



Montée en puissance des sources laser fibrées, l'arme laser :

- Naissance des sources laser fibrées
- Evolution des technologies et des performances
- Brilliance et puissance, le nécessaire compromis
- Les sources monomodes multi-kW fibrées en France
- Quelles perspectives pour les sources laser fibrées ?

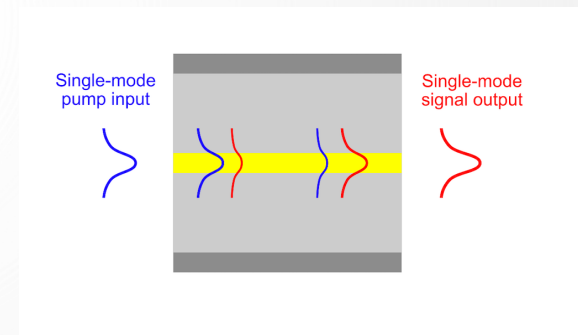
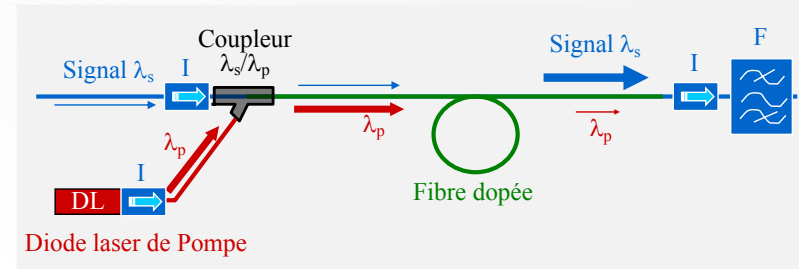
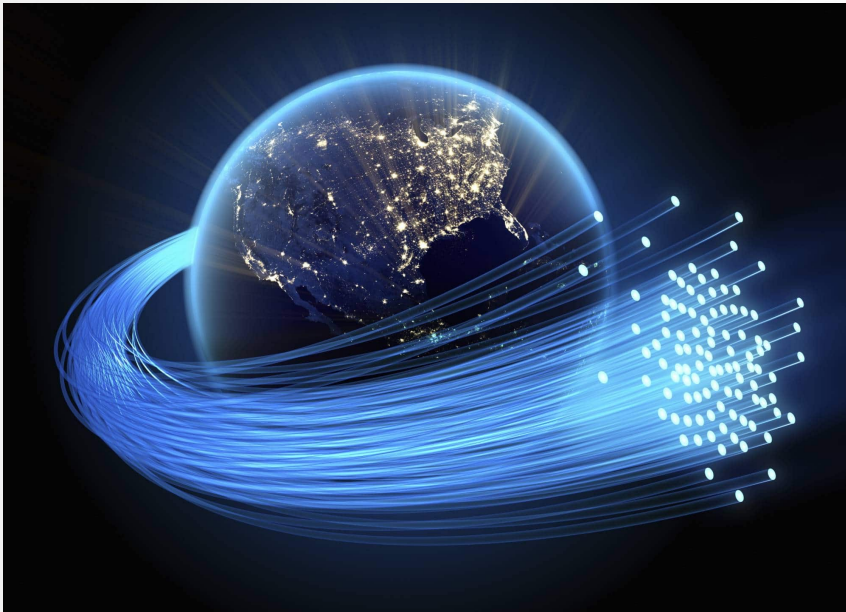
Philippe ROY : philippe.roy@xlim.fr



Université
de Limoges

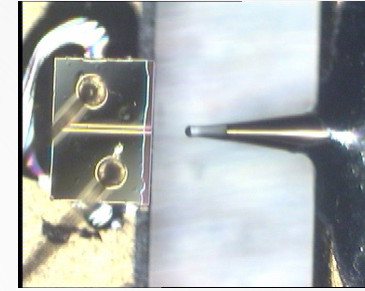
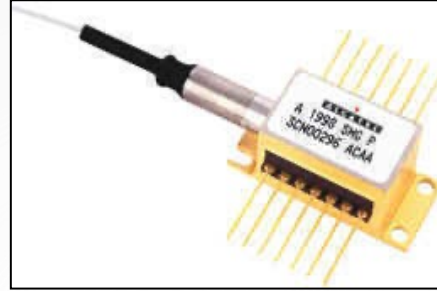
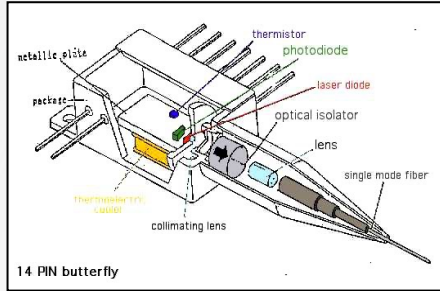
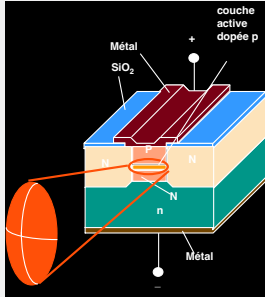


NAISSANCE DES SOURCES LASER FIBRÉES



Dans les années 80-90, les télécommunications par fibres optiques révolutionnent l'amplification optique ...

NAISSANCE DES SOURCES LASER FIBRÉES



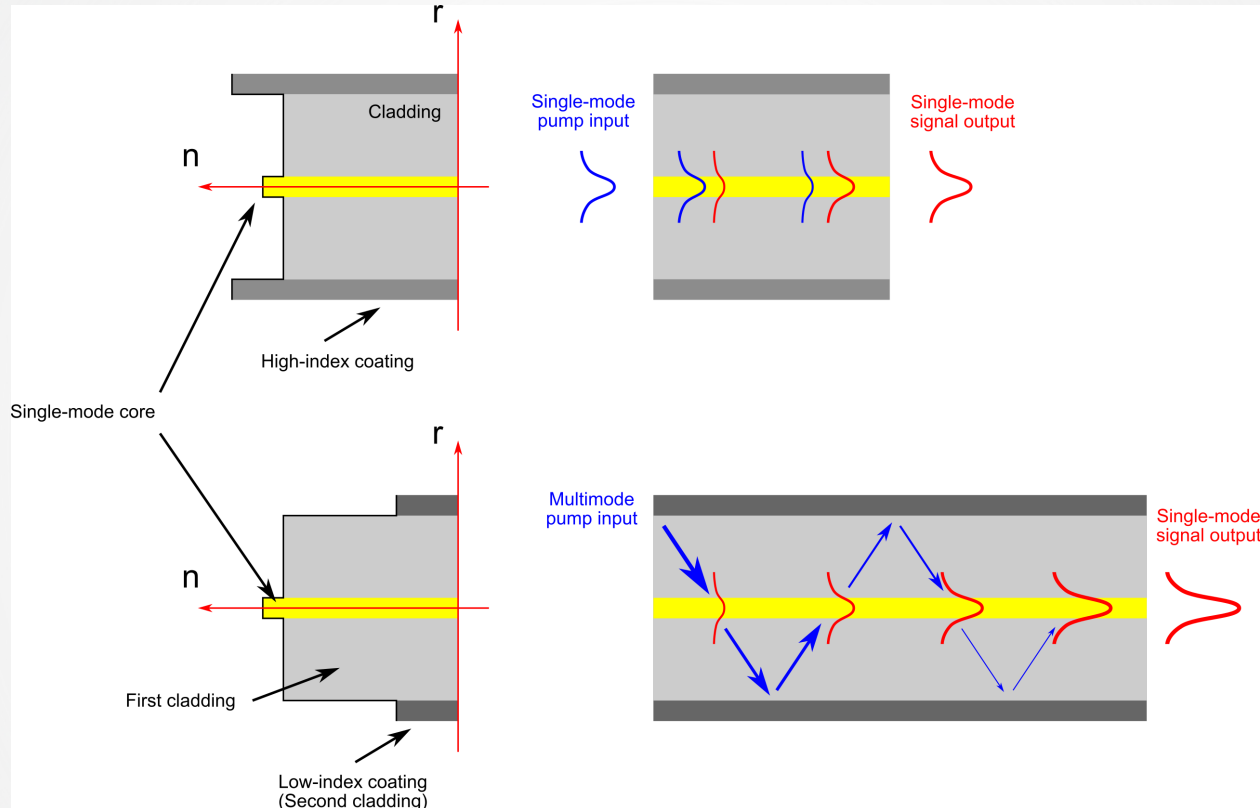
1 W



The « airborne laser program » 1996-2006

Boeing 747-400F modifié pour accueillir un laser chimique
(Megawatt-class Chemical Oxygen Iodine Laser COIL)

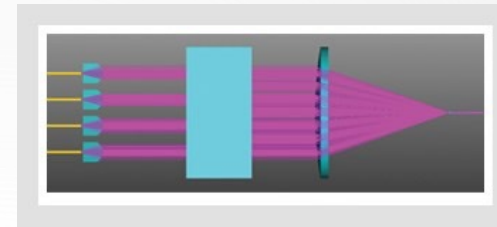
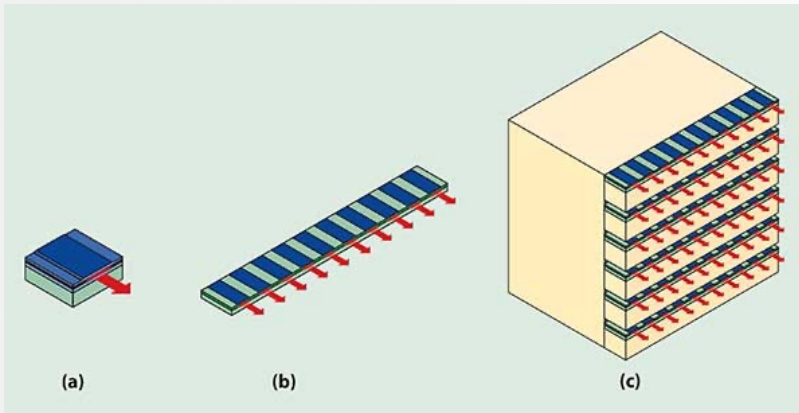
EVOLUTION DES TECHNOLOGIES ET DES PERFORMANCES



Les fibres à double ou à triple gaine ont permis de faire progresser la puissance moyenne :

- De quelques dizaines de watts moyens dans les années 90
- À plusieurs kW aujourd'hui

BRILLANCE ET PUISSANCE, LE NÉCESSAIRE COMPROMIS



Jusqu'à 1000 W



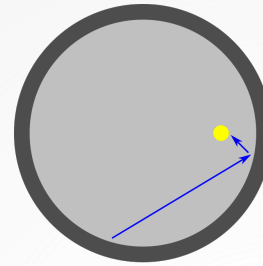
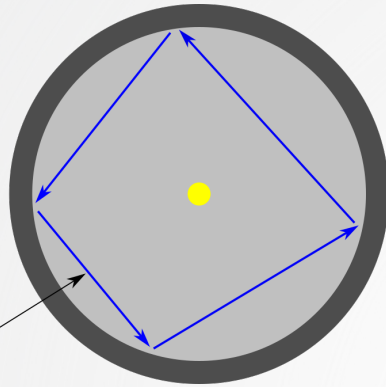
500 W par module dans de très grosses fibres optiques de 200 μm (cœur)

On dégrade la brillance* des diodes pour favoriser la puissance !

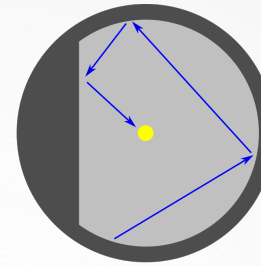
La fibre optique devient le support d'une conversion de brillance pour réobtenir une émission en limite de diffraction

* Même densité surfacique de puissance mais divergence fortement augmentée

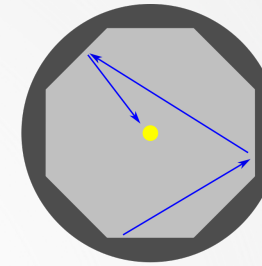
EVOLUTION DES TECHNOLOGIES ET DES PERFORMANCES



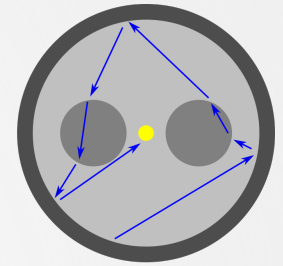
Offset core



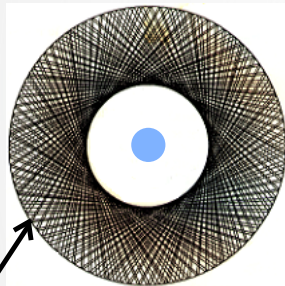
D-shaped cladding



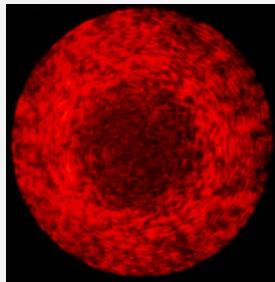
Octagonal cladding



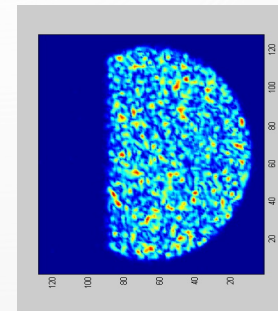
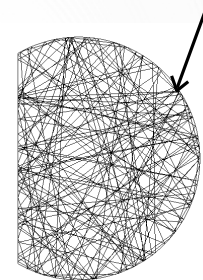
Stress-applying part



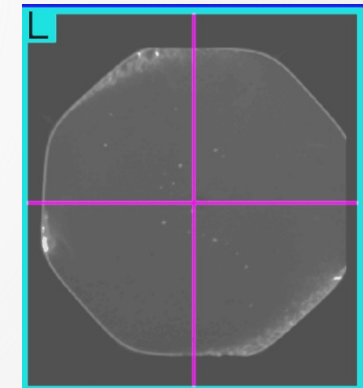
(caustique)



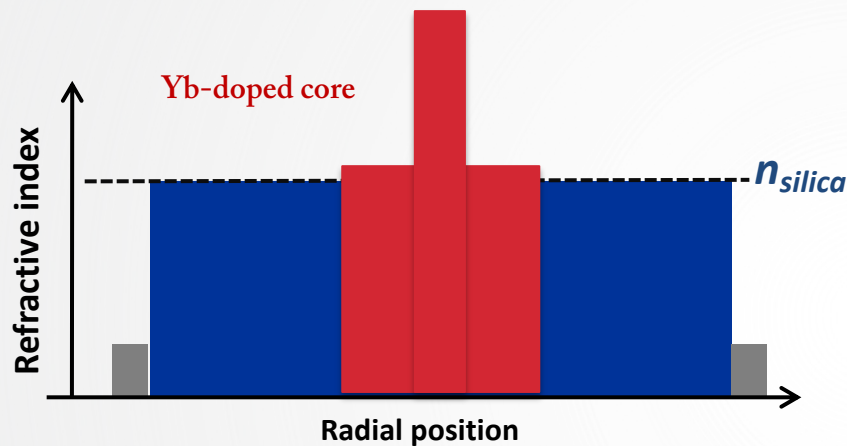
Instaurer une dynamique de propagation irrégulière pour améliorer l'efficacité de pompage



Tout en restant pragmatique ...



EVOLUTION DES TECHNOLOGIES ET DES PERFORMANCES

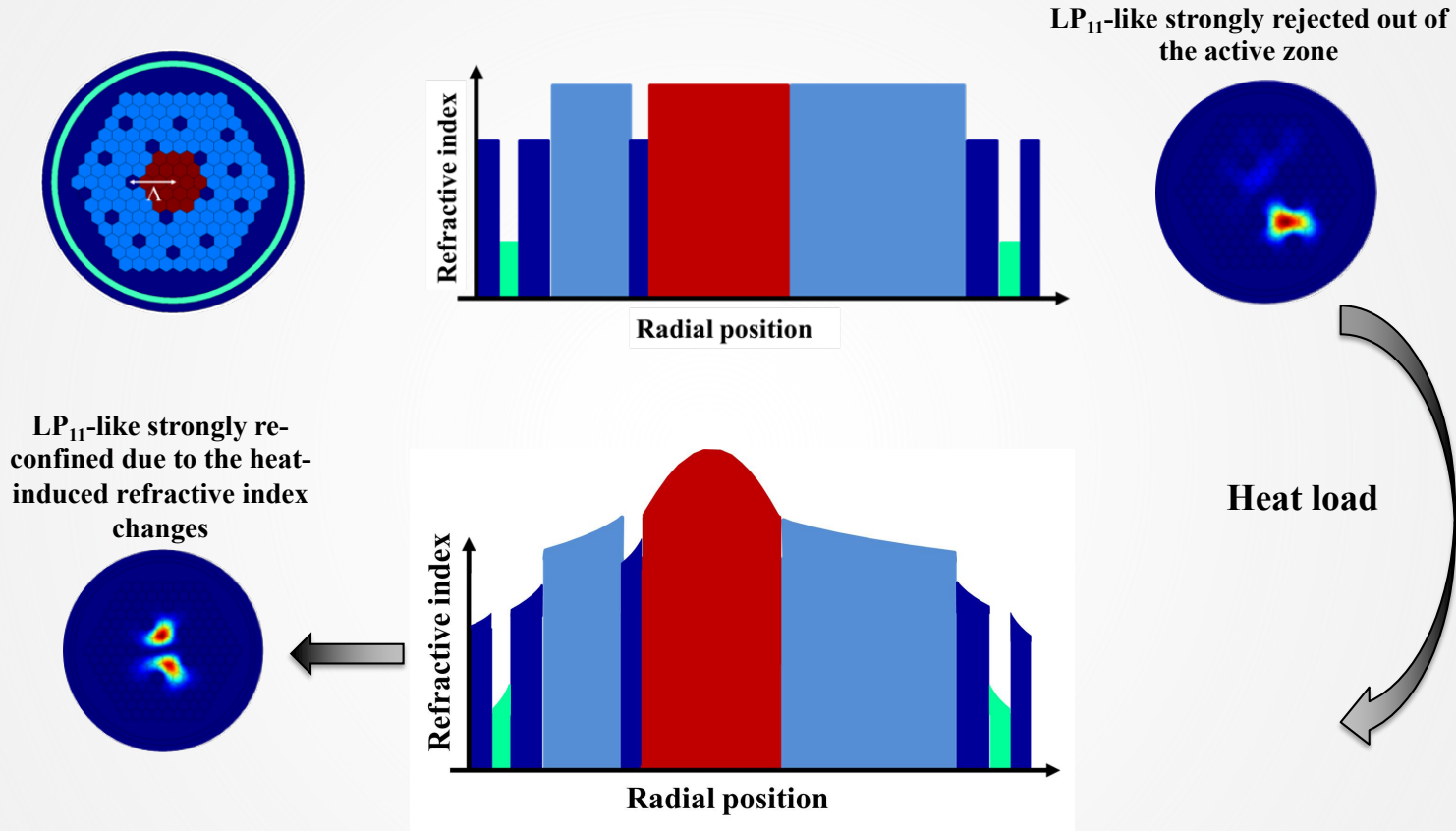


	SM Flexible optical fibers	Bulk lasers
Core diameter	4 to 15 μm	800 μm to 20cm (LMJ)
Typ. Fiber length	3m to 50m	few cm
Maximum refractive index contrast	10^{-3} to 10^{-2}	$3 \cdot 10^{-7}$
S/V	4000 to 50000	10 to 50
Heat load	Insensitive	Very sensitive

On augmente le diamètre du cœur pour lutter contre les effets non linéaires mais :

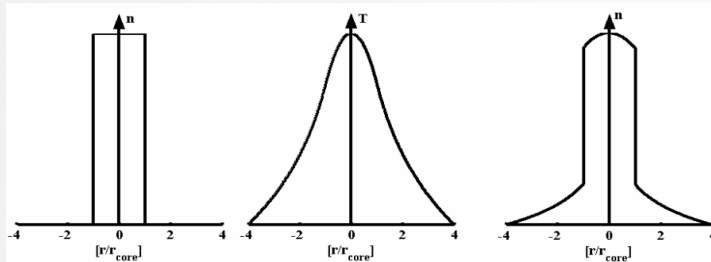
- Il faut réduire le contraste d'indice pour conserver un mode unique,
- Il faut tenir compte de l'augmentation du rayon de courbure critique
- La charge thermique induite par le fonctionnement du laser devient un problème ...

BRILLANCE ET PUISSANCE, LE NÉCESSAIRE COMPROMIS

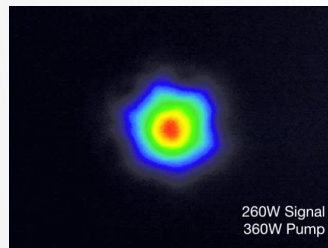


Les modes d'ordres supérieurs vont être confinés du fait de la présence de la charge thermique (modification de l'indice de réfraction par effet thermomécanique)

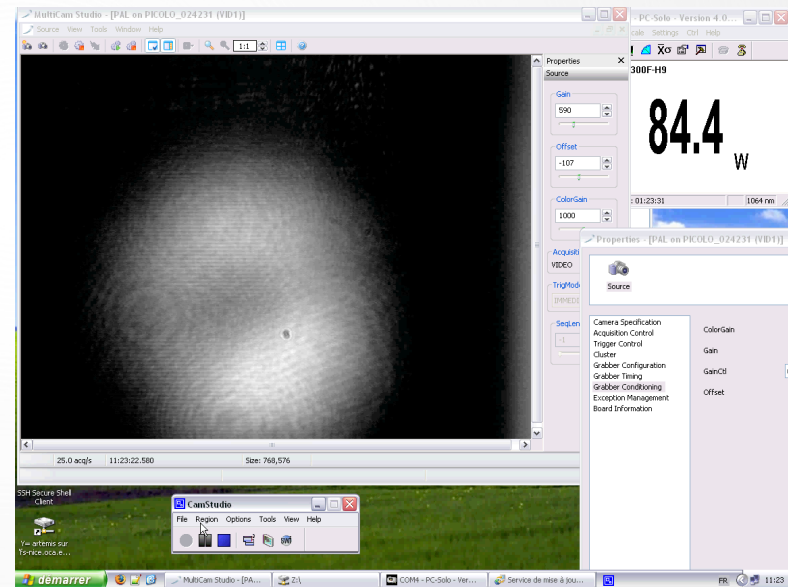
BRILLANCE ET PUISSANCE, LE NÉCESSAIRE COMPROMIS



Hädrich et al. *Opt. Exp* 14(13) (2006)



T. Eidam et al., *Opt. Exp.*, vol.19, no. 14, 2011



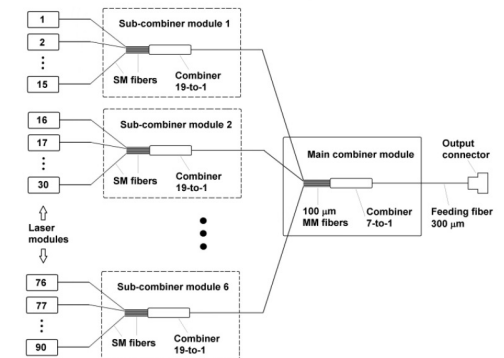
EVOLUTION DES TECHNOLOGIES ET DES PERFORMANCES

Sans maîtrise, la puissance n'est rien ...

Industrial grade 100 kW power CW fiber laser.

E. A. Shcherbakov¹, V. V. Fomin¹, A. A. Abramov¹, A. A. Ferin¹, D. V. Mochalov¹,
V. P. Gapontsev²

¹⁾ IPG Laser GmbH, Siemens str.7, Burbach, 57299 Germany



Credit Trumpf.com

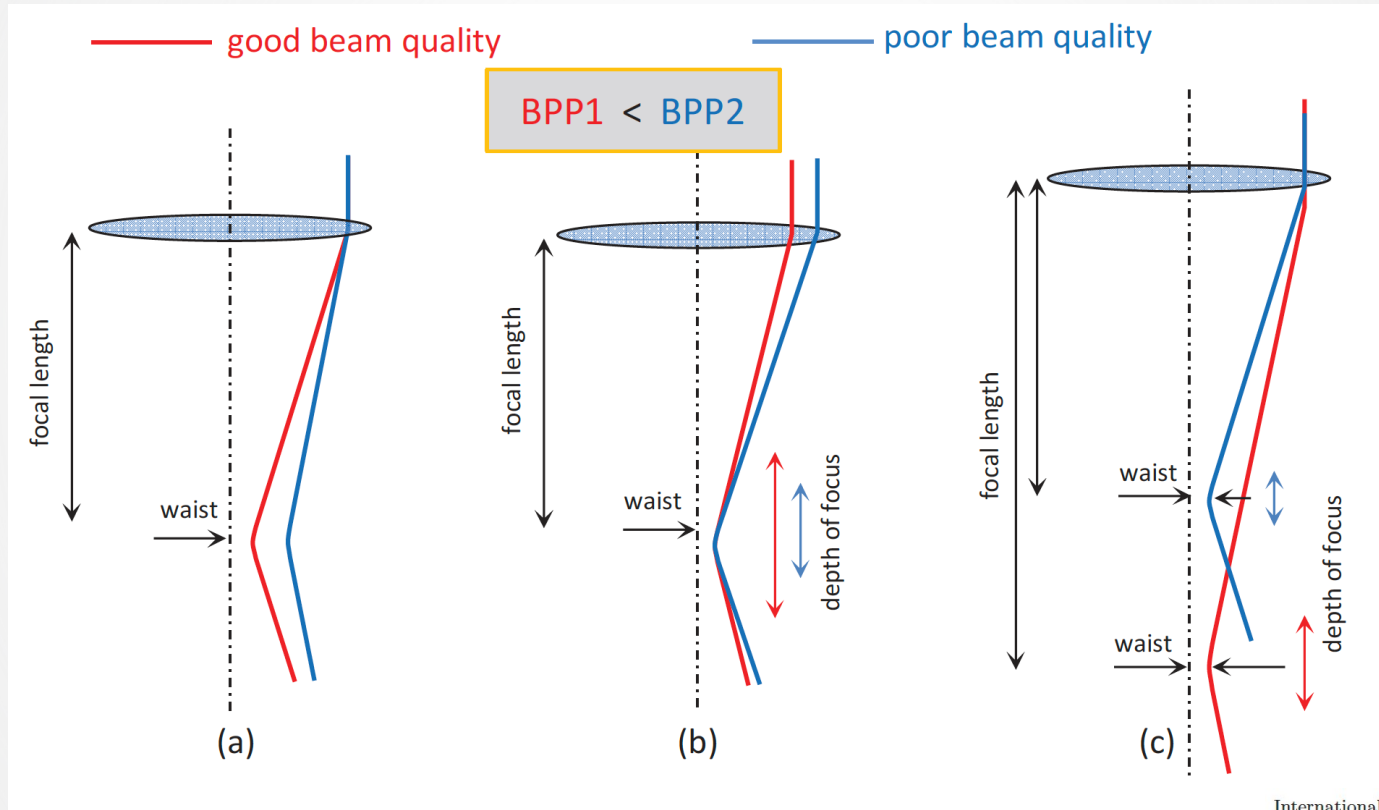


Credit ipgphotonics.com

Pas de source réellement monomode à plus de 5kW aujourd'hui ...

EVOLUTION DES TECHNOLOGIES ET DES PERFORMANCES

Un faisceau en limite de diffraction sinon rien !



International Journal of Modern Physics B
Vol. 28, No. 12 (2014) 1442009 (35 pages)
© World Scientific Publishing Company
DOI: 10.1142/S0217979214420090

EVOLUTION DES TECHNOLOGIES ET DES PERFORMANCES

Un faisceau en limite de diffraction sinon rien !

Source laser en limite de diffraction (monomode) sur fibre 20 μm :

- Possibilité de focaliser sur un disque de **10 cm de diamètre à 5 km** de distance
- Diamètre de la lentille requise : **10 cm**

Source laser multimode sur fibre 300 μm :

- Possibilité de focaliser sur un disque de **150 cm de diamètre à 5 km** de distance
- Diamètre de la lentille requise : **50 cm**

A une telle distance, une source monomode est 225 fois plus efficace !

EVOLUTION DES TECHNOLOGIES ET DES PERFORMANCES

IOP Publishing | Astro Ltd

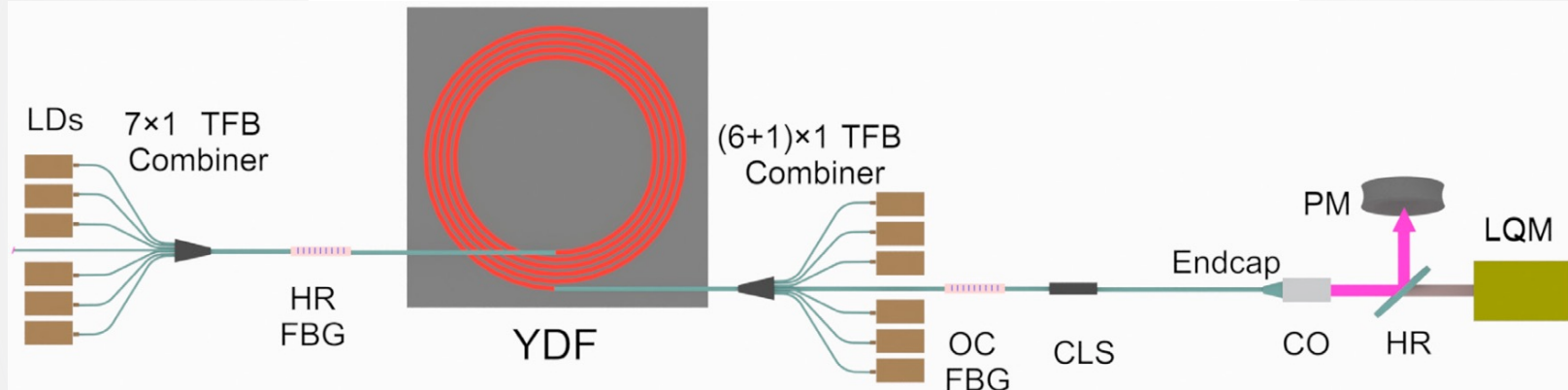
Laser Physics Letters

Laser Phys. Lett. 15 (2018) 075106 (6pp)

<https://doi.org/10.1088/1612-202X/aac19f>

Letter

Monolithic fiber laser oscillator with record high power



Single pumped oscillator (temporal instabilities, TMI)

Power reached 5kW (2018- [8])

Fiber 25/400μm

Pumping at 915nm

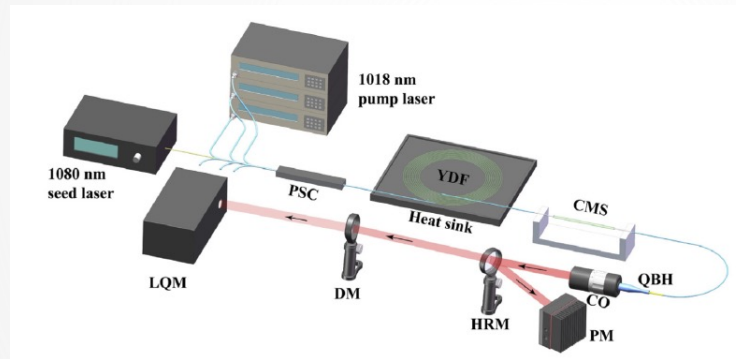
Efficiency 63%

$M^2 \sim 2.2$

EVOLUTION DES TECHNOLOGIES ET DES PERFORMANCES



High-power tandem-pumped fiber amplifier with beam quality maintenance enabled by the confined-doped fiber



Tandem pumping (cost, take place)

Power reached 6.2kW (2021 [11-12])

40/250/400 μ m

Pumped by fiber laser systems at 1018nm

Efficiency 82.2%

$M^2 \sim 2.5$ (due to TMI)

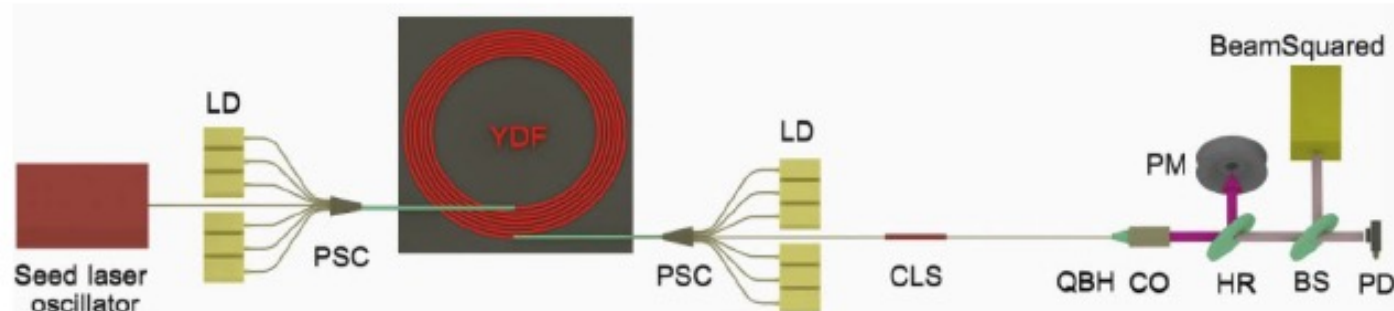
EVOLUTION DES TECHNOLOGIES ET DES PERFORMANCES

Research Article

Vol. 29, No. 17 / 16 August 2021 / *Optics Express* 26366

Optics EXPRESS

6 kW single mode monolithic fiber laser enabled by effective mitigation of the transverse mode instability



Master Oscillator Power Amplifier (MOPA)

Power reached 6kW ([13] in 2021 and up to 10kW [14])

20/400μm in the oscillator/seed stage

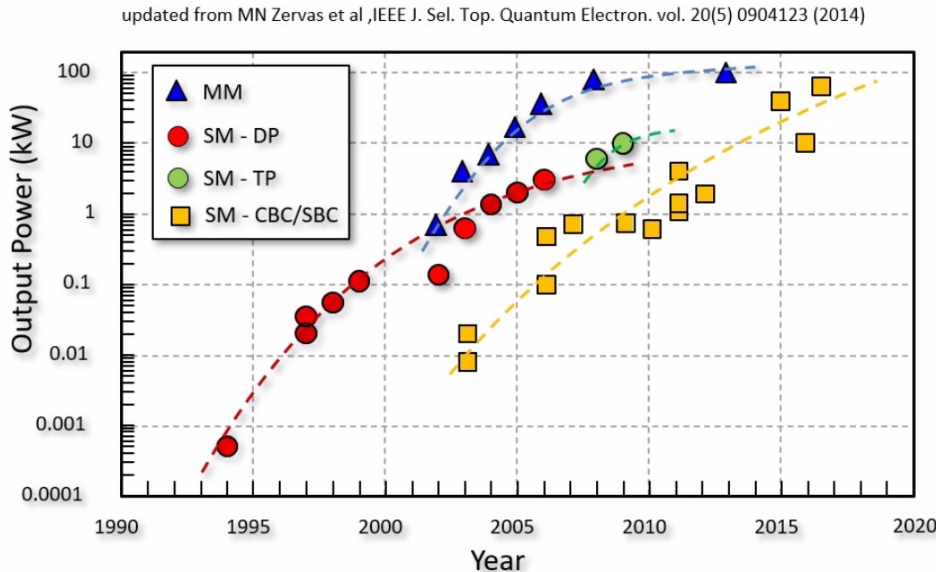
25/400μm in the amplifier stage

Pumped at 981nm with laser diodes

Efficiency of 82,3%

$M^2 \sim 1.3$

EVOLUTION DES TECHNOLOGIES ET DES PERFORMANCES



up to 10kW single-fibre, single-mode output power

- based mostly on MOPA configurations
- direct diode pumping (DP) up to 3-4kW
- tandem pumping (TP) for powers >4kW

up to 100kW multi-mode output power has been achieved

- based on incoherent combination of ~1kW SM FLs

up to 60kW diffraction-limited output

- based on coherent / spectral combination of several kW SM FLs

MM=Multimode fiber systems
SM=Singlemode fiber systems

CBC=Coherent Beam Combining
SBS=Spectral Beam Combining



Les sources monomodes multi-kW fibrées en France

Travaux initiés dans le cadre du laboratoire commun Xlas en 2019



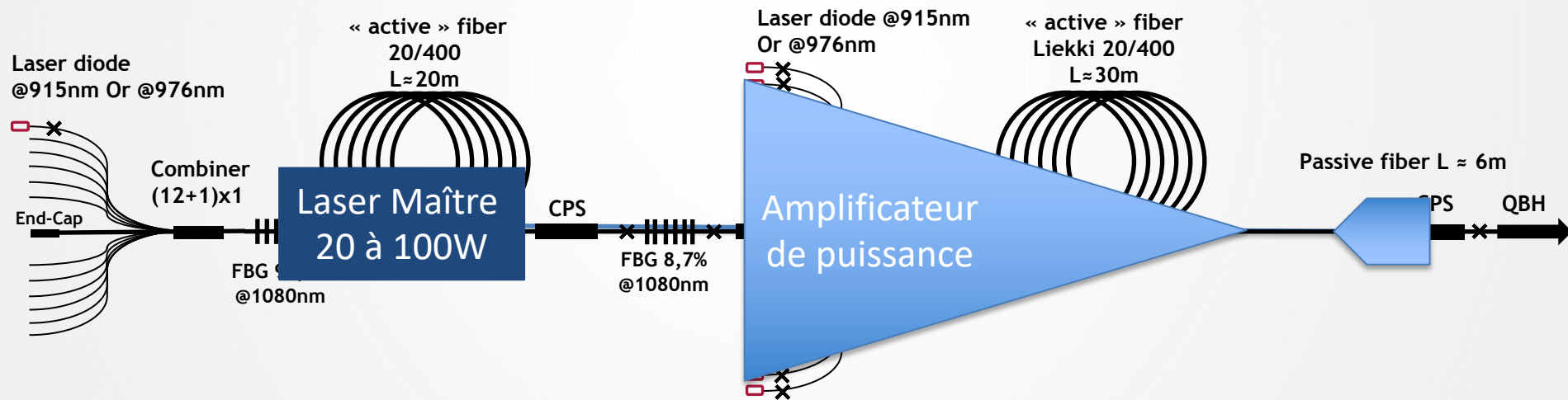
Université
de Limoges



LES SOURCES MONOMODES MULTI-KW FIBRÉES EN FRANCE

Structure Master Oscillator Power Amplifier (MOPA) pour :

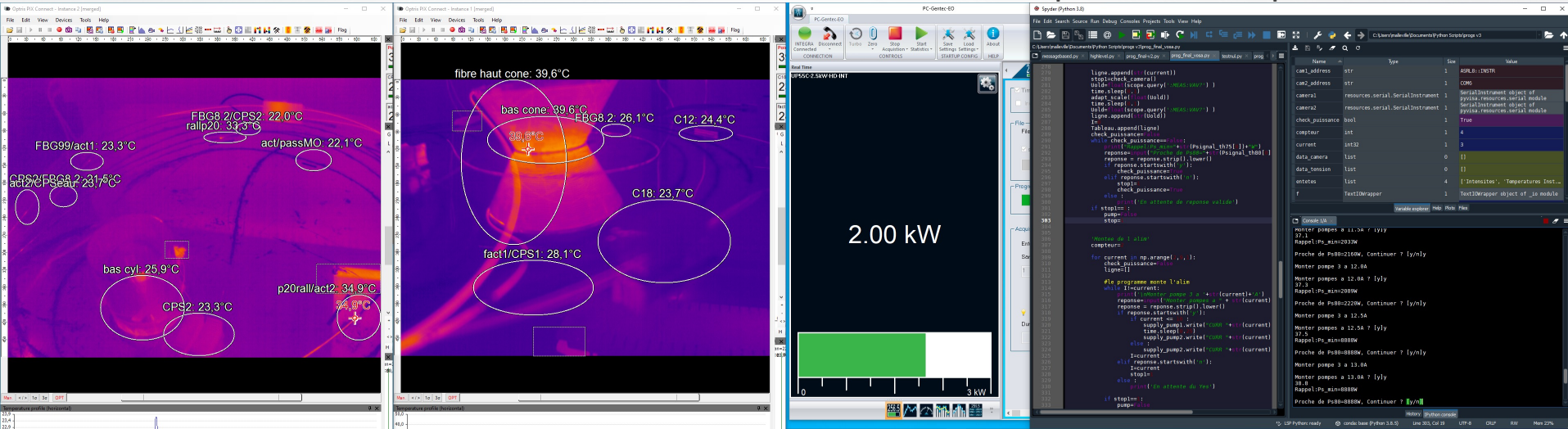
- Fiabiliser la source,
- Verrouiller l'amplificateur (mode, longueur d'onde, puissance ...)



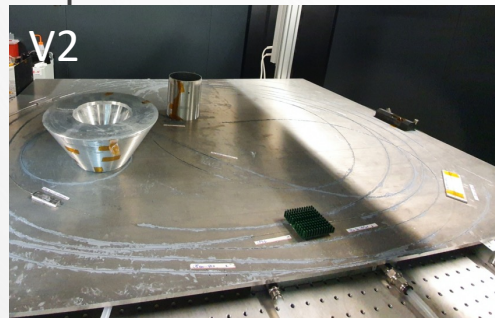
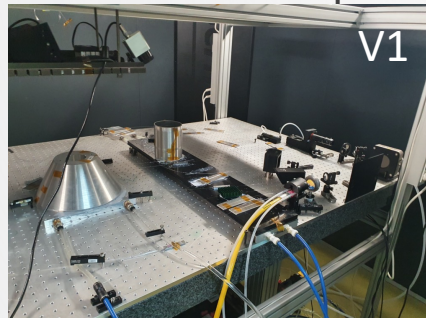
LES SOURCES MONOMODES MULTI-KW FIBRÉES EN FRANCE

Surveillance par caméras thermiques

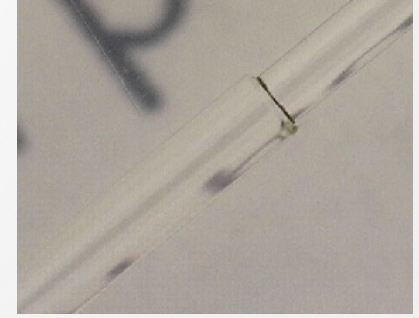
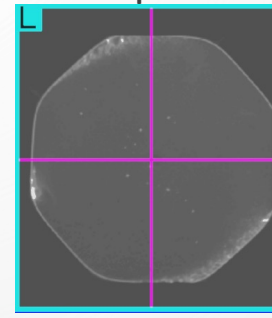
Contrôle à distance, collecte de données et arrêt automatique en cas de problème détecté



Plaques tempérées

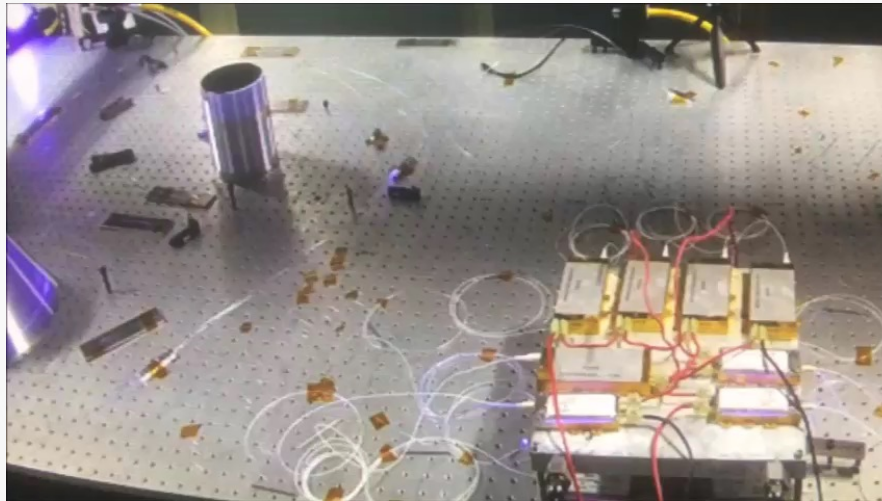


Composants commerciaux



LES SOURCES MONOMODES MULTI-KW FIBRÉES EN FRANCE

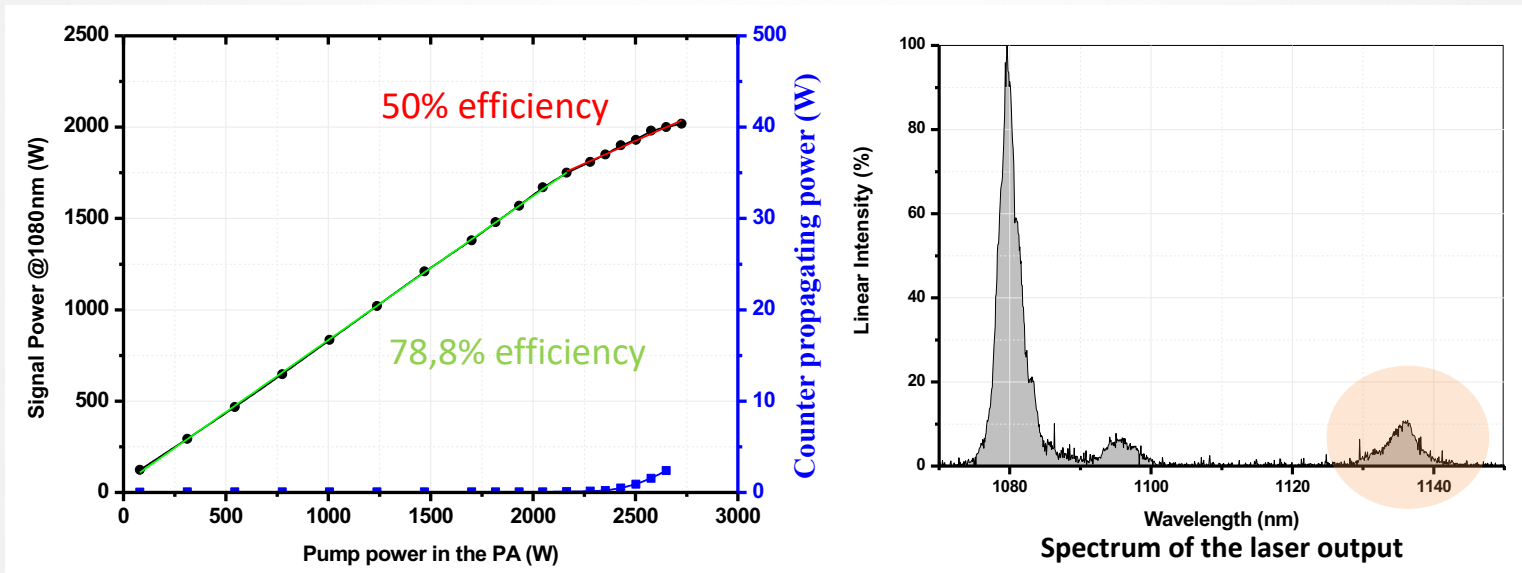
Tout cela est important parce que chaque détail négligé peut provoquer cela :



LES SOURCES MONOMODES MULTI-KW FIBRÉES EN FRANCE

Premiers résultats en 2021

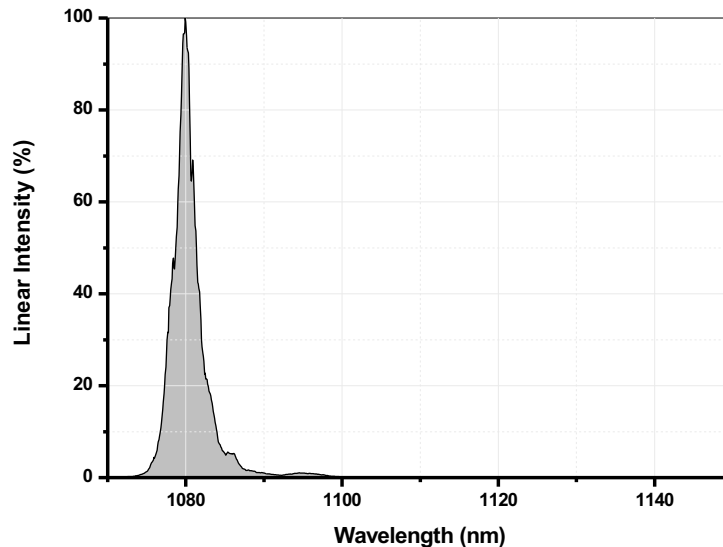
- Efficacité de 78,8% mais fléchissement à haute puissance
- Faisceau parfaitement monomode
- 2,02kW en régime continu démontré



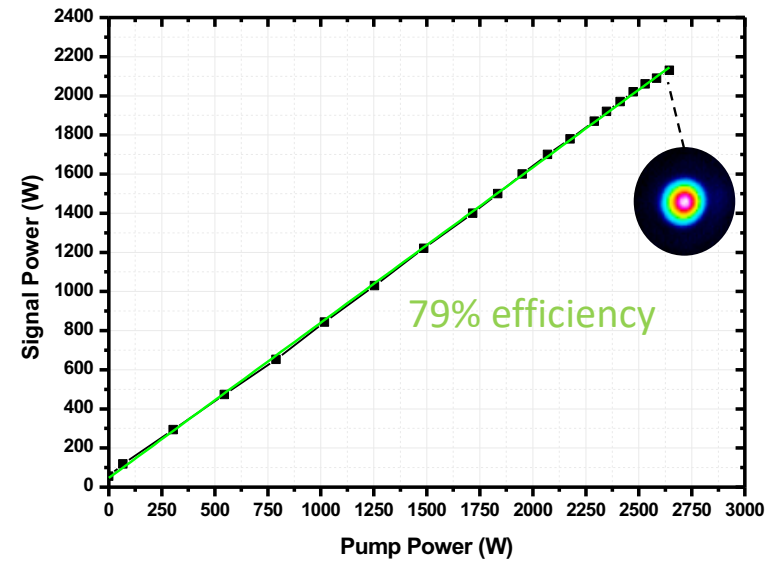
- Observation de la raie Raman autour de 1135nm
- Les simulations montrent l'importance de réduire les longueurs de fibres actives et passives

LES SOURCES MONOMODES MULTI-KW FIBRÉES EN FRANCE

Les performances aujourd'hui



Spectrum of the laser output



Optical to Optical efficiency curve



Pente d'efficacité laser parfaitement linéaire



Plus de 30dB de différence entre puissance signal et puissance Raman



Les sources monomodes multi-kW fibrées en France

Perspectives court et moyen termes : le rôle de la simulation ...



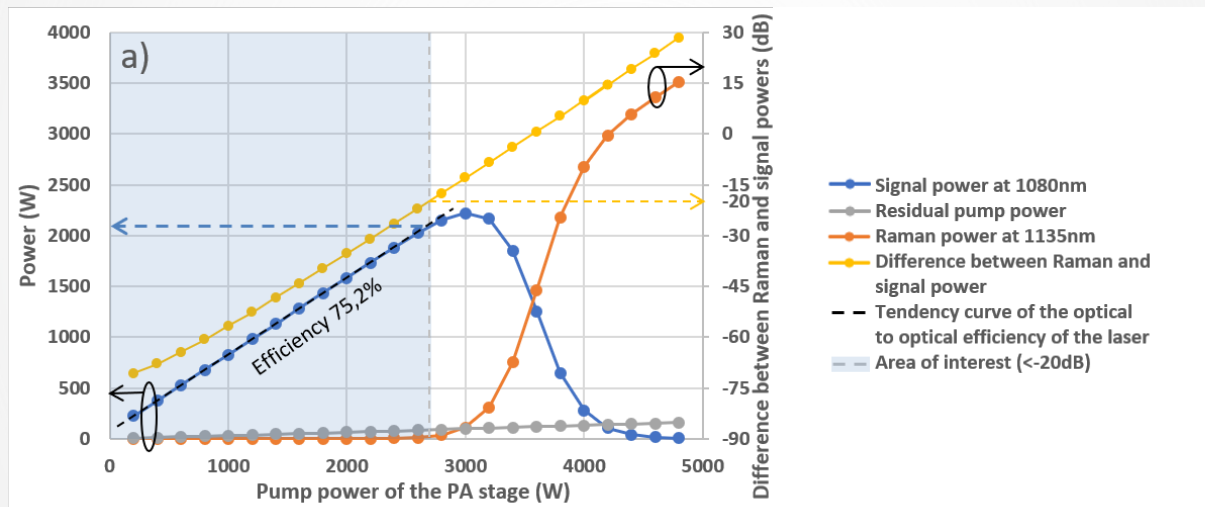
Université
de Limoges



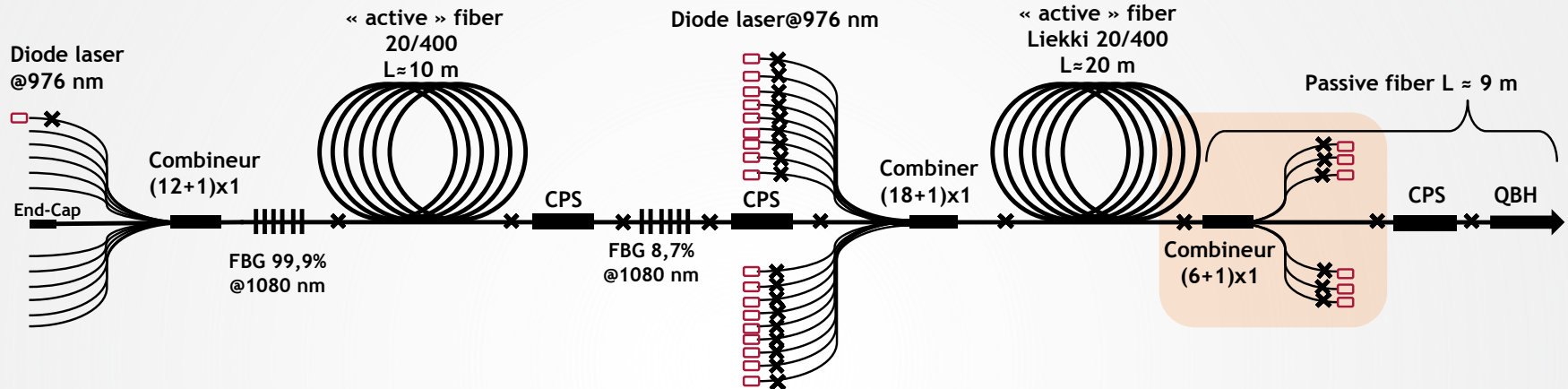
LES SOURCES MONOMODES MULTI-KW FIBRÉES EN FRANCE

Objectif 2022 : 3kW

Avec un pompage 915nm et 30m de fibre active Yb1200



Impossible d'atteindre 3kW en augmentant simplement la puissance de pompage



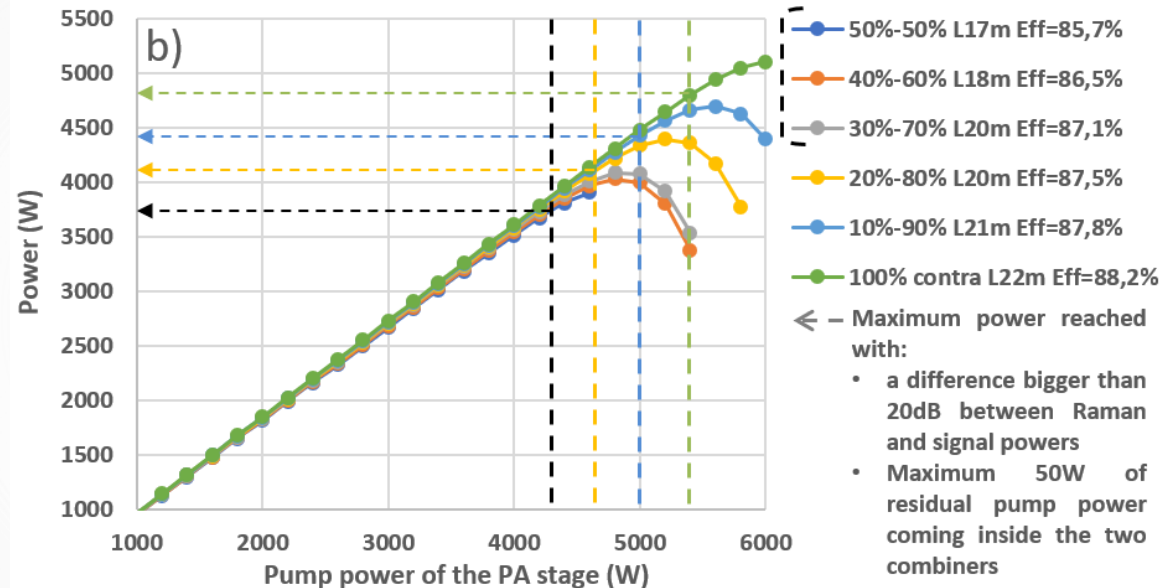
Optimisation plutôt que révolution :

- Changement de longueur d'onde de pompage pour augmenter l'absorption,
- Changement de fibre active pour un meilleur compromis longueur/thermique,
- Combineur « contra » pour augmenter la puissance de pompage globale,
- Combineur « contra » pour minimiser la puissance Raman,
- Etc.

LES SOURCES MONOMODES MULTI-KW FIBRÉES EN FRANCE

Pompage à 976nm et fibre active moins dopée

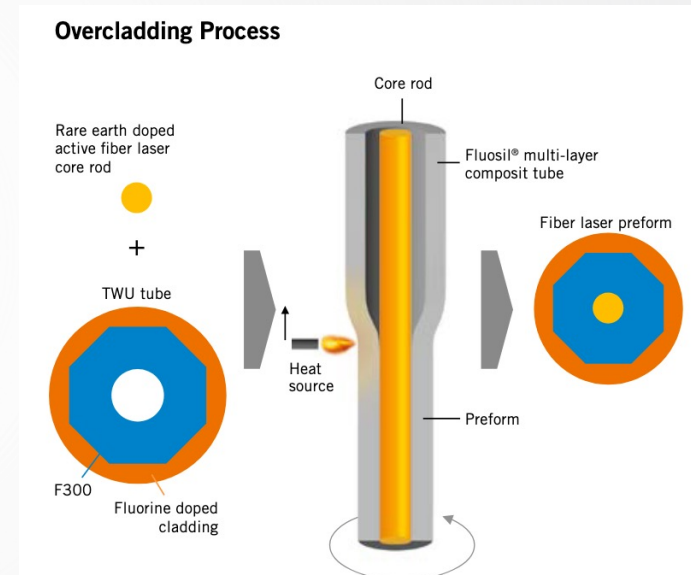
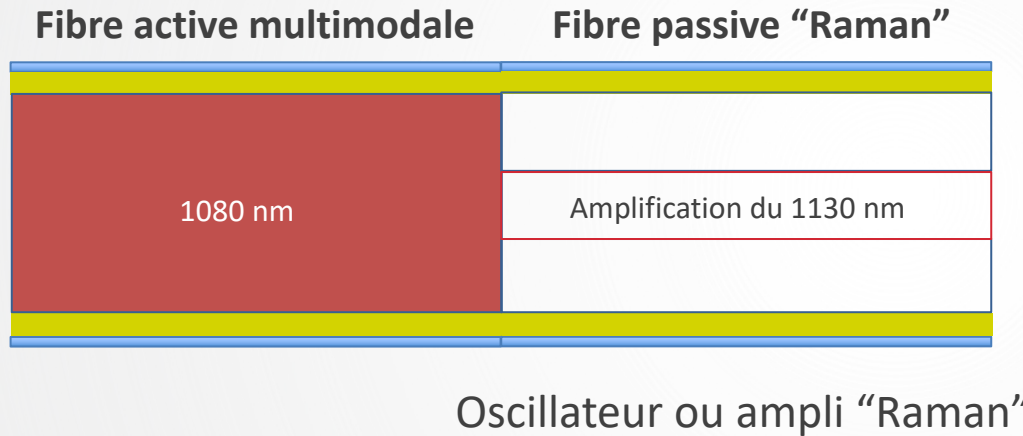
Un potentiel de 3 à 5 kW est démontré avec un choix judicieux d'architecture.



LES SOURCES MONOMODES MULTI-KW FIBRÉES EN FRANCE

Vers des sources monomodes de plusieurs dizaines de kW ...

La conversion de brillance se fera en exploitant les effets non linéaires



Un « tandem pumping » revisité par la coopération entre terres-rares et Raman



Merci pour votre attention



Photo du laser en fonctionnement



Sans filtre IR



Université
de Limoges

