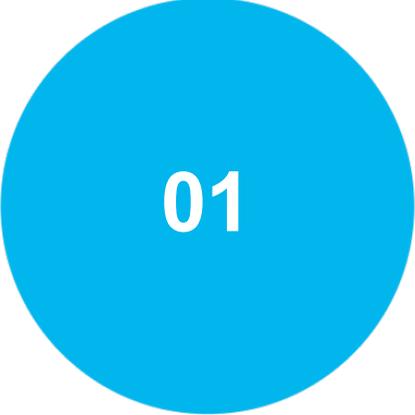


Fibres optiques dopées pour amplificateurs et lasers: problématiques et enjeux

- 1. iXblue**
- 2. Laser à fibre**
- 3. Fabrication des fibres optiques**
- 4. Techniques de fabrication des cœur dopés**
- 5. Problématiques des cœurs dopés**
- 6. Cas pratiques**
- 7. Le défi de la haute puissance**
- 8. Conclusion**



01

iXblue

Une société de technologie
à l'international

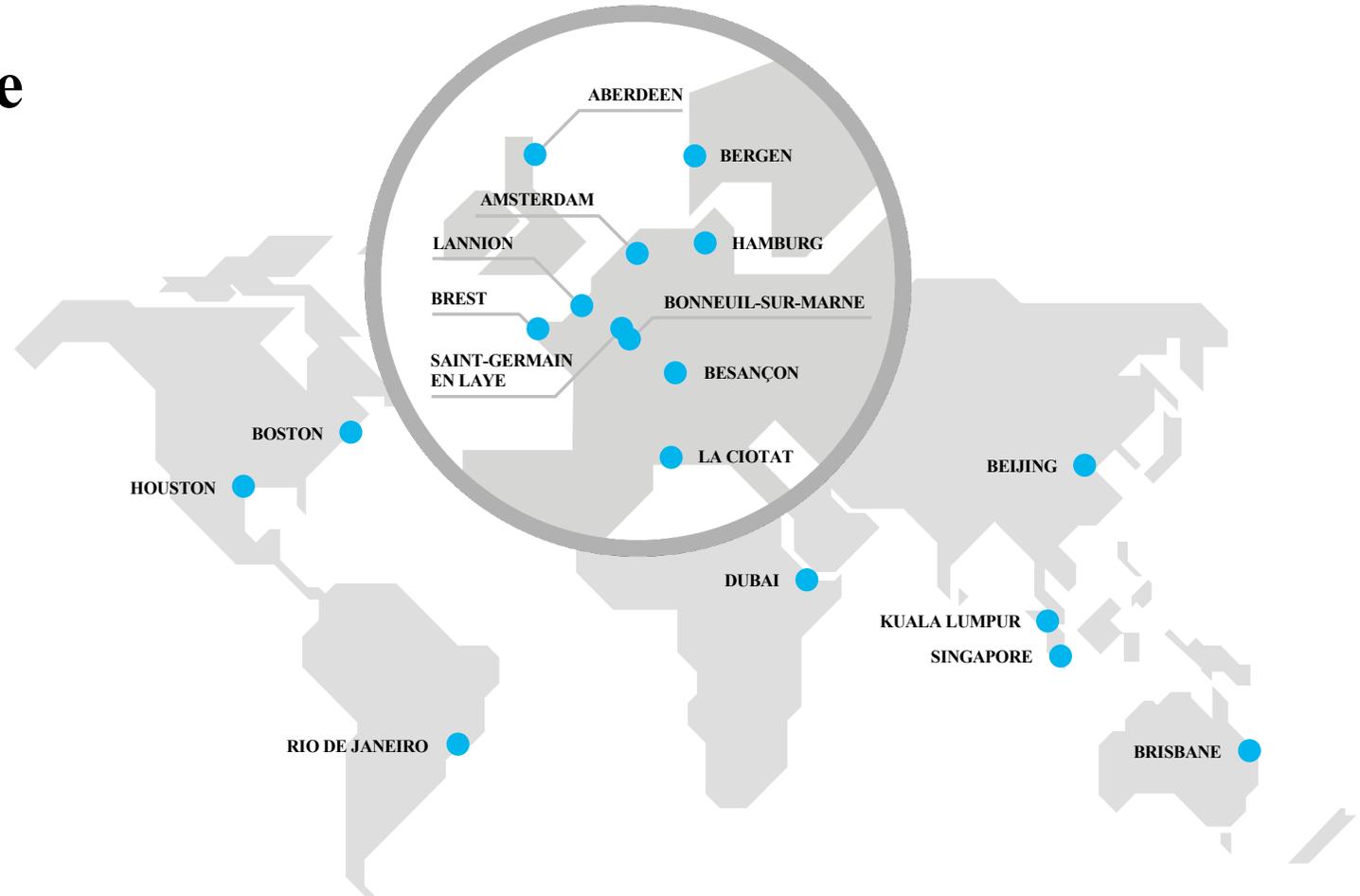
iXblue at a glance



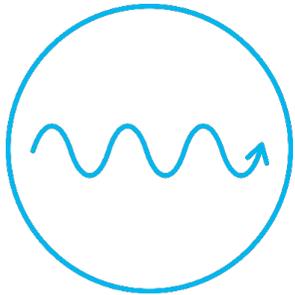
600+
employees



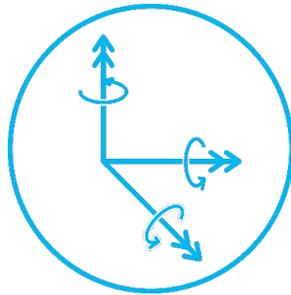
100+ M€
turnover



iXblue leadership and pioneering expertise



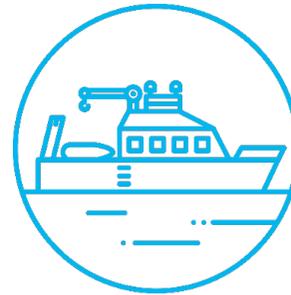
Photonics



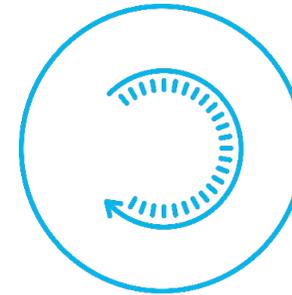
Navigation



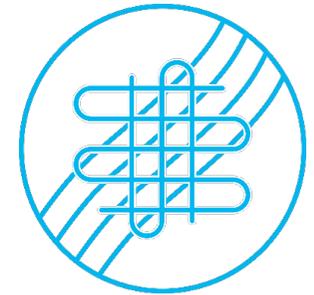
Underwater
acoustics



Ship
building



Mechatronics



Survey
operations

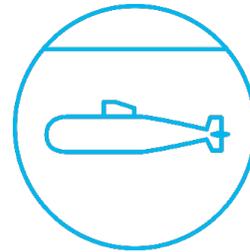
iXblue, a renowned brand throughout the industry



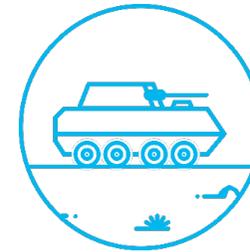
Energy & marine construction



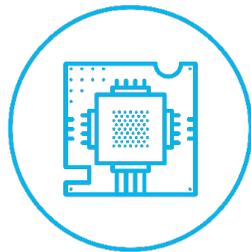
Geoscience survey



Naval defence



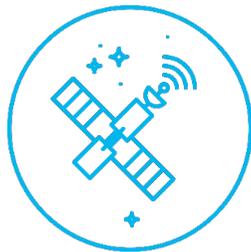
Land defence



Cutting edge industry



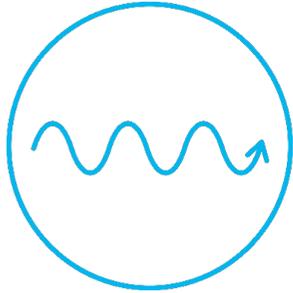
Research & labs



Space



Commercial shipping



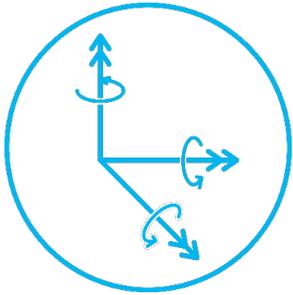
Photoniques

- **Fibre optique spéciale**
- **Réseaux de Bragg**
- **Circuit optique intégré**
- **Modulateur**



Spatial

**Fibre optique et modulateurs
résistants aux radiations**



Inertial navigation

- **Gyrocompass**
- **Inertial navigation system**



Airbus

**Tailored made Inertial
Measurement Unit for satellites**



High demanding navigation

**1nm/72h drift
in inertial mode**



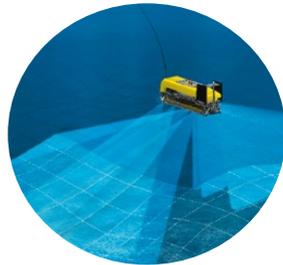
Nexter

**Tailored made Inertial
Navigation System for gun
positioning**



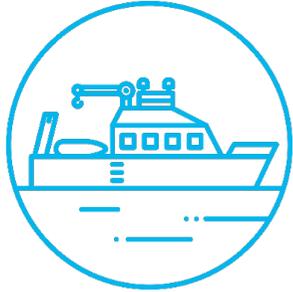
Underwater acoustics

- **Moorings**
- **Acoustic positioning systems**
- **Mapping sonars**



Seabed / drones

**Underwater
tracking system of Ocean**



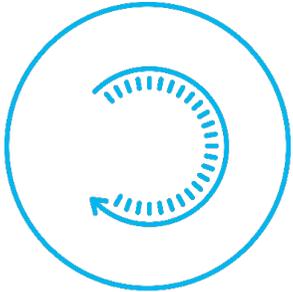
Ship building

- **Work boats**
- **Survey ships**



Ship building

**42m ship manufactured
in composite material**



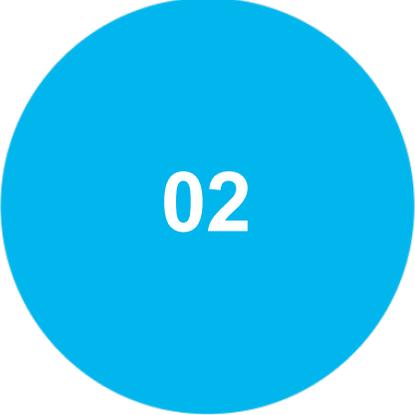
Mechatronics

- **Motion simulators**
- **Positioners**



Motion simulator

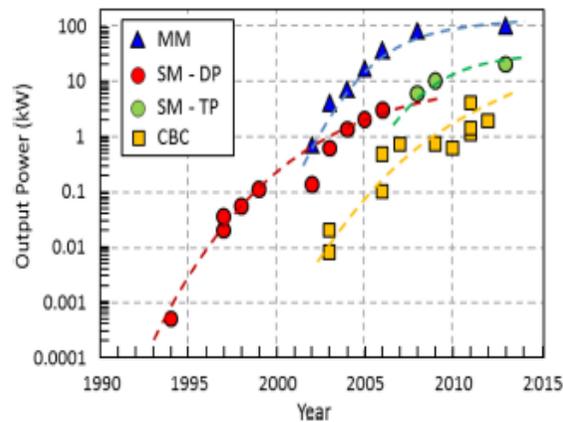
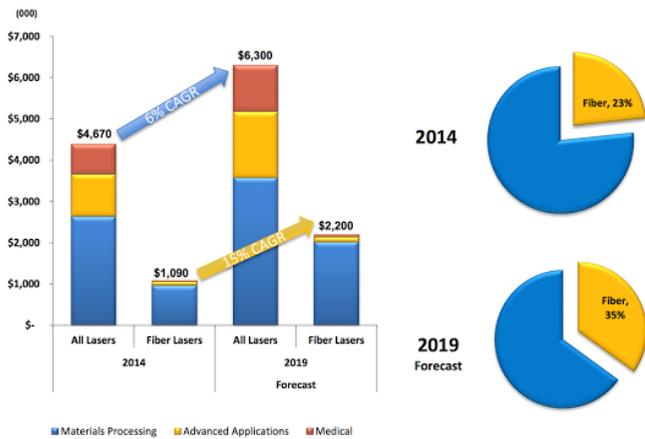
**5 axes target designation
simulator for BOEING**



02

Laser à fibre

- Omniprésence des lasers: Industrie, recherche, militaire
- Le laser à fibre remplace massivement les anciennes technologies
 - Conversion électro-optique efficace
 - Faisceau gaussien
 - Compacts, légers & sûrs
 - Versatiles en longueur d'onde
 - De plus en plus abordable
- La tendance est à la très forte puissance.



C'est une technologie de rupture, qui est maintenant acceptée !

Matériaux



Médical



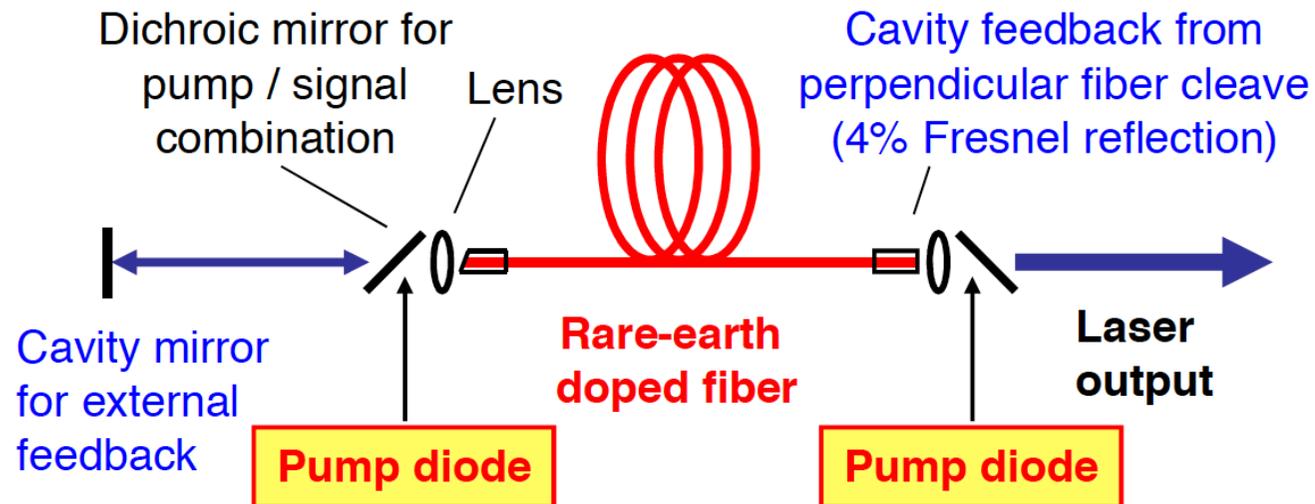
Militaire



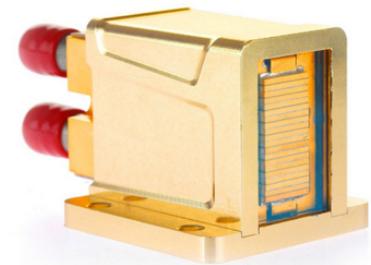
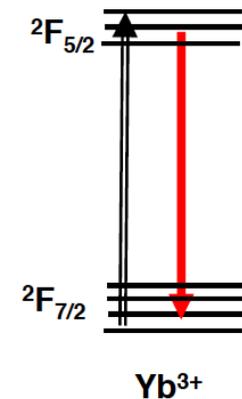
Google

Principe du laser à fibre

- La fibre optique est dopée avec une terre rare
- La terre rare est pompée optiquement sur un état excité au moyen d'une diode laser
- La cavité est fermée par des miroirs

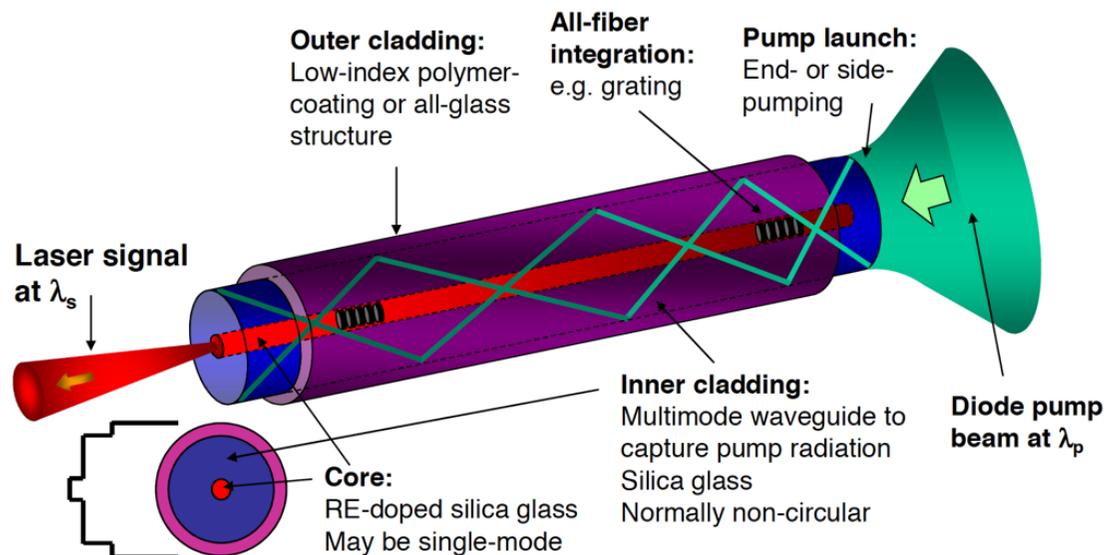


- En pratique ce n'est pas une configuration robuste...



Principe du laser à fibre

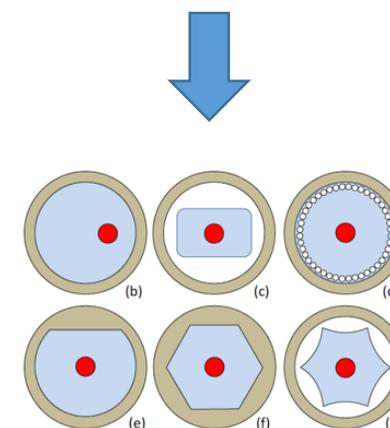
- C'est un convertisseur de Brillance



- Les terres rares convertissent un faisceau de pompe multimode forte puissance en un faisceau signal très brillant.
 - X 6 ordres de grandeur !
 - Surface Jusqu'à 1000 fois plus petite
 - Ouverture numérique 30 fois plus petite

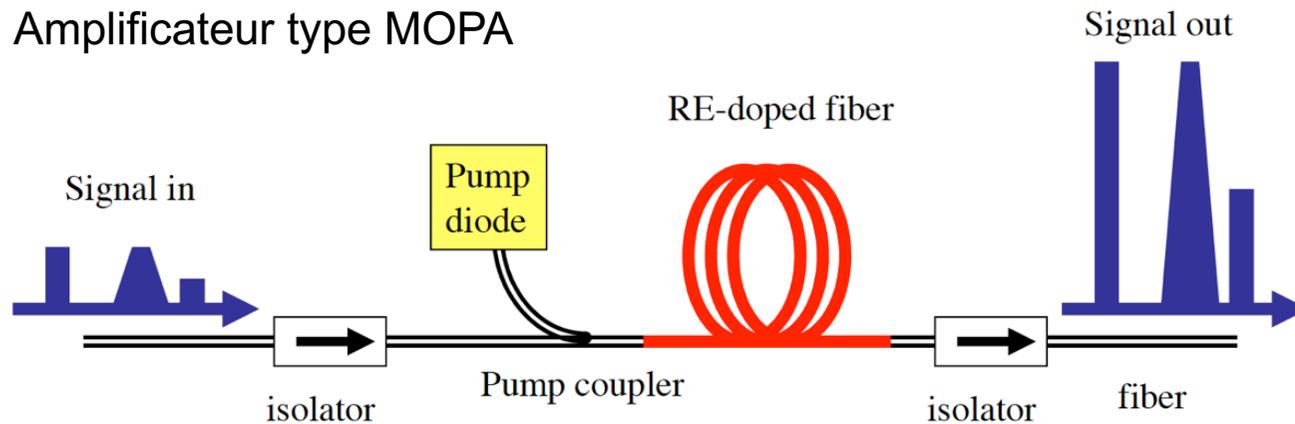


LA géométrie de la fibre est étudiée pour maximiser le recouvrement pompe-coeur dopé

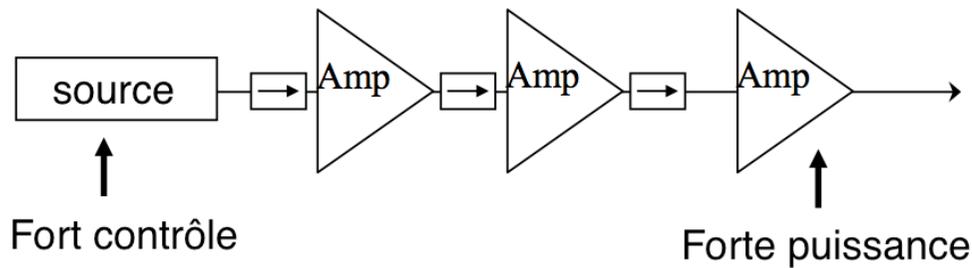


Systemes 'tout fibre'

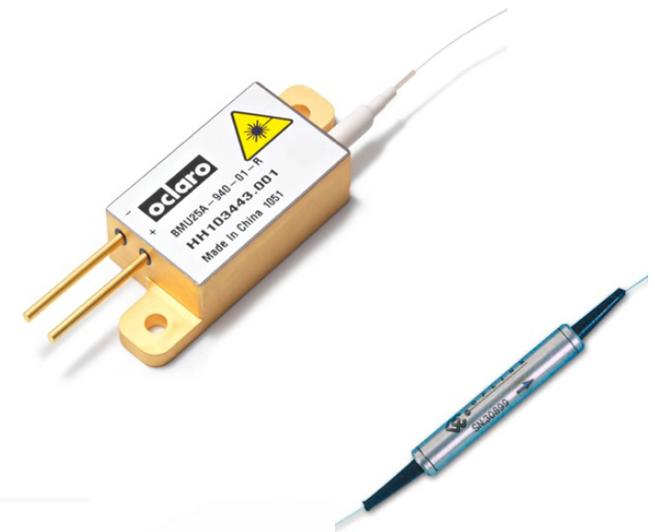
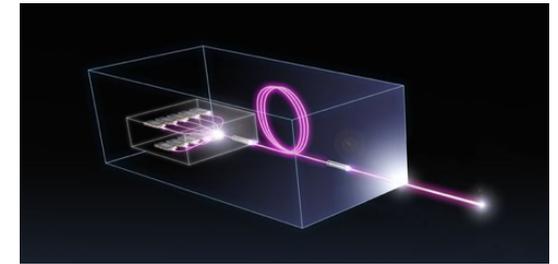
- Amplificateur type MOPA



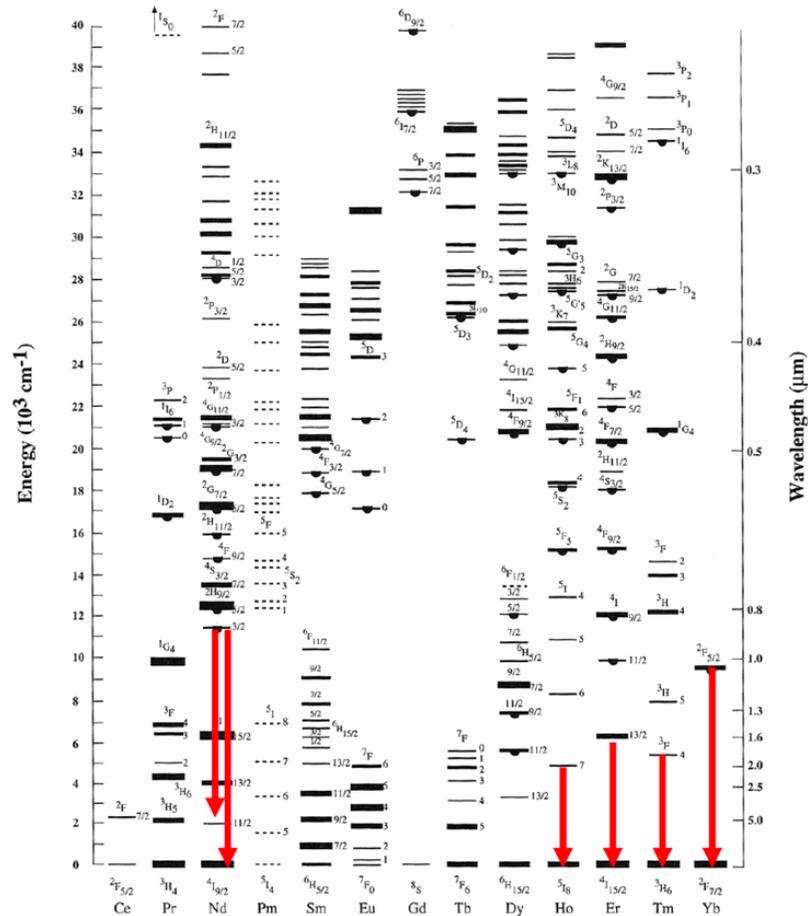
- Systeme tres robuste... et modulable



- C'est le moteur de l'industrie du laser a fibre



Quelles terres rares ?

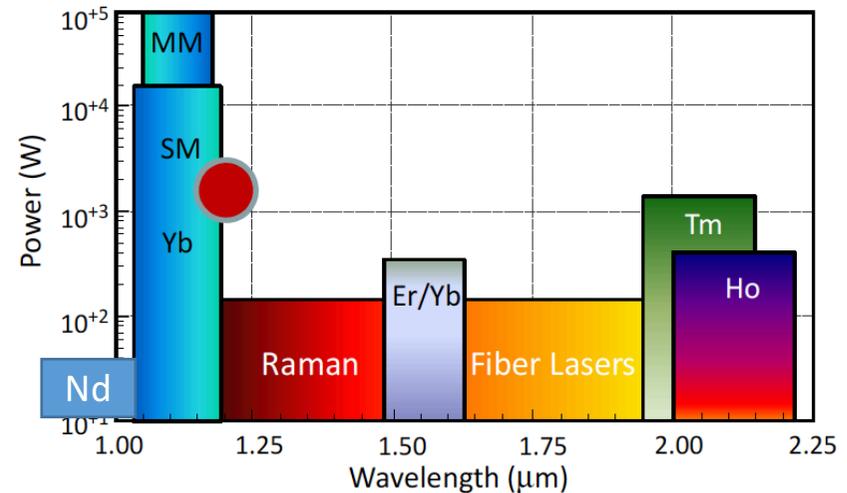


- Nombreux niveaux d'énergie et transitions pour les ions TR
- Dans la **silice**, seulement 5 états métastables compatibles avec les diodes fortes puissances:
 - Nd, Er, Tm, Yb, Ho
- 6 transitions exploitées à ce jour dans des lasers à fibre

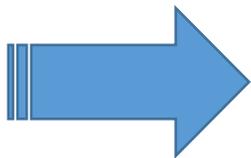
Il n'y a pas un laser à fibre...

- Mais des lasers à fibre:

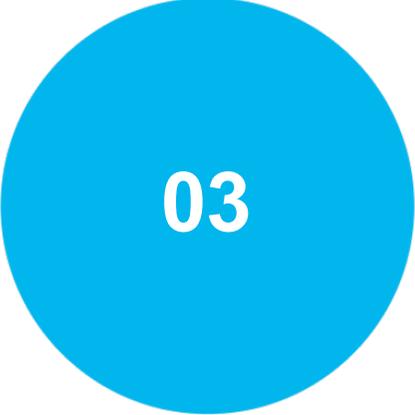
- Laser continu
- Laser pulsé
 - Mode-locked, Q-switch...
 - ns, ps, fs
- Mono-fréquence
- De 890 à 2200 nm



- Chaque configuration de laser a ses propres exigences en terme de gain/m, de qualité modale, de taille de mode, d'ouverture numérique, de ratio cœur/gaine, etc...



Une très grande variété de fibres à développer pour chaque application



03

Fabrication d'une fibre optique

La fibre en 30 secondes



manufacturing facilities



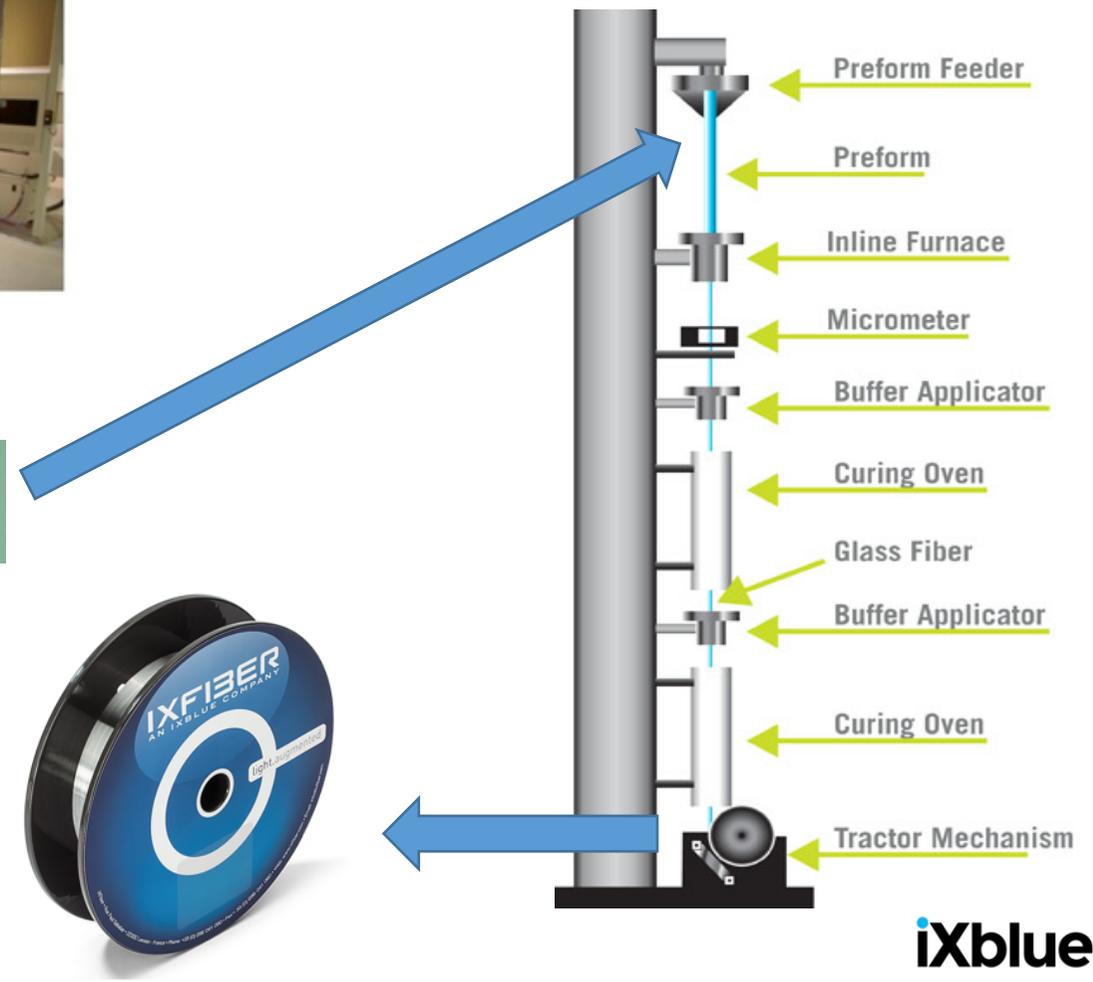
MCVD lathe (preform)

Préforme



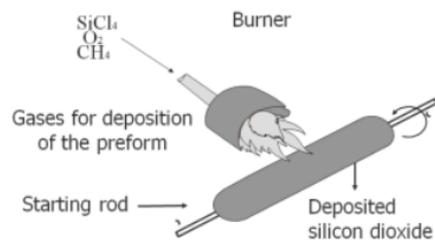
characterization lab

Fibrage



De nombreuses technologies disponibles

OVD (telecom)



Process of Flame Hydrolysis



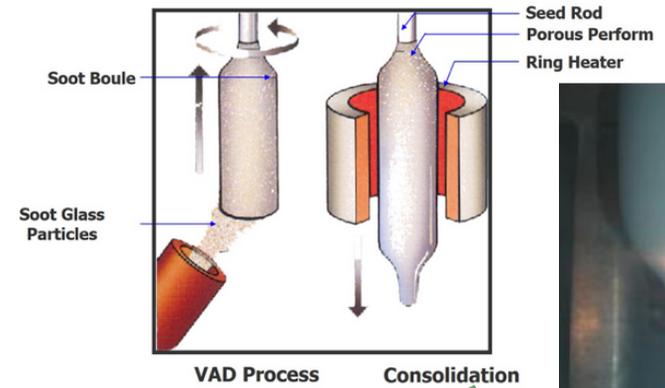
Porous preform rod

Electric furnace



Solid glass rod, preform

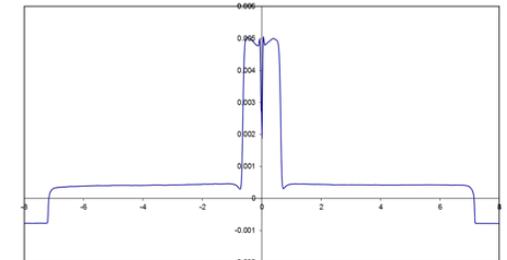
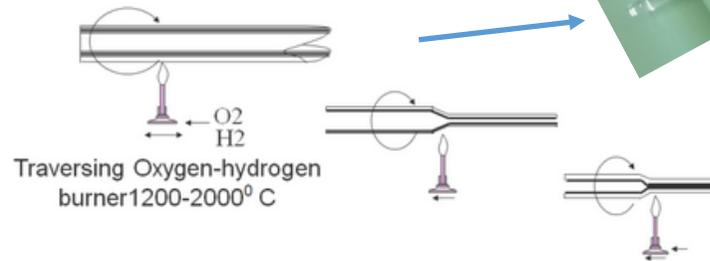
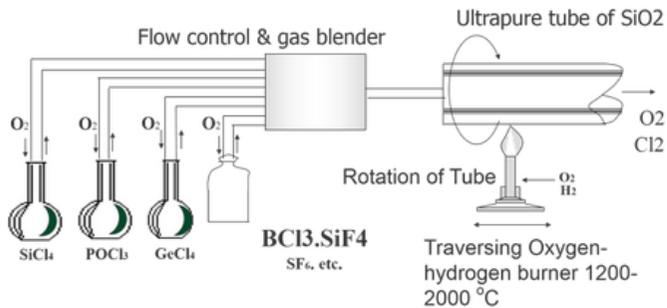
VAD (telecom)



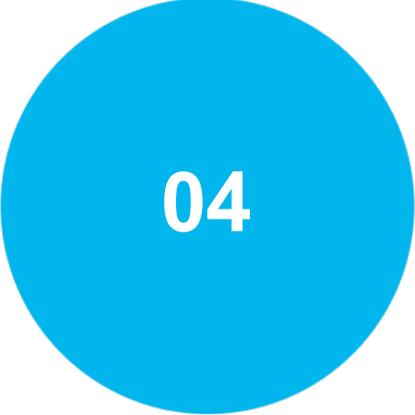
VAD Process

Consolidation

MCVD (fibres spéciales)



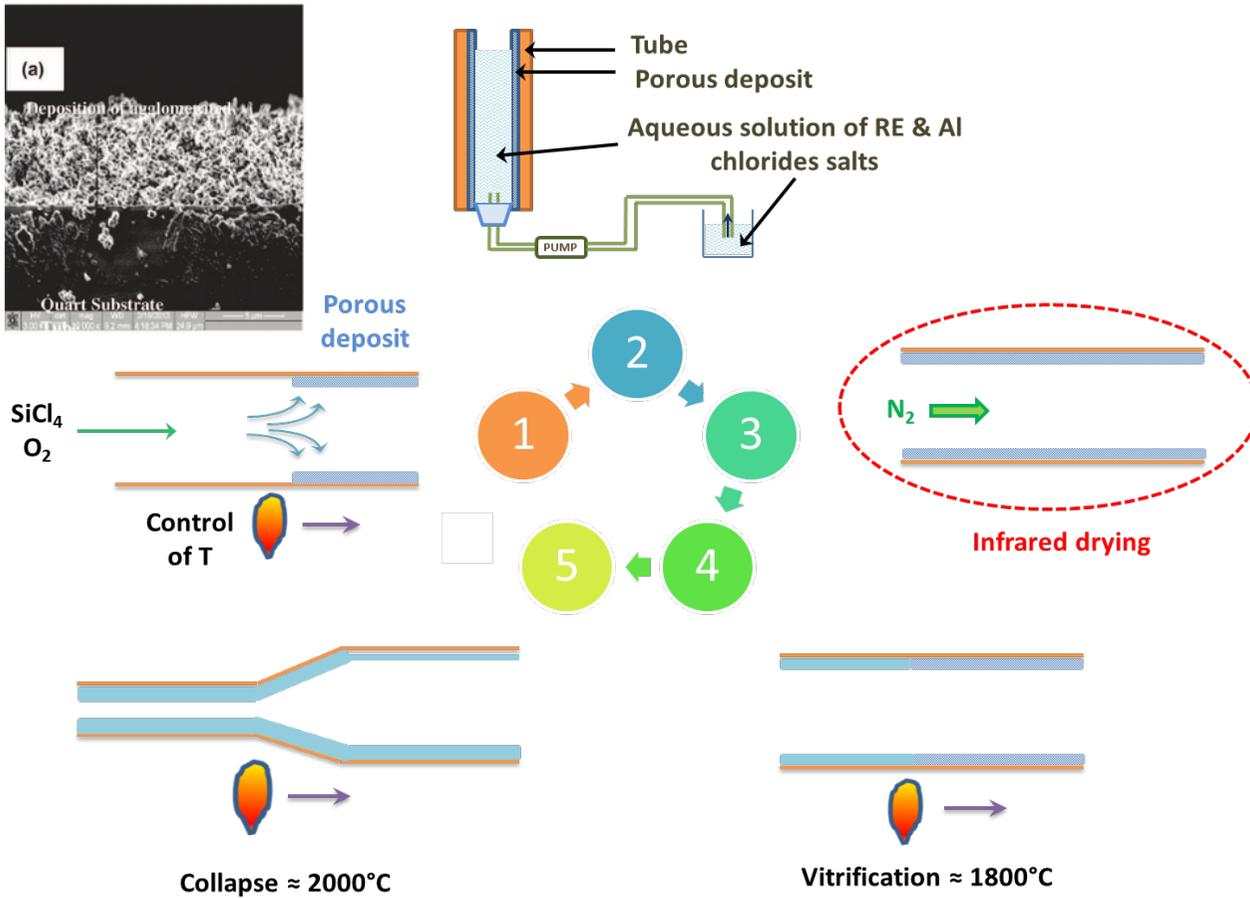
Profil d'indice de réfraction



04

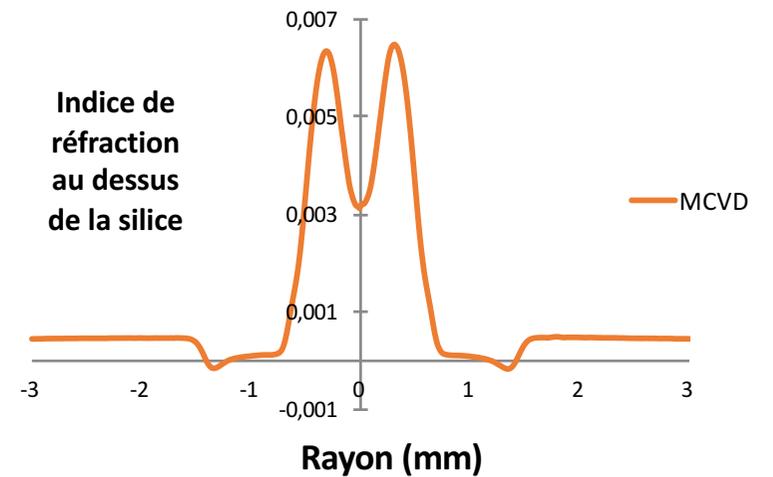
Fabrication des cœurs dopés

iXblue: dopage en solution (MCVD)



- Mise en œuvre simple
- Compositions variées
- Faible volume de cœur dopé
- Peu homogène radialement

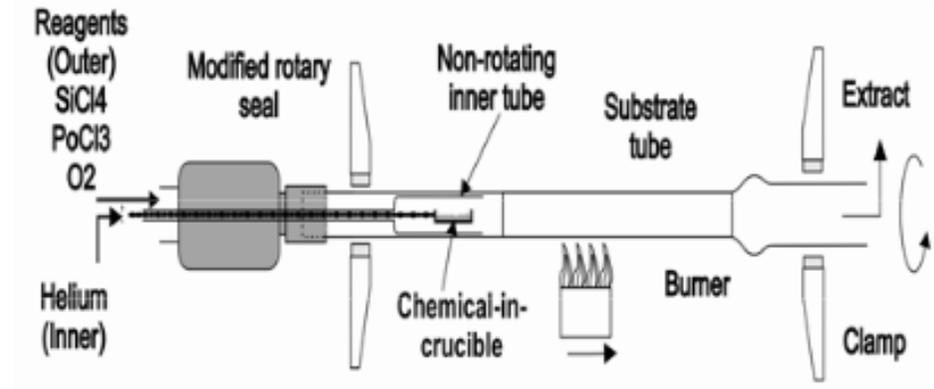
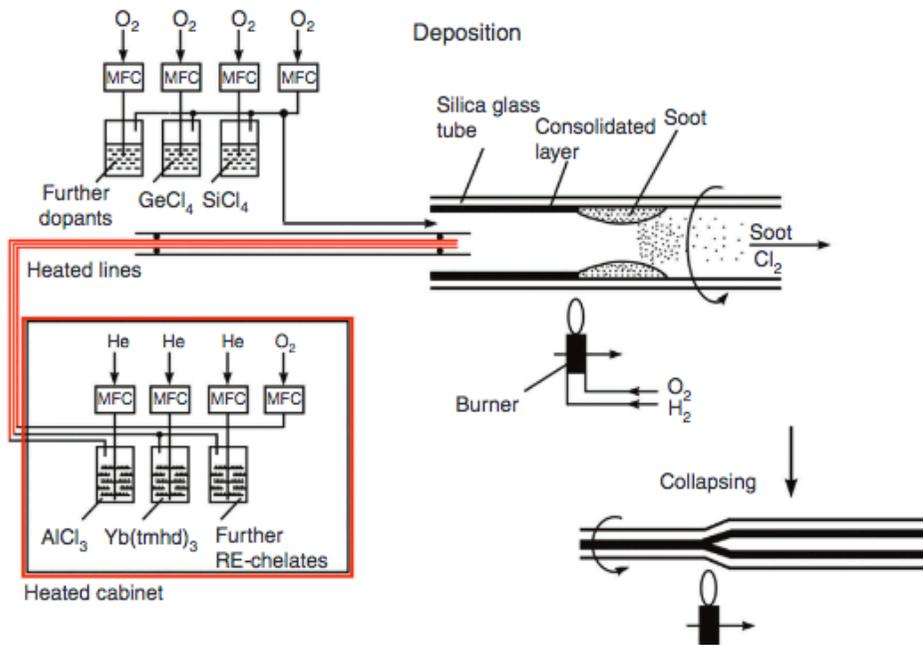
Profil d'indice de préformes AlYb



MCVD + chelate

ou

CIC (chemical in Crucible)

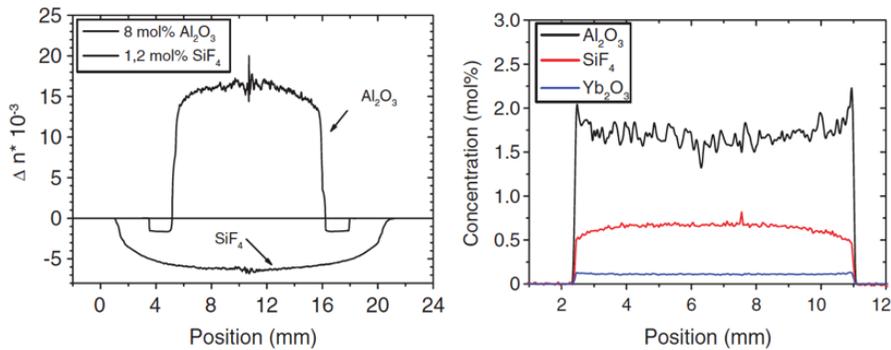


- Fort volume dopé
- Bonne homogénéité radiale

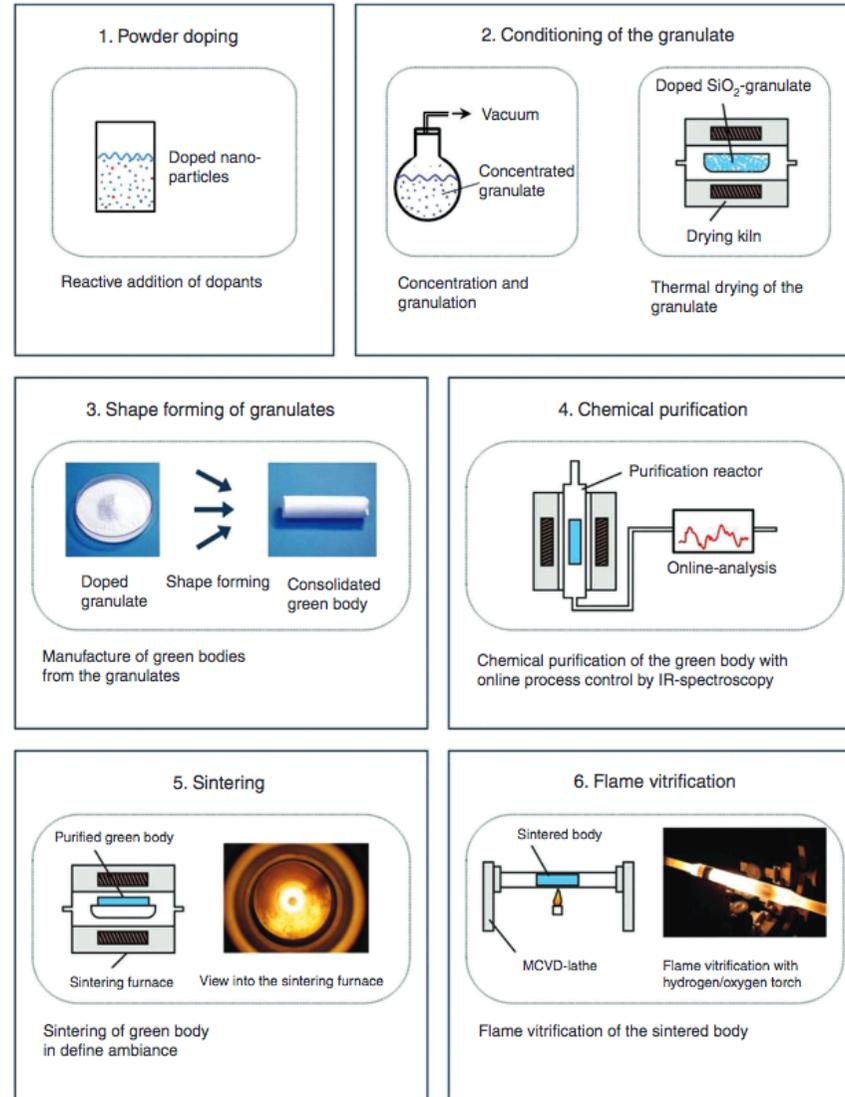
- Contaminations croisées
- Homogénéité longitudinale

REPUSIL: poudres

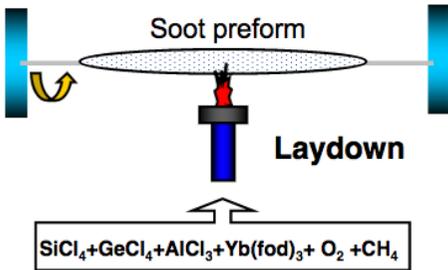
- Fort volume dopé
- Grande homogénéité radiale



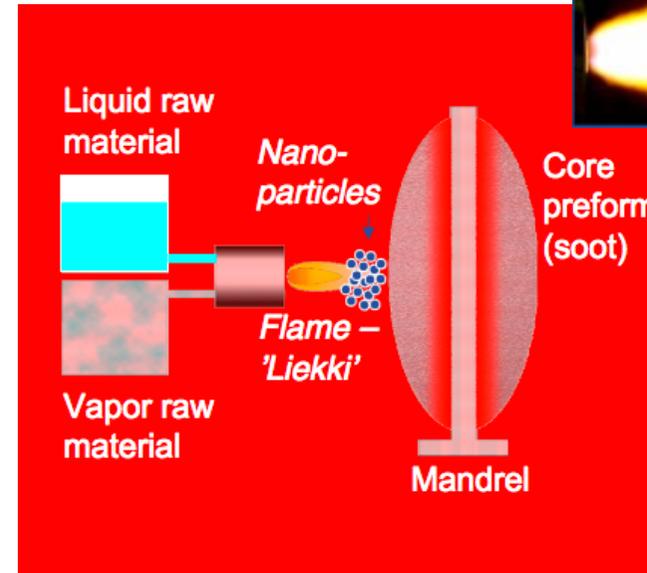
- Technique propriétaire
- Compositions accessibles limitées



OVD

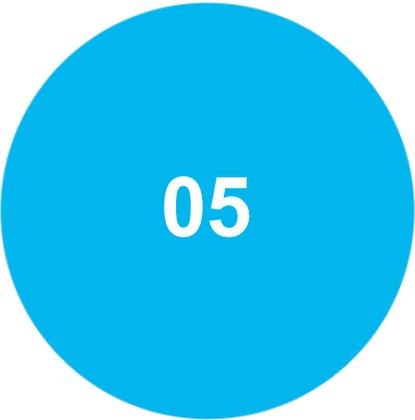


DND (Aerosol)



Sans oublier le Sol Gel... et quelques autres

La grande majorité des fibres dopées reste produite aujourd'hui en MCVD+ dopage en solution



05

Problématiques associées

Choix de la matrice

Guide d'onde

Efficacité de conversion

Photochromisme

Echauffement

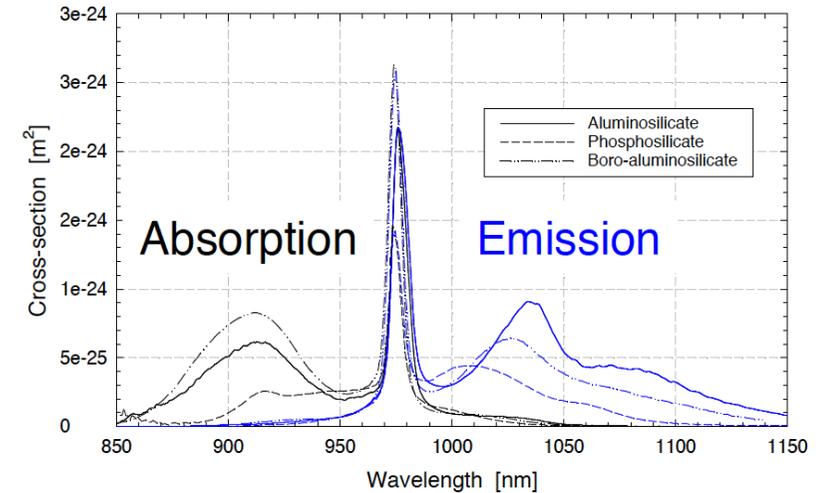
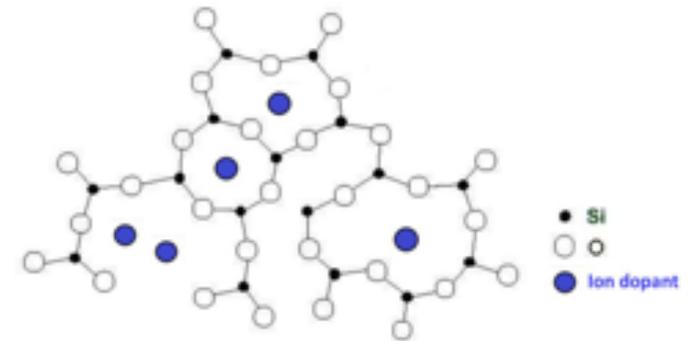
Dégradation

Effets non linéaires

Choix de la matrice

La silice est fantastique !

- **Faible solubilité des Terres rares dans la silice**
 - Agrégats
- **l'environnement chimique de la TR modifie ses propriétés...**
 - Solubilité accrue
 - Elargissement des sections efficaces
 - Temps de vie
- **et change les schémas de pompage**
 - permet le Transfert phononique: co-dopage Er-Yb
 - Relaxation croisée (Tm)
- **Matrices utilisées classiquement**
 - Alumino-silicate (Yb, Tm, Ho, Nd)
 - Phospho-silicate (ErYb, Yb, Nd)
 - AIP (Yb, ErYb)



Guide d'onde, fibre monomode à grande aire effective (LMA)

- **Mode Gaussien**

- Diamètre de cœur
- Ouverture numérique (indice de réfraction)

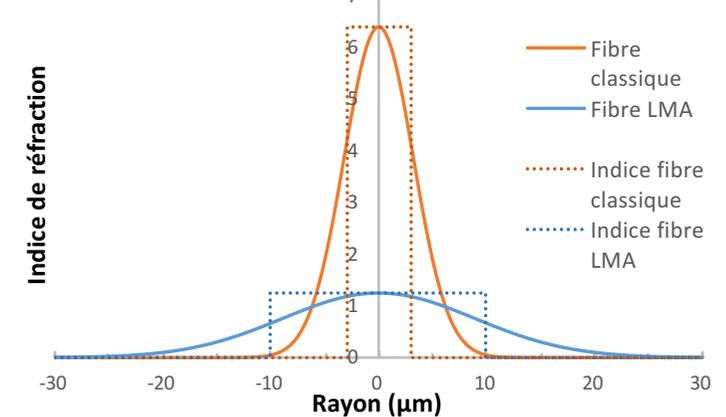
- **Large cœur:**

- Tenue à la puissance
- Intensité signal réduite (minimiser les seuils d'effets non linéaires)
- Forte absorption de pompe (laser+ court, - effets NL)
- Lasers pulsés: plus d'énergie stockée

- **Ouverture numérique**

- Minimum 0.05-à 0.07 pour la HP
- Dépend de la courbure de la fibre (packaging)

Tailles de mode et profils d'indice



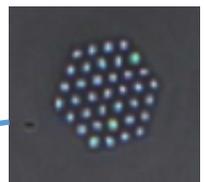
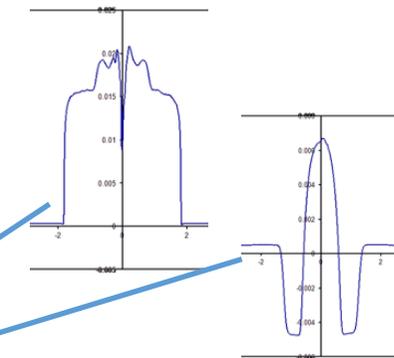
Boite à outils Chimique

| Réfractivité | élément |
|--------------|------------------|
| Positive | Al, P, Ge, TR |
| Négative | F, B |
| Neutre | Al+P équimolaire |

Boite à outils optique

| méthode |
|-------------------------------|
| Piédestal |
| fossés |
| Micro-structuration (du cœur) |

+



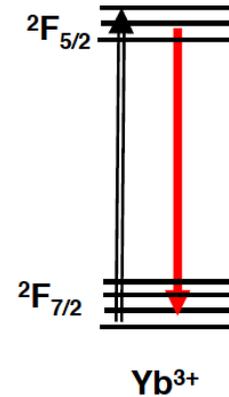
iXblue

Efficacité de conversion

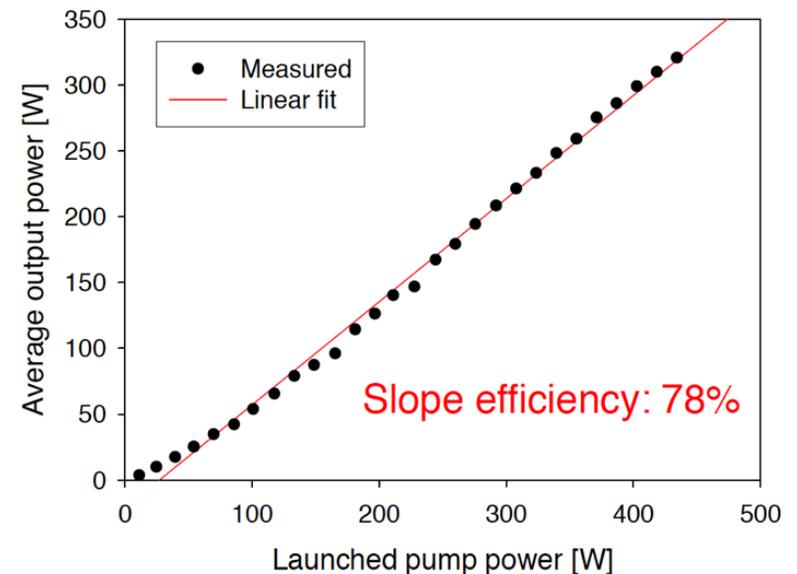
- **Efficacité quantique** $\eta = \frac{\nu_{pump}}{\nu_{signal}}$
- **Effets délétères:**
 - Agrégats: Pair-induced-quenching / clustering
 - Interaction ions-ions
 - Excited state absorption
 - Up-conversion
 - Cross relaxation
- **Mitigation**
 - Choix de la matrice
 - Dopage \ll Concentration maximale
 - design de la fibre
 - Design du laser (pompage résonant)
 - Technologie de synthèse du cœur dopé (?)



Ne pas oublier la conversion électrique optique !
Etat de l'art laser à 1 μm : >50 % 'wall plug efficiency' (0,64x0,86)

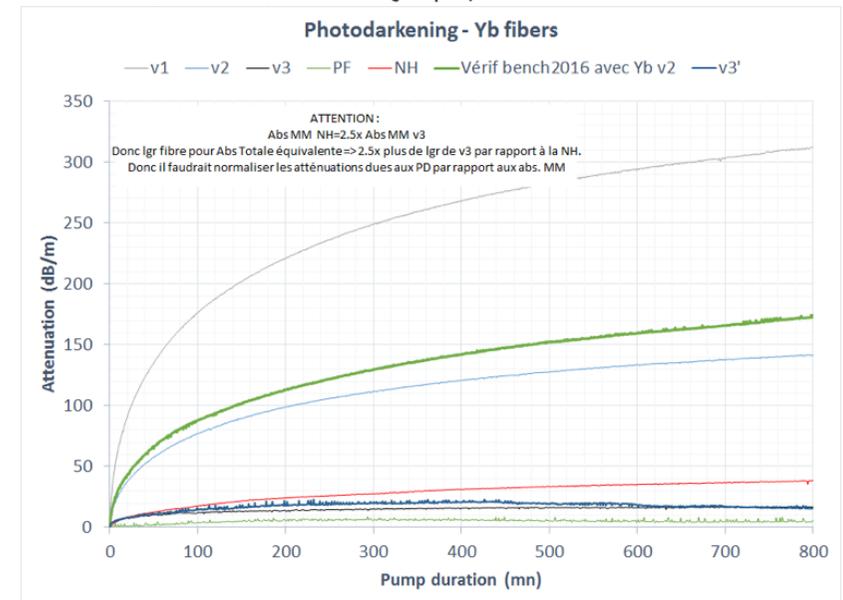
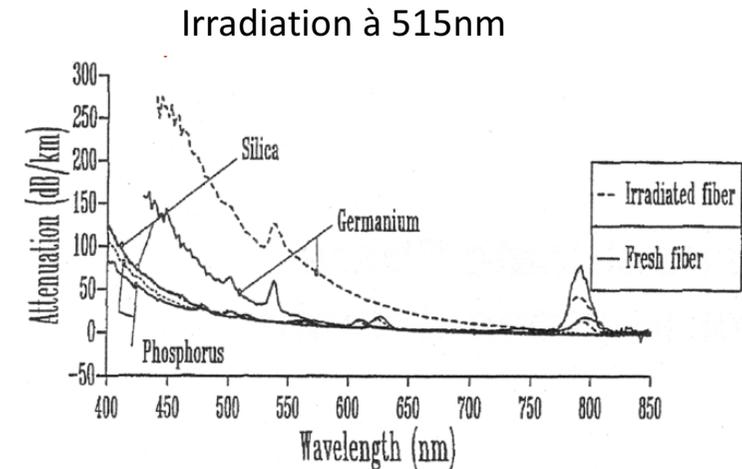


Yb, 2 niveaux
>90% théorique



Photochromisme (photo-darkening)

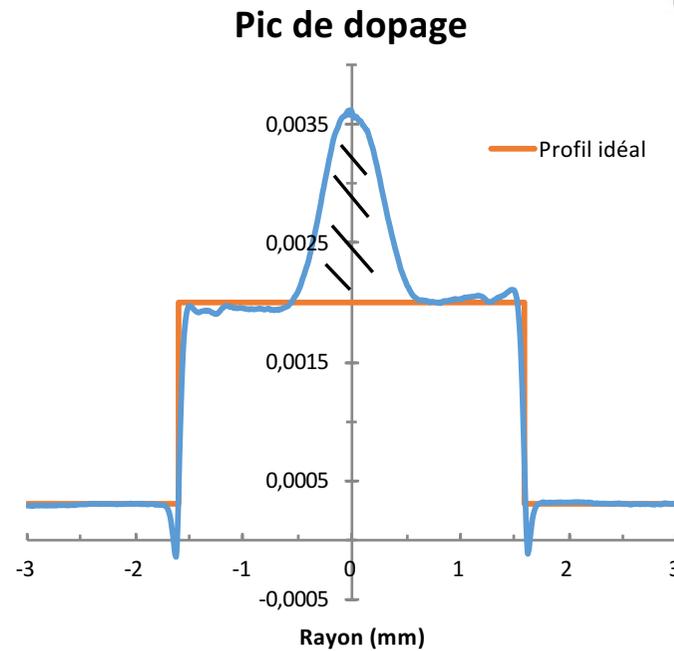
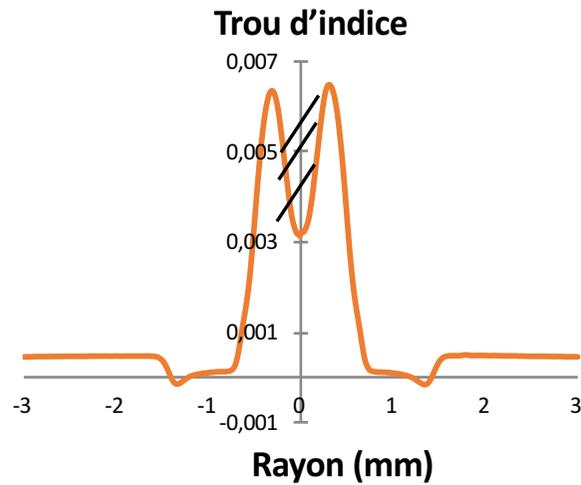
- **Création de centres colorés sous irradiation = Atténuation en excès dans le cœur**
- **Phénomène complexe !**
 - Observés sur l'Yb, Nd, Th...
 - Dépend de la matrice (AlOHC, POHC, P1 ?...)
 - Dépend de l'inversion de population
 - Dépend de la longueur d'onde de pompe
 - Photo-blanchiment
- **Enjeu majeur sur les fibres Yb HP (résolu)**
- **Mitigation possible:**
 - Choix de la matrice
 - Design du laser
 - Design de la fibre
 - Ajout de cérium
 - Chargement en gaz



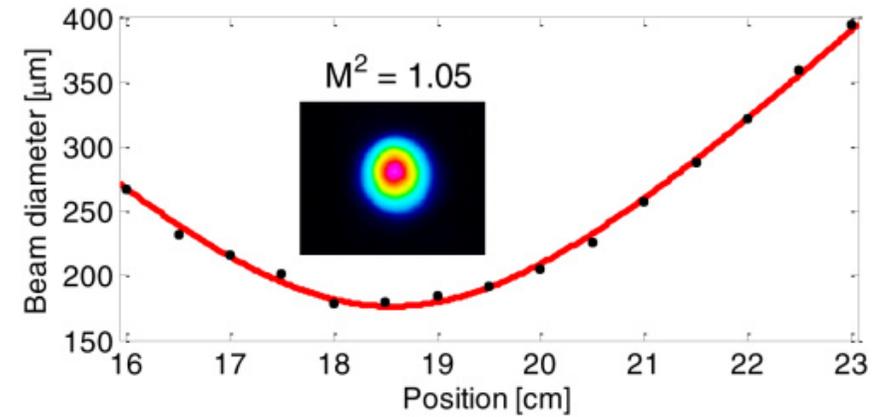
Qualité de faisceau

- **Fonctionnement monomode**

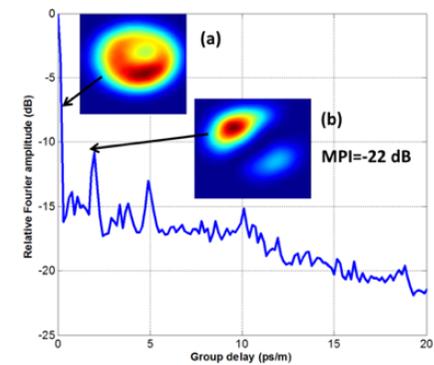
- Contrôle du profil d'indice sur préforme
- Contrôle des effets de fibrage sur l'indice
- Fonctionnement sous courbures



Mesure M^2



Mesure S^2



Limite thermique

- **Dépend de l'efficacité de conversion**

- En pratique non atteinte pour Yb même en KW
- Très problématique sur le Thulium, et l'Er-Yb

- **Limite thermique du revêtement!**

- <100°C long terme

- **Mitigation**

- Gestion thermique
- Triple gaine
- Revêtement métallique

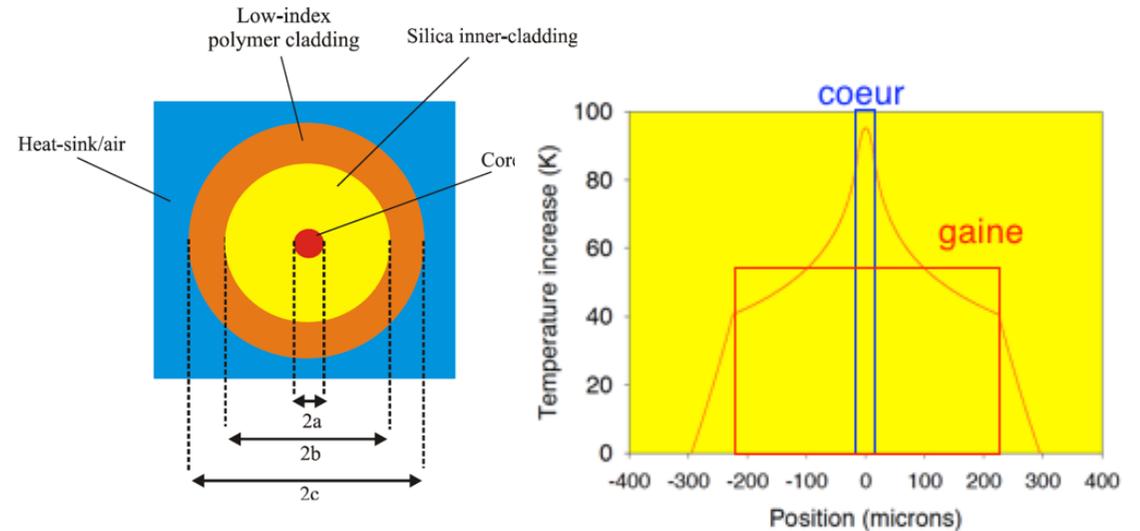
Cas d'école

Fibre Erbium Ytterbium, efficacité 40%

Diamètre de gaine 650µm

Absorption de pompe 3dB/m

Température de la fibre air figé: 1000°C



Apport thermique max. par unité de longueur

- 100W/m en convection forcée
- 200W/m avec dissipation appropriée

Limite optique

- **Rupture de la gaine**
 - Fonctionnement courbé
 - Fibres 'screen-testées'
 - Test optique
- **Fracture du coeur**
 - Défaut de fabrication
 - Limite du matériau
 - Conception du laser
- **Limite du matériau**
 - 36 KW en CW (5MW/cm²)
 - Critique pour les impulsions brèves (<ps)
 - Dépend de la composition du coeur (?)

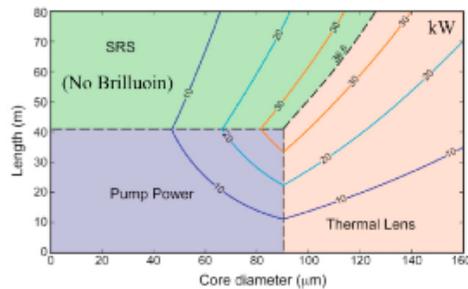


Fig. 27. Power handling capacity of optical fibers. *Modified from Ref [42].*

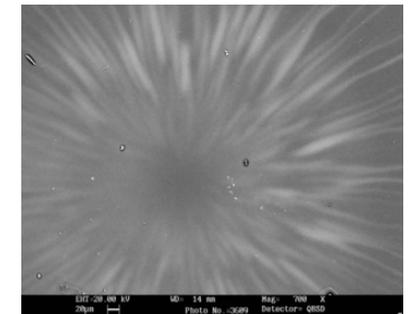
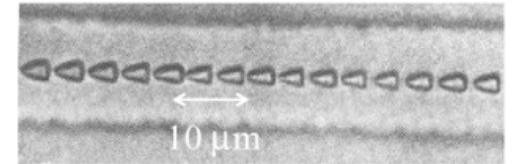
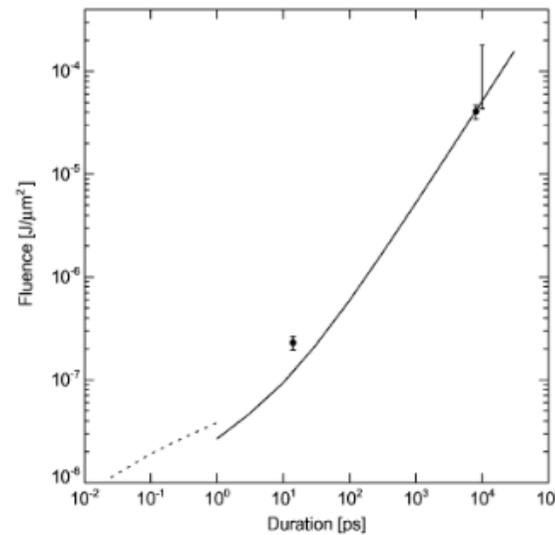
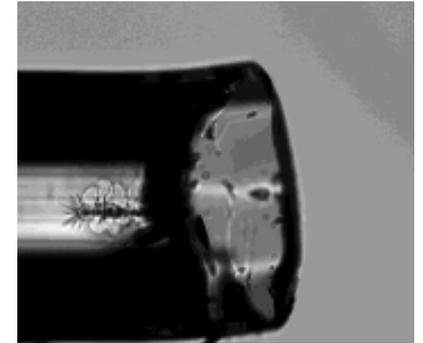
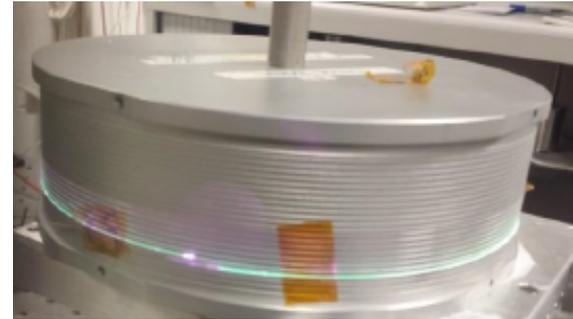


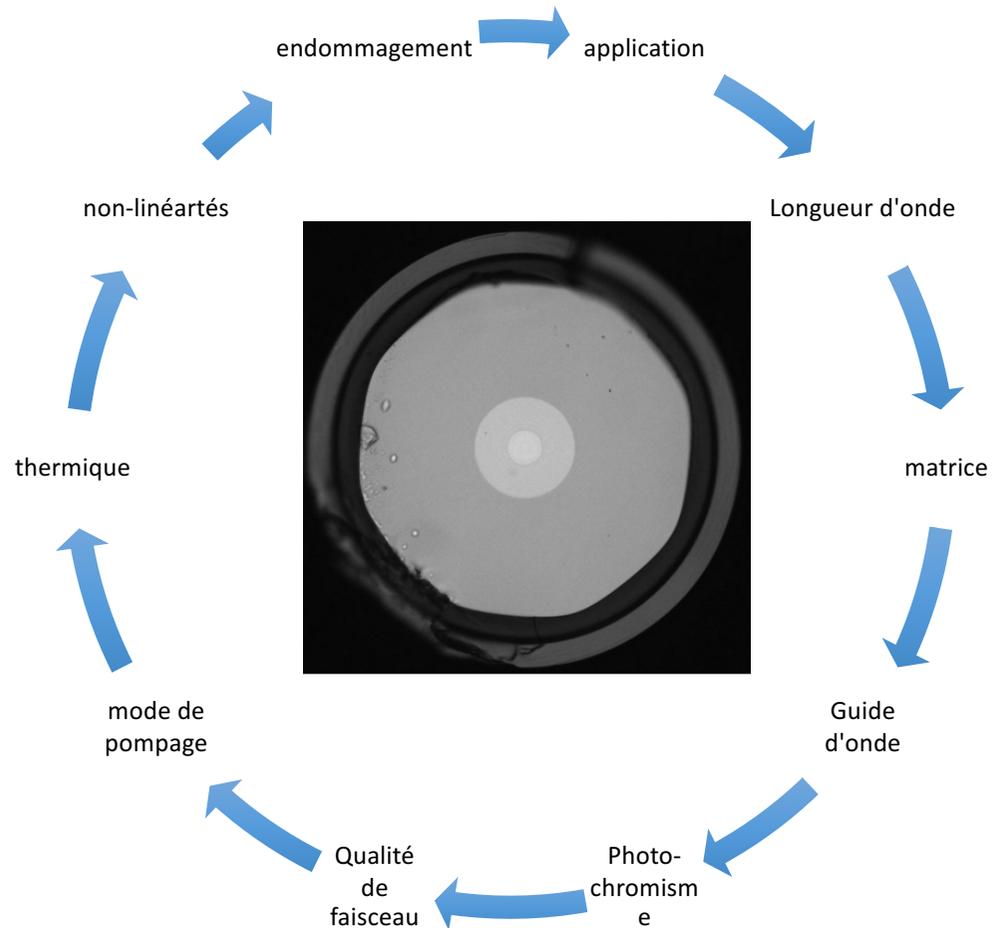
Fig. 1. Bulk damage threshold fluence of silica versus the pulse duration of 1064 nm light. The two data points are our measured values for 7 ns and 14 ps. The solid curve corresponds to the rate equation model given by (1), the dashed curve corresponds to the rate equation of Mero *et al.* [13] for 800 nm light, and the vertical bar corresponds to the dc breakdown threshold of Yasue *et al.* [14] scaled to the optical frequency of 1064 nm light.

Effets non linéaires

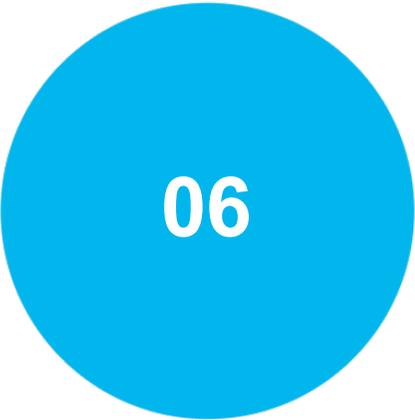
Les fibres actives (mais aussi passives) sont sensibles aux effets non-linéaires à cause de la longueur et du confinement.

- Stimulated Brillouin scattering (SBS)
 - Très sensible à la largeur spectrale du signal
 - Modification du profil acoustique...
- Stimulated Raman Scattering (SRS)
 - Peut être supprimé par un dispositif de filtrage
- Self phase modulation (SPM)
-

Conception d'une fibre active...



Recherche du meilleur compromis



06

Cas pratiques

Yb

Tm

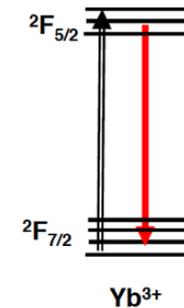
Nd

Er-Yb

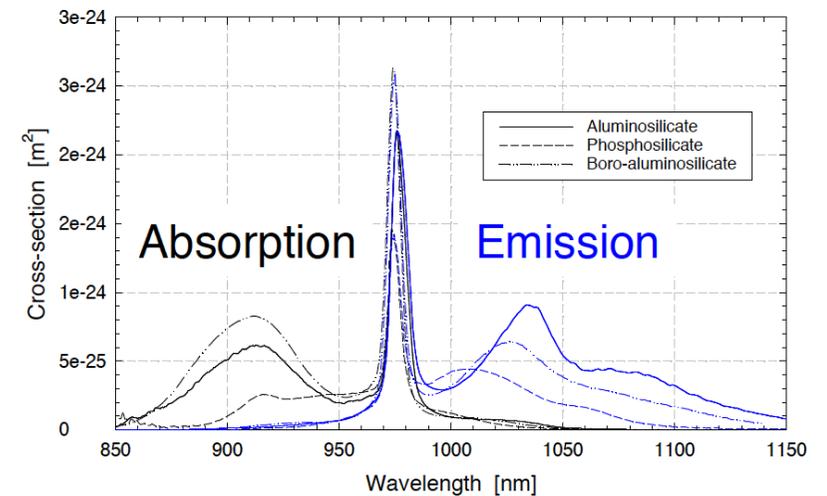
PS: non μ -structurées

Ytterbium

- **Fonctionnement à 2 niveaux d'énergie**
 - Pas d'upconversion ni de relaxation croisée
 - Forte composition possible
 - Forte efficacité quantique (>90%)
 - Pompe à 915nm ou 975 nm
- **Idéale pour la très haute puissance en CW !**
- **Photochromisme: très problématique**
 - Codopage au cérium en matrice aluminosilicate
 - Matrice phosphosilicate
- **Problématique: Design LMA**
 - Design LMA: Contrôle de très faible ouverture numérique 0.05-0.06 peu compatible avec forte absorption linéique
 - Effets non-linéaires



| | |
|--------------------------------------|---------|
| 70 | 173.054 |
| 1194 | 1.1 |
| 824 | |
| Yb | |
| [Xe]4f ¹⁴ 6s ² | |
| 6.97 | 2,3 |



Fibre LMA Yb > 20 μm

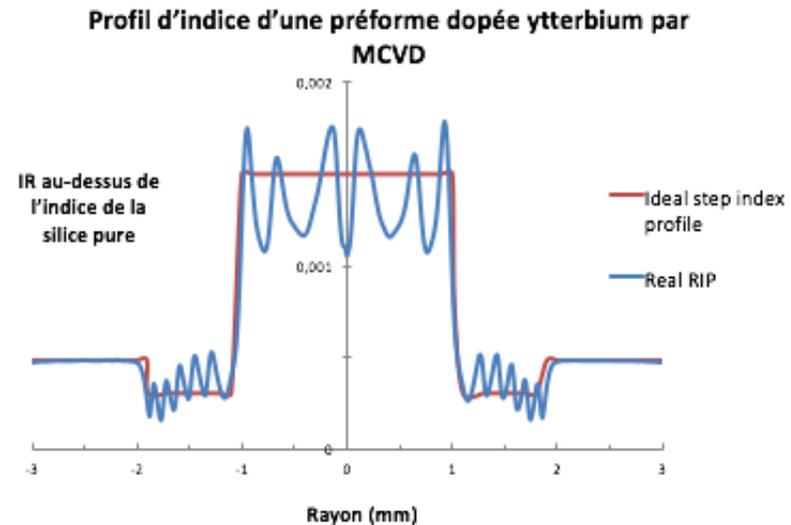
- **MCVD dopage en solution inadaptée**

- Faible diamètre de cœur
- Peu homogène radialement
- Contrôle à 10^{-4} près illusoire
- Dopage négatif peu compatible avec le poreux

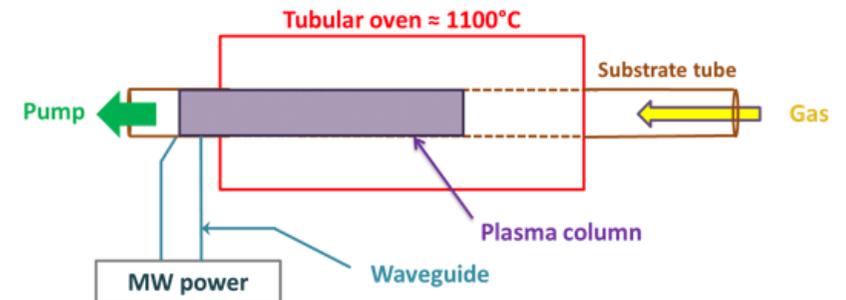
- **Développement SPCVD phase Vapeur**

Thèse Alexandre Barnini 2017

- Tout Phase vapeur: Al, Yb, Ce, F (mais aussi B, P)
- Très gros cœur possible (diamètre 4mm déposé en 90 minutes)
- Contrôle du profil par recette



| | |
|--------------------------------------|---------|
| 70 | 173.054 |
| 1194 | 1.1 |
| 824 | |
| Yb | |
| [Xe]4f ¹⁴ 6s ² | |
| 6.97 | 2,3 |



Fibre LMA Yb > 20 μm

- **Validation technologique SPCVD**

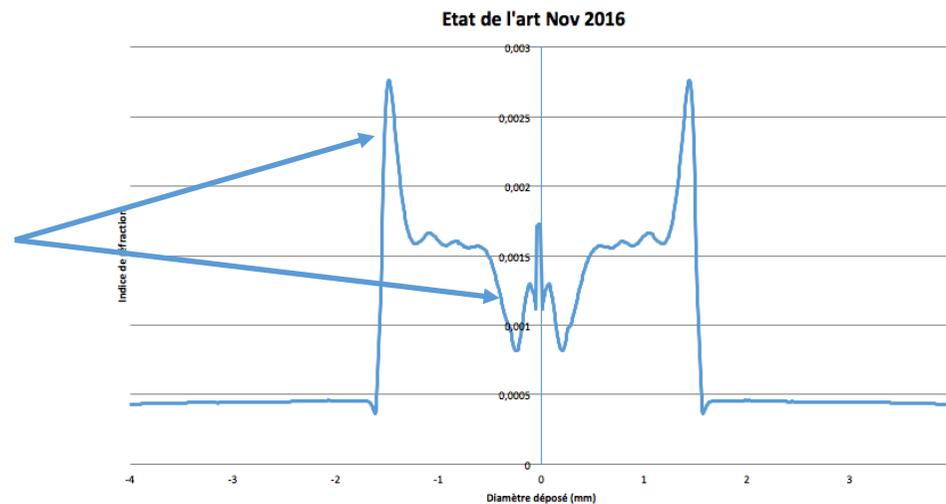
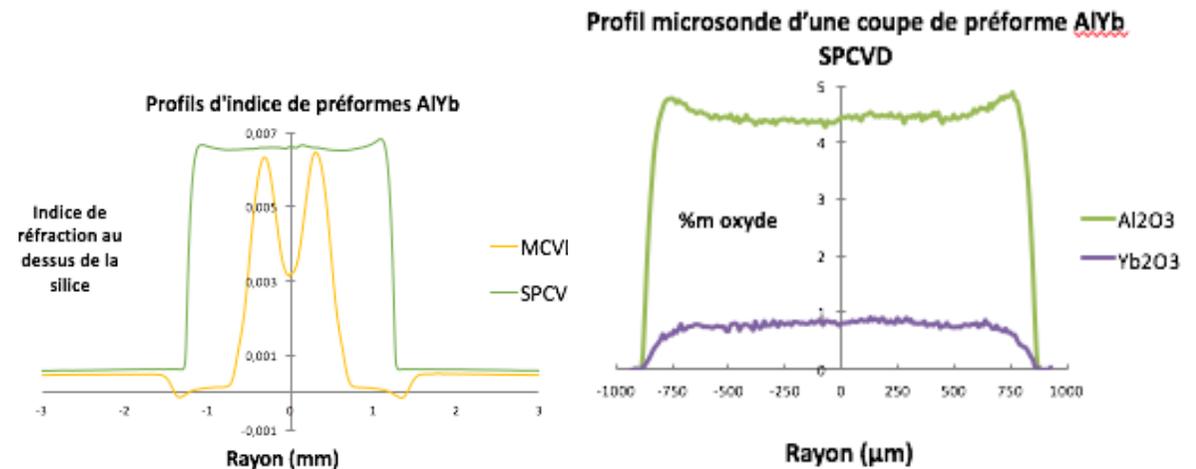
- Pureté OK
- Contrôle de l'indice OK
- Sources terres rares OK

- **Développement LMA**

- Ajout Fluor et cérium: OK

- **En cours**

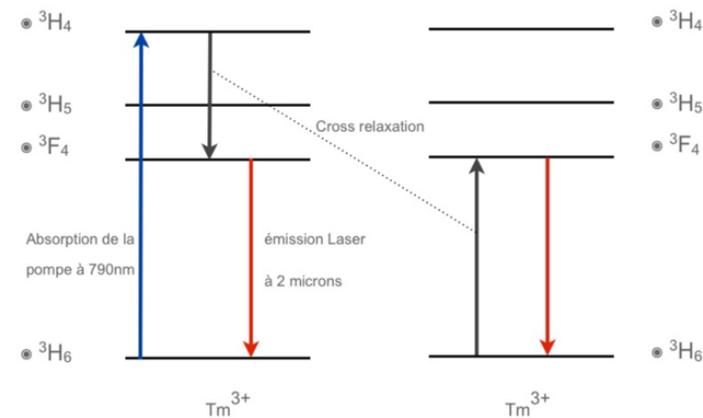
- Correction indice des zones de diffusions



Thulium

- **Fonctionnement 2 pour 1: relaxation croisée**

- Pompage à 790 nm, émission à 2µm
- Faible distance entre les ions Tm
- Efficace pour les fortes concentrations (>4%poids)



| | |
|--------------------------------------|---------|
| 69 | 168.934 |
| 1947 | 1.1 |
| 1545 | |
| Tm | |
| [Xe]4f ¹³ 6s ² | |
| 9.32 | 2,3 |

- **Matrice : aluminosilicate**

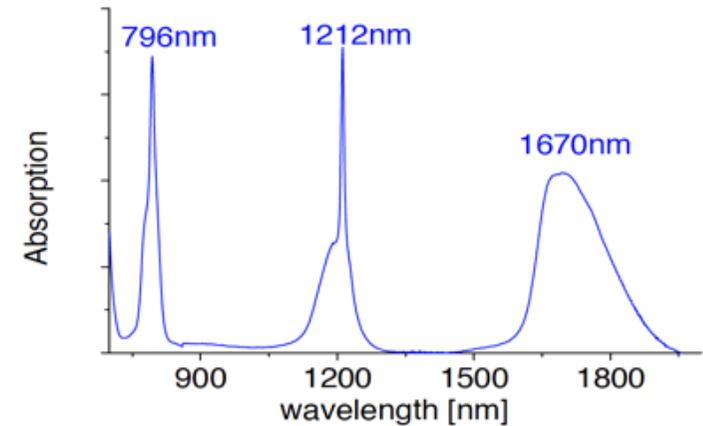
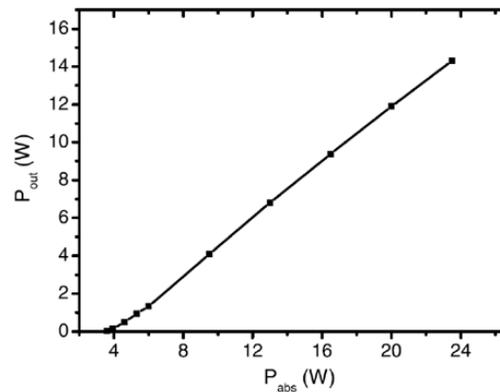
- **Photo-Chromisme: faible...**



Très faible contamination OH

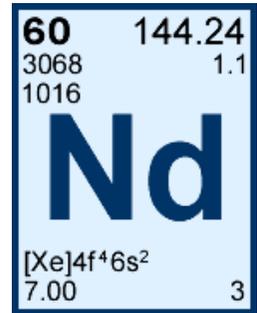
- **Efficacité**

- Théorique 79%
- Meilleur résultat publié 70%



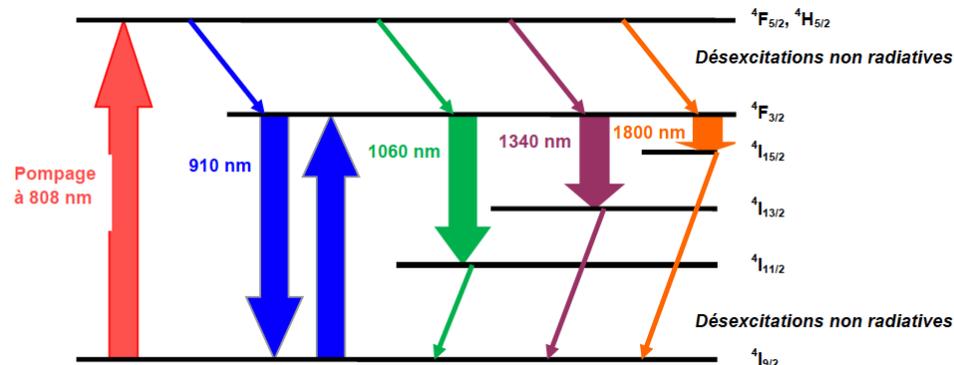
Néodyme, vers 910 nm

Fort intérêt pour les lasers bleu 440-470nm par doublage de fréquence

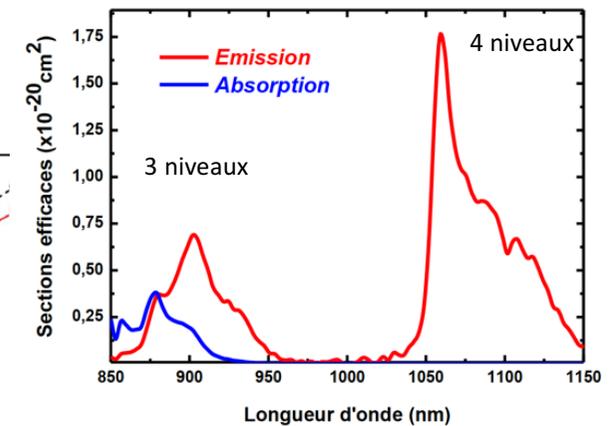
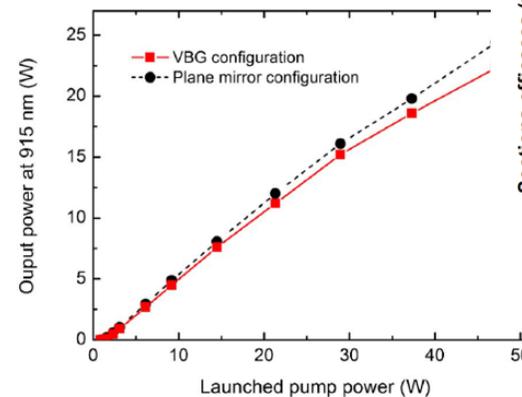
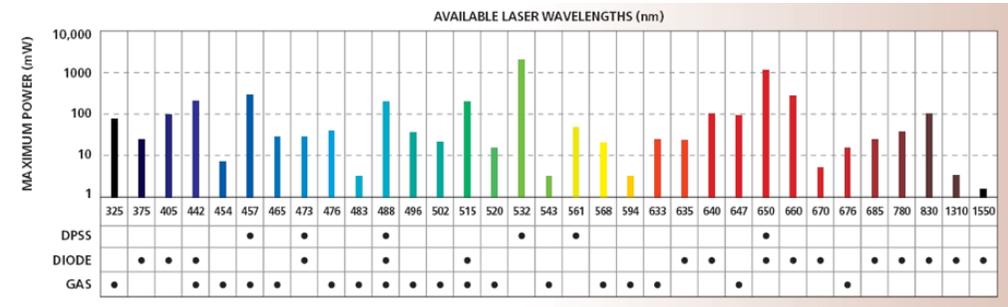


- **Schéma à 4 niveaux**

- Transition à 1060nm la plus probable
- Forte réabsorption depuis le niveau fondamental

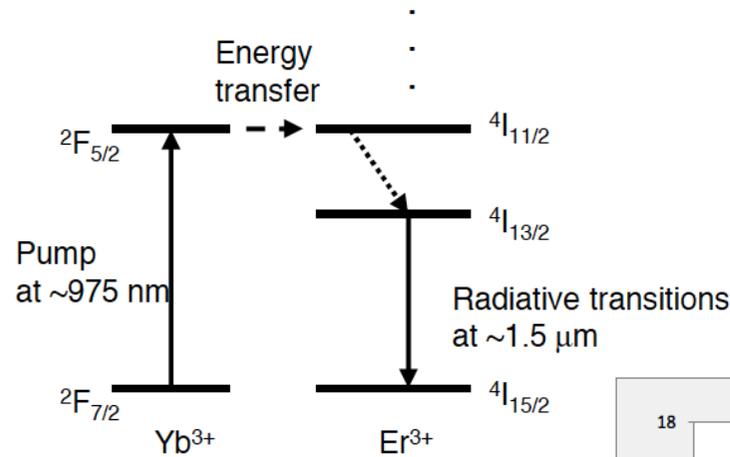


- **Matrice : aluminosilicate**
- **Photochromisme: ?**
- **Efficacité: 50%**



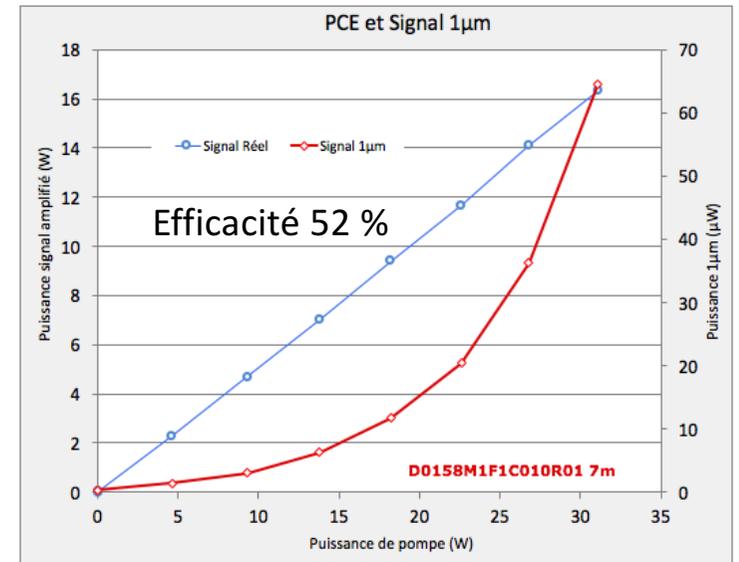
Erbium-Ytterbium: 1,5μm

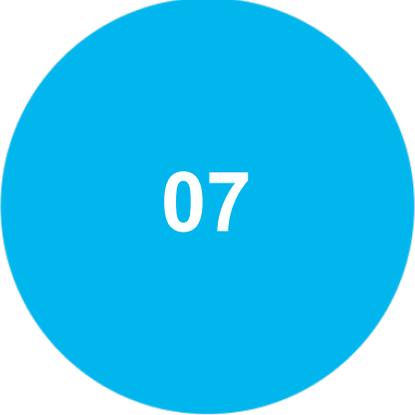
- Transfert Yb vers Er
 - Présence de liaisons P=O
 - Ratio Yb/Er élevé



| | | | |
|--------------------------------------|--------|--------------------------------------|---------|
| 68 | 167.26 | 70 | 173.054 |
| 2863 | 1.1 | 1194 | 1.1 |
| 1522 | | 824 | |
| Er | | Yb | |
| [Xe]4f ¹² 6s ² | | [Xe]4f ¹⁴ 6s ² | |
| 9.07 | 3 | 6.97 | 2,3 |

- Matrice : phosphosilicate (ou P+Al)
- Photochromisme: non
- Efficacité: 50%
- Problématiques spécifiques
 - **Tenue à la température (du revêtement)**
 - **Emission parasite à 1060nm**





07

Le Défi de la (très) haute puissance

La montée en puissance, fibres classiques

- **Large cœur**
- **Faible ON**
- **Composition complexe**
- **Fort contrôle de l'indice de réfraction**



Technologie de fabrication de cœur à fort volume et reproductible

Limitations of fibers

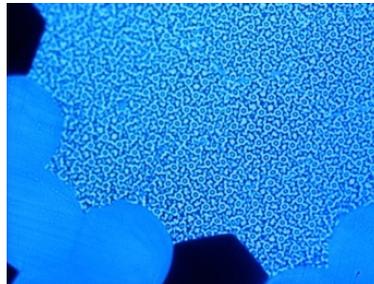
Long with tight beam confinement: Many advantages but some trade-offs

| | | |
|---|--|---|
| Optical damage | <ul style="list-style-type: none"> • Large core • (New materials? Air-guided??) | All operating regimes |
| Nonlinear degradation <ul style="list-style-type: none"> • Raman • FWM • SPM | <ul style="list-style-type: none"> • Large core • Short fiber <ul style="list-style-type: none"> – Higher RE-concentration / new materials – Higher pump brightness • Spectral filter | Primarily pulsed and narrow linewidth regimes |
| SBS | <ul style="list-style-type: none"> • Linewidth broadening of signal <ul style="list-style-type: none"> – SBS negligible for > 10 GHz linewidth – No SBS for pulses shorter than ~5 ns • Linewidth broadening of gain <ul style="list-style-type: none"> – Temperature, stress, compositional <i>variations</i> | Very narrow linewidth Large core & short fiber helps, too! |
| Energy storage | <ul style="list-style-type: none"> • Large core | High energy pulses |
| Thermal degradation Incl. TMI | <ul style="list-style-type: none"> • Longer fibers • Better coatings • Improved heatsinking • Tandem-pumping • Smaller core? | |

Merci Johan Nilsson !

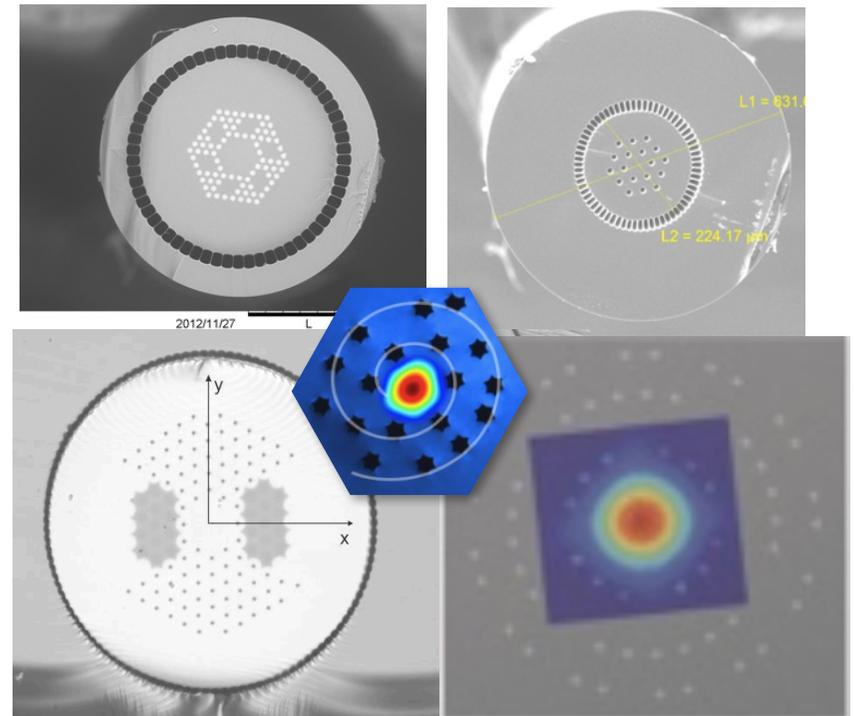
La montée en puissance, fibres μ -structurées

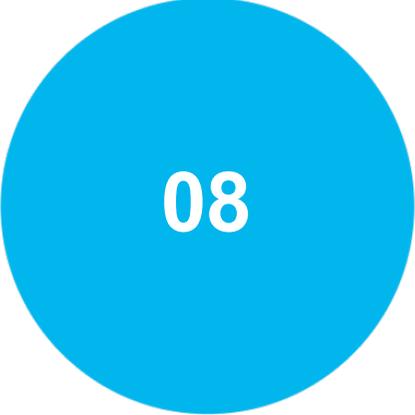
- Fabrication en stack and draw
- Cœur dopé à l'indice de la silice
- Indice de réfraction contrôlé à 10^{-5}



Technologie de fabrication de cœur à fort volume et **très** reproductible en composition

- Principes de guidage alternatifs
- Très grande taille modale
- Très nombreux design





08

Conclusion

- ✓ La silice est fantastique
- ✓ En régime continu, la limite est proche...
- ✓ En régime pulsé, la course à la puissance continue

La synthèse de matériau dopé en grande quantité, très bien contrôlé en indice de réfraction, de composition chimique complexe, de façon très reproductible et adapté aux designs de fibre de demain... reste un Graal pour la technologie des lasers à fibre.



iXblue