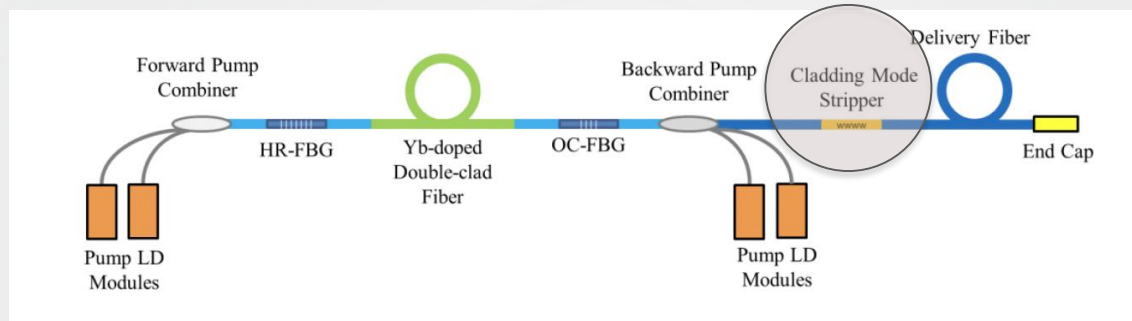
- Diodes laser pour pompage optique
- **Combineurs pompe signal**  
 $N+1 \rightarrow 1$



STACHOWIAK, "High-power passive fiber components for all-fiber lasers and amplifiers application - Design and fabrication", Photonics, vol. 5, n°38, 2018

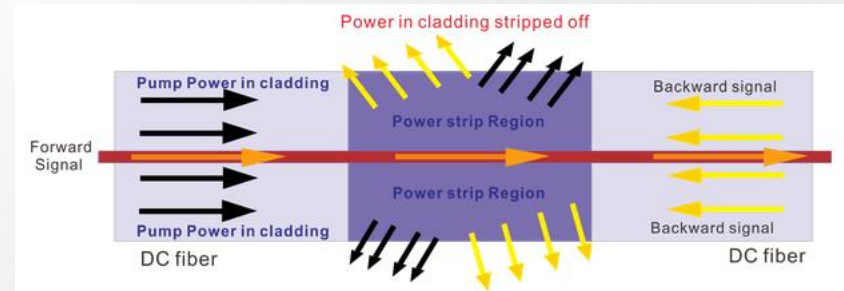


# Des composants indispensables



WANG *et al.*, "8-kW single-stage all-fiber Yb-doped fiber laser with a BPP of 0.50 mm-mrad", SPIE Photonics West conference, paper 11260, 2020

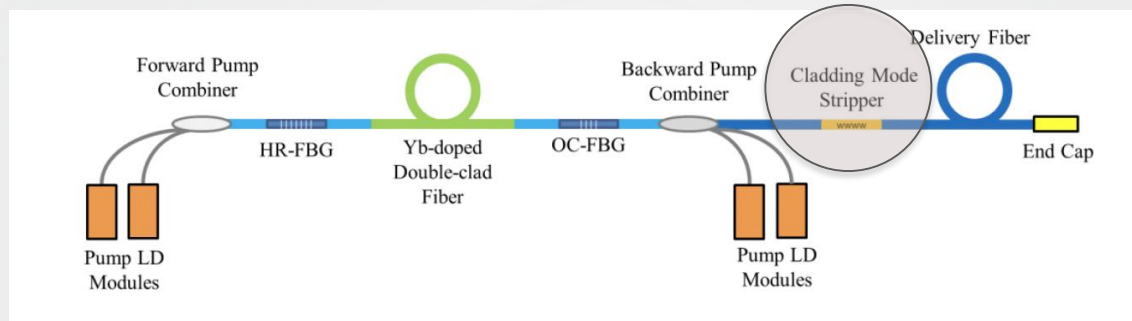
- Diodes laser pour pompage optique
- Combineurs pompe signal  $N+1 \rightarrow 1$
- Cladding pump stripper (CPS)



from <https://www.dkphotonics.com/product/2um-cladding-power-stripper.html>



# Des composants indispensables

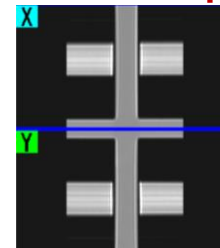


WANG *et al.*, "8-kW single-stage all-fiber Yb-doped fiber laser with a BPP of 0.50 mm-mrad", SPIE Photonics West conference, paper 11260, 2020

- Diodes laser pour pompage optique
- Combineurs pompe signal  
 $N+1 \rightarrow 1$
- Cladding pump stripper (CPS)

La **force d'un laser à fibre** est son **architecture monolithique** (système tout fibré : robustesse et fiabilité au cours du temps)  $\Rightarrow$  nombreux composants à assembler via des **soudures entre fibres optiques** (fibres actives sur fibres passives et fibres passives sur fibres passives)

**Point critique = compétences / savoir-faire pour la réalisation de ces soudures**





# Encore des choses à imaginer pour aller plus loin (exemple 1/2)

712 Vol. 48, No. 3 / 1 February 2023 / Optics Letters

Letter

## Optics Letters

### 1.2-kW all-fiber Yb-doped multicore fiber amplifier

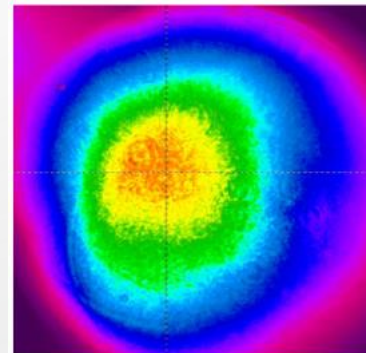
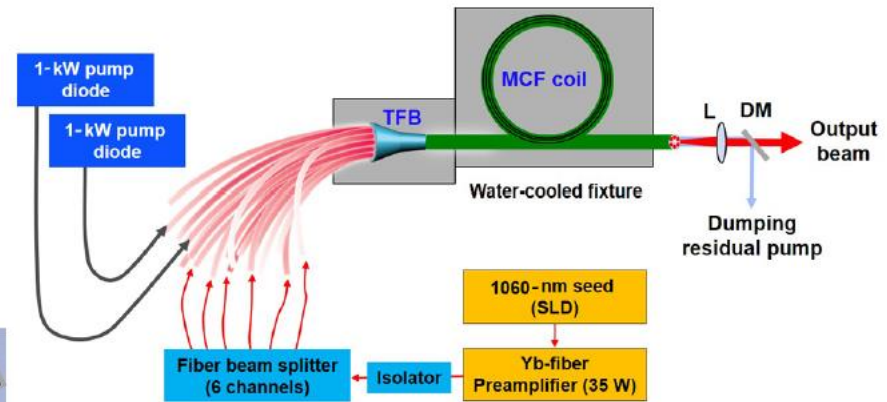
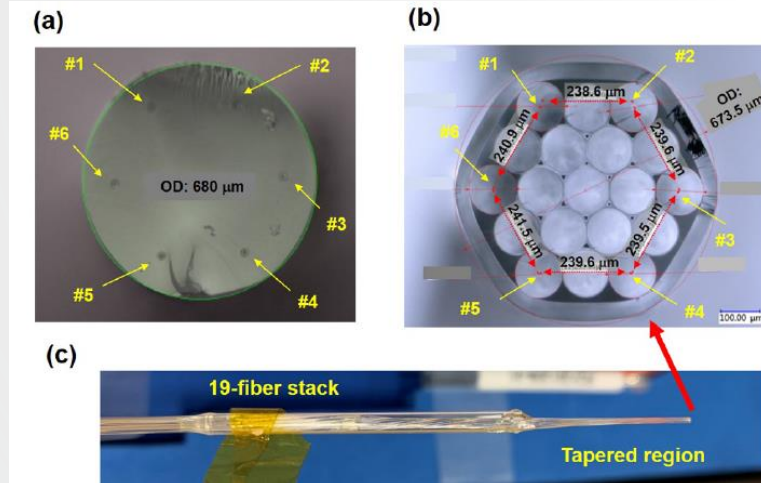
LUIS F. ORTEGA,<sup>1</sup> THOMAS FEIGENSON,<sup>1</sup> YIN WAN TAM,<sup>1</sup> PETER REEVES-HALL,<sup>1</sup> TSO YEE FAN,<sup>1</sup> MICHAEL MESSERLY,<sup>2</sup> CHARLES X. YU,<sup>2</sup> AND KYUNG-HAN HONG<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Massachusetts Institute of Technology (MIT) Lincoln Laboratory, 244 Wood Street, Lexington, Massachusetts 02421, USA

<sup>2</sup>Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), 7000 East Ave., Livermore, CA 94550, USA

\*Corresponding author: kyung-han.hong@ll.mit.edu

Received 18 October 2022; revised 15 December 2022; accepted 2 January 2023; posted 3 January 2023; published 25 January 2023





# Encore des choses à imaginer pour aller plus loin (exemple 2/2)

Research Article  
Optics EXPRESS

## Demonstration of constant-cladding tapered-core Yb-doped fiber for mitigating thermally-induced mode instability in high-power monolithic fiber amplifiers

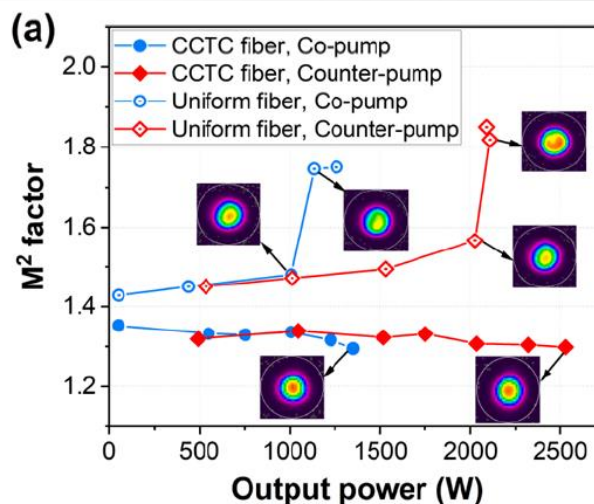
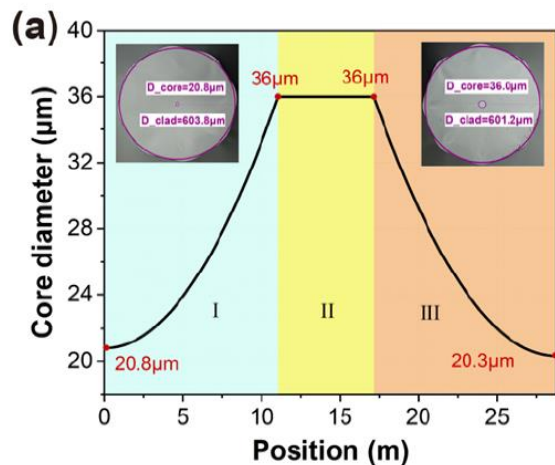
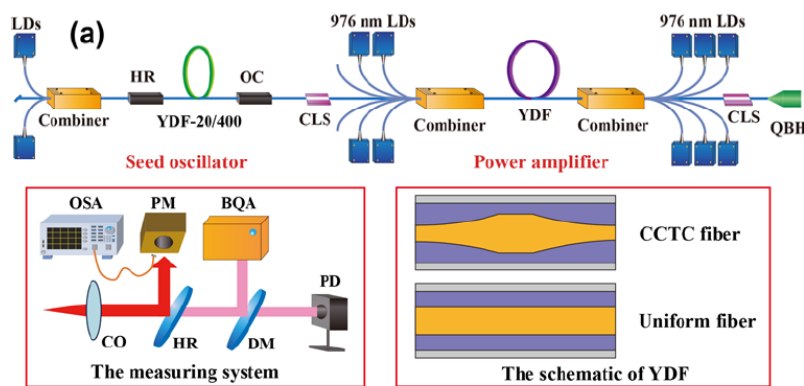
YUN YE,<sup>1</sup> XIANFENG LIN,<sup>2</sup> XIAOMING XI,<sup>1</sup> HANWEI ZHANG,<sup>1</sup> BAOLAI YANG,<sup>1</sup> CHEN SHI,<sup>1</sup> XIAOLIN WANG,<sup>1,3</sup> JINYAN LI,<sup>2,4</sup> AND XIAOJUN XU<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China

<sup>2</sup>Wuhan National Laboratory for Optoelectronics (WNLO), Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

<sup>3</sup>chinaphotonics@163.com

<sup>4</sup>lty@mail.hust.edu.cn





# Pour quelles applications ??

Free-space optical communication technologies



HORST et al., "Tbit/s line-rate satellite feeder links enabled by coherent modulation and full-adaptive optics", Light: Science & Applications, 12:153, 2023

Material macroprocessing (cutting, welding, brazing, drilling, engraving, sintering, marking)



Credit thefabricator.com



Credit GF Casting Solutions

Direct energy weapons



Courtesy of John F. Williams / U.S. Navy

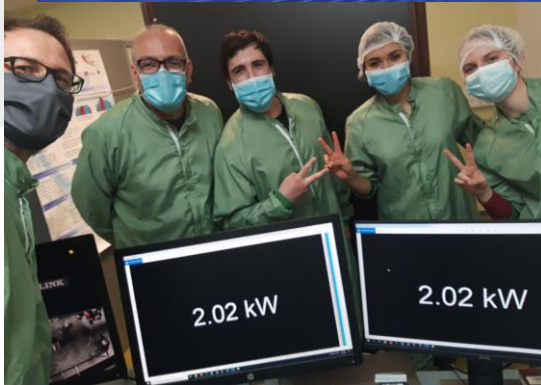


# Les technologies fibrées pour les lasers continus @ XLIM

Armes lasers

**Cilas**  
laser and beyond

**-X-LAS** laboratoire commun  
pour la conception de sources lasers de puissance basées sur des architectures innovantes

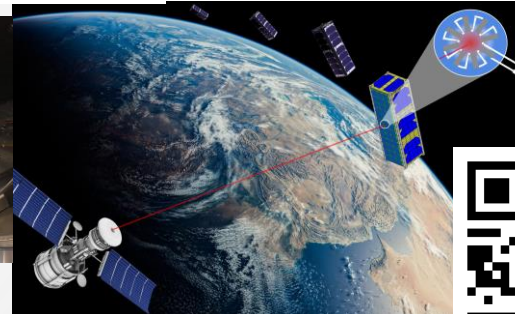


Rechargement de CubeSats  
par faisceau laser

**WiPTherm**



This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant N°863307.



Synthèse de matériaux « sans photonoircissement »

**ALPhA NOV**  
Centre Technologique Optique et Lasers

