



Nouveaux concepts pour des lasers de puissance :

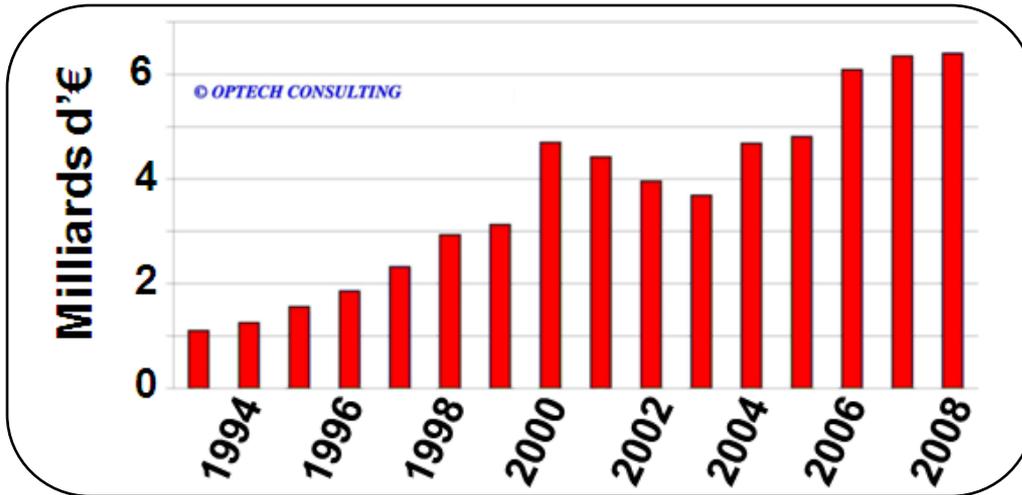
- Fibres cristallines dopées Ytterbium
 - Pompage direct de cristaux dopés Néodyme
-

Soutenance de thèse

Damien Sangla

**Directeurs de thèse : François Balembos
Kheirreddine Lebbou**

L'essor de l'usinage des matériaux par laser

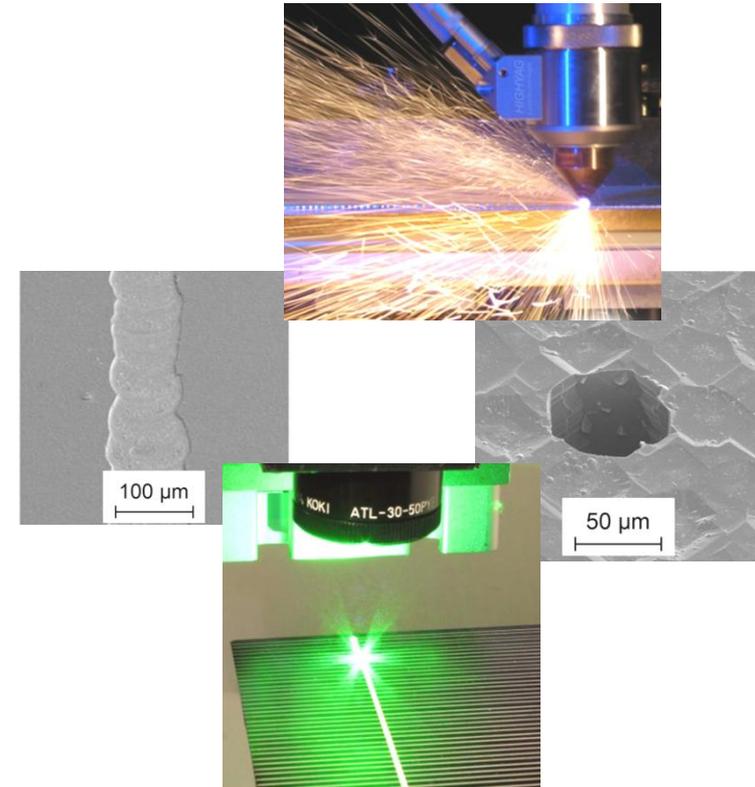


Procédés

- Découpe/Perçage
- Soudure/Gravure
- etc..

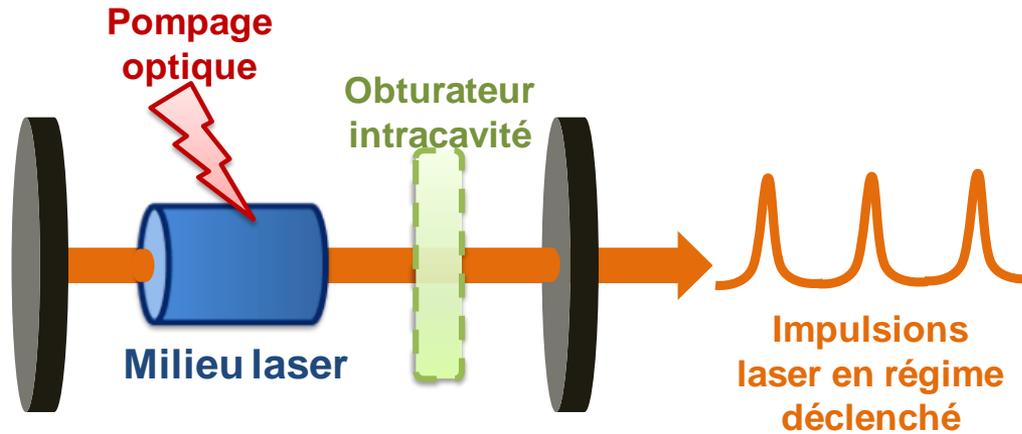
Besoins

- Robustesse
- Faible coût
- Forte puissance moyenne
- Forte puissance crête



**Lasers solides
pompés par diode**

• Laser solide pompé par diode

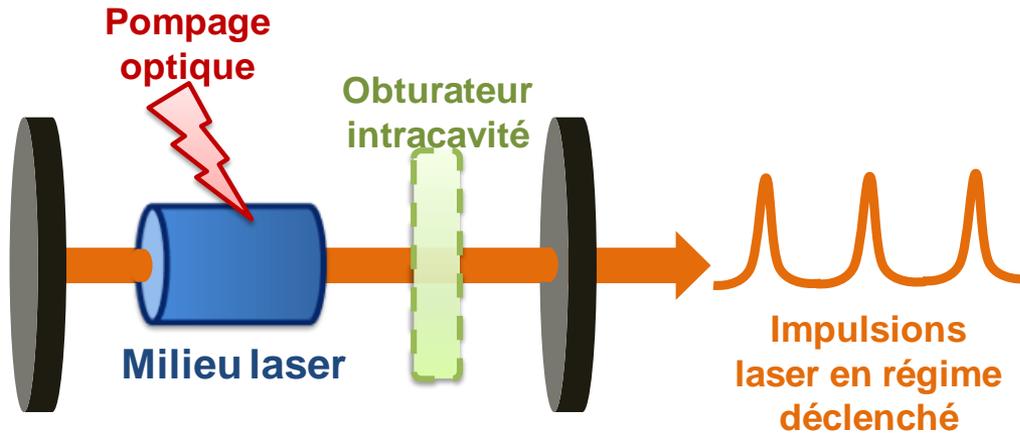


- Fiabilité
- Compacité
- Faible maintenance
- Forte évolution des diodes laser



➔ Montée en puissance des systèmes actuels

• Laser solide pompé par diode

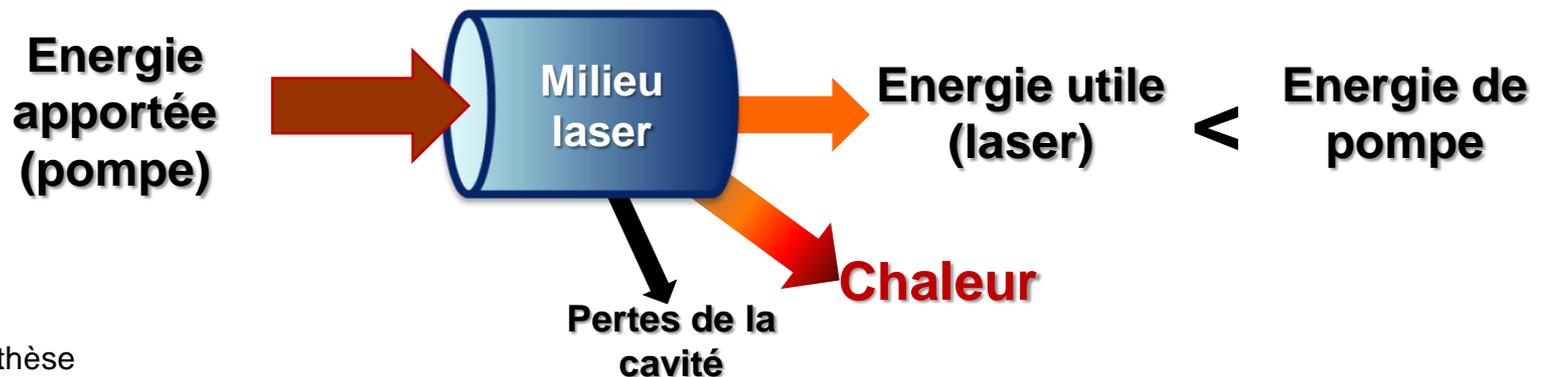


- Fiabilité
- Compacité
- Faible maintenance
- Forte évolution des diodes laser



➔ Montée en puissance des systèmes actuels

• Bilan énergétique



- **Echauffement dans un milieu laser**

Efficacité quantique



Défaut quantique

➔ **Efficacité laser maximale**

➔ **Echauffement minimal du milieu**

$$\eta_Q = \frac{\lambda_{\text{Pompe}}}{\lambda_{\text{Laser}}} < 1$$

$$1 - \eta_Q = 1 - \frac{\lambda_{\text{Pompe}}}{\lambda_{\text{Laser}}}$$

• Echauffement dans un milieu laser

Efficacité quantique



Défaut quantique

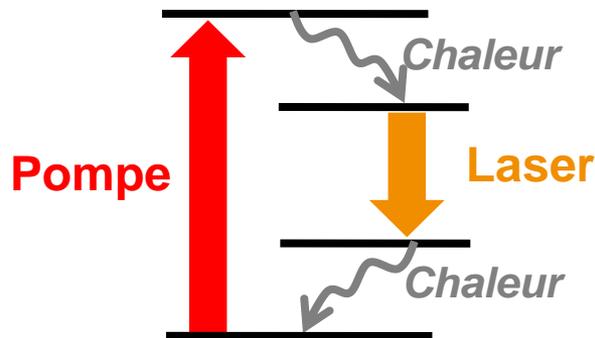
➔ **Efficacité laser maximale**

➔ **Echauffement minimal du milieu**

$$\eta_Q = \frac{\lambda_{\text{Pompe}}}{\lambda_{\text{Laser}}} < 1$$

$$1 - \eta_Q = 1 - \frac{\lambda_{\text{Pompe}}}{\lambda_{\text{Laser}}}$$

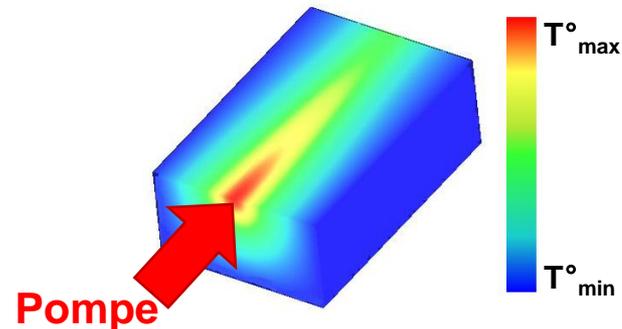
Exemple : Cristal de Nd:YAG pompé à 808 nm émettant à 1064 nm.



$$\eta_Q = 76 \%$$

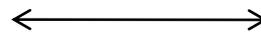


$$1 - \eta_Q = 24 \%$$



- **Echauffement dans un milieu laser**

Efficacité quantique



Défaut quantique

➔ **Efficacité laser maximale**

➔ **Echauffement minimal du milieu**

$$\eta_Q = \frac{\lambda_{\text{Pompe}}}{\lambda_{\text{Laser}}} < 1$$

$$1 - \eta_Q = 1 - \frac{\lambda_{\text{Pompe}}}{\lambda_{\text{Laser}}}$$

- **Soit on réduit la charge thermique**

→ Défaut quantique

- **Echauffement dans un milieu laser**

Efficacité quantique



Défaut quantique

➔ **Efficacité laser maximale**

➔ **Echauffement minimal du milieu**

$$\eta_Q = \frac{\lambda_{\text{Pompe}}}{\lambda_{\text{Laser}}} < 1$$

$$1 - \eta_Q = 1 - \frac{\lambda_{\text{Pompe}}}{\lambda_{\text{Laser}}}$$

- **Soit on réduit la charge thermique**

→ Défaut quantique

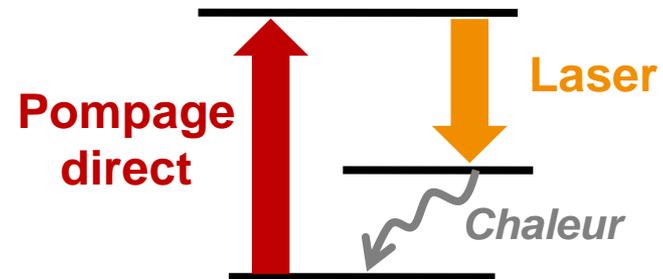
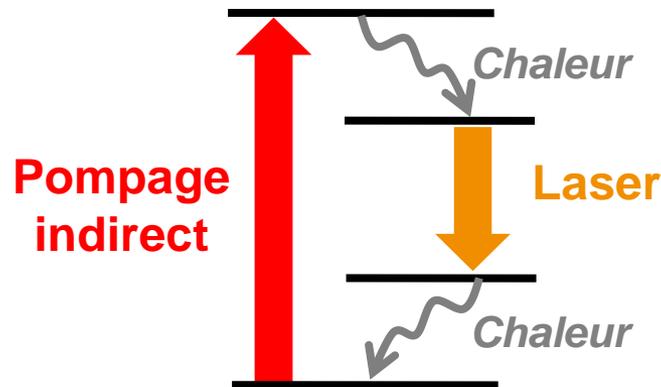
- **Soit on gère au mieux l'échauffement**

→ Géométrie du milieu

Ex : fibres, disques minces, slabs...

Nous proposons d'étudier :

→ **1. Pompage direct dans les niveaux émetteurs de cristaux dopés Néodyme**



→ **2. Concept de fibres cristallines dopées Ytterbium**



- Géométrie adaptée à la gestion des effets thermiques
- Réduction du défaut quantique

Introduction

1. **Pompage direct de cristaux dopés Néodyme**



1.1 Principe du concept

1.2 Etude expérimentale du Nd:YVO₄ pompé à 914 nm

1.3 Conclusions et perspectives

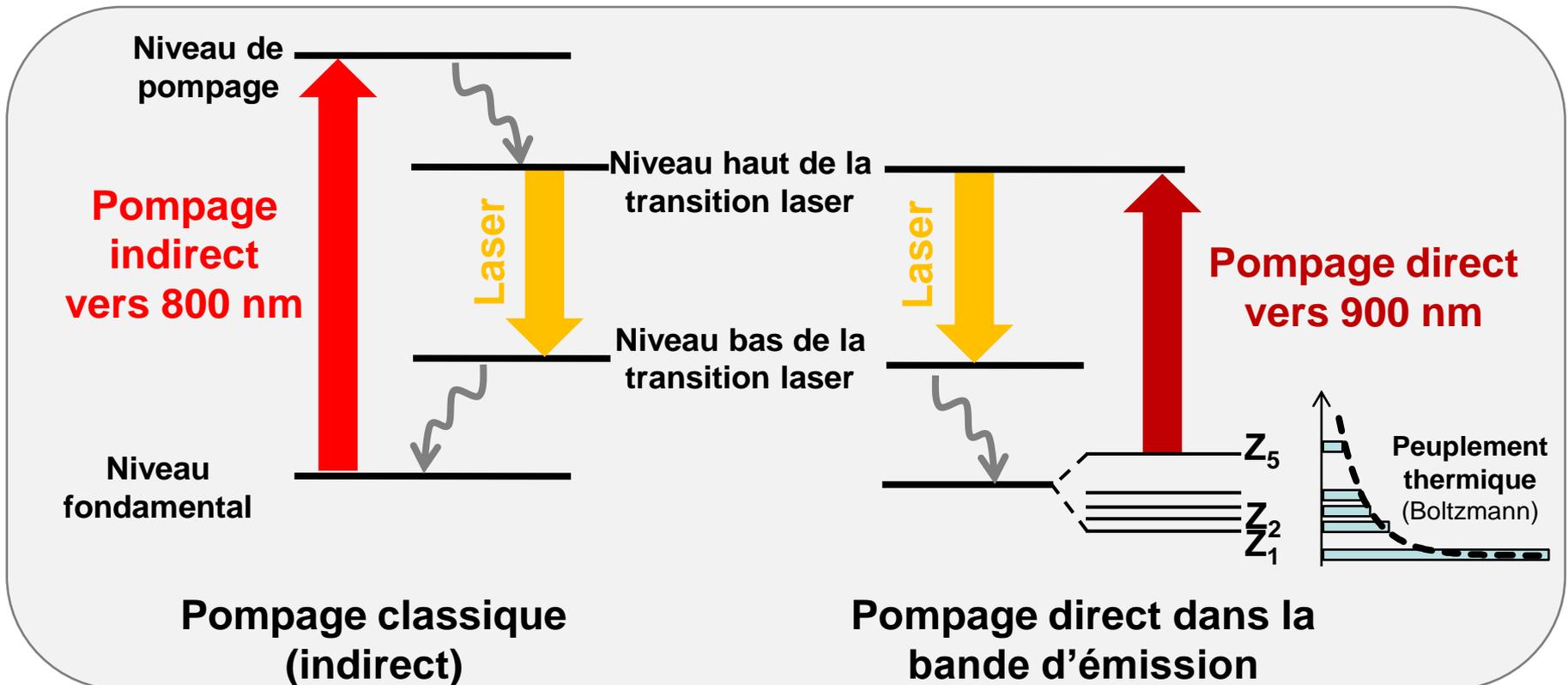
2. Lasers à fibres cristallines dopées Ytterbium

Conclusion

- **Objectif :** Réduire au maximum le défaut quantique pour l'ion Nd^{3+}

- ⇒ Diminution intrinsèque des effets thermiques
- ⇒ Augmentation de l'efficacité optique/optique atteignable

- **Principe :**



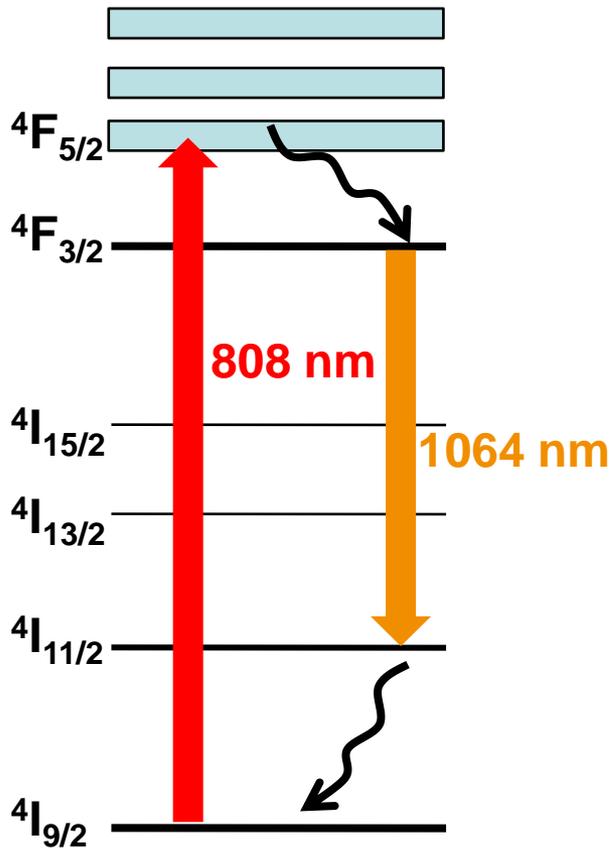
Cristal	Nd:YVO ₄	Nd:YAG
Longueur d'onde de pompe	914 nm	938 nm
Défaut quantique	14.1 %	12 %
$\sigma_{\text{Emission}} @ 1064 \text{ nm } (\times 10^{-20} \text{ cm}^2)$	114	28
Facteur de population de Z ₅ à T° _{Amb}	5 %	0.7 %
$\Delta\lambda (T^{\circ} \text{Amb})$	> 4 nm	~ 1 nm
$\sigma_{\text{Abs}} (T^{\circ} \text{Amb}) (\times 10^{-20} \text{ cm}^2)$	~ 0,4	~ 0,077
Conductivité thermique	~ 6 W.m ⁻¹ .K ⁻¹	~ 10 W.m ⁻¹ .K ⁻¹

- Propriétés du Nd:YVO₄ :**
- Fort gain
 - Absorption plus forte
 - Propriétés thermo-mécaniques plus faibles



Etude plus intéressante pour ce cristal

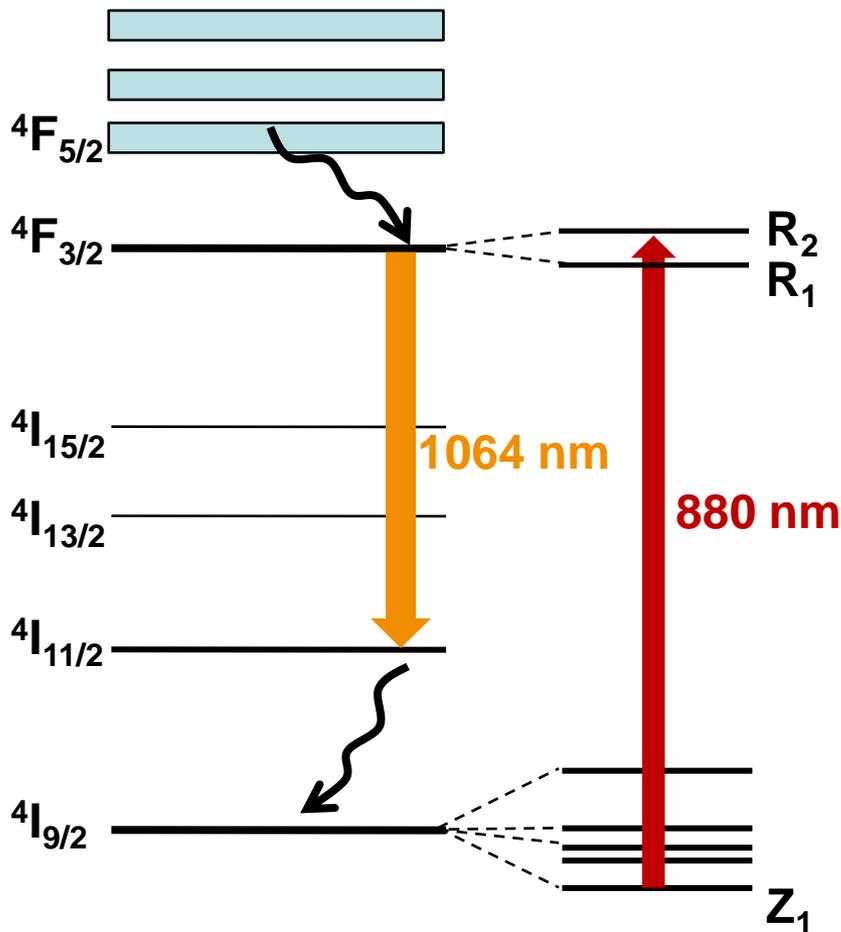
Diagramme énergétique du Nd³⁺:YVO₄



λ_p (nm)	808
$1-\eta_Q$	24 %

808 nm : R.A. Fields et al., Appl. Phys. Lett., 51 (1987).
Peng et al., IEEE JQE, 38, (2002).

Diagramme énergétique du $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$



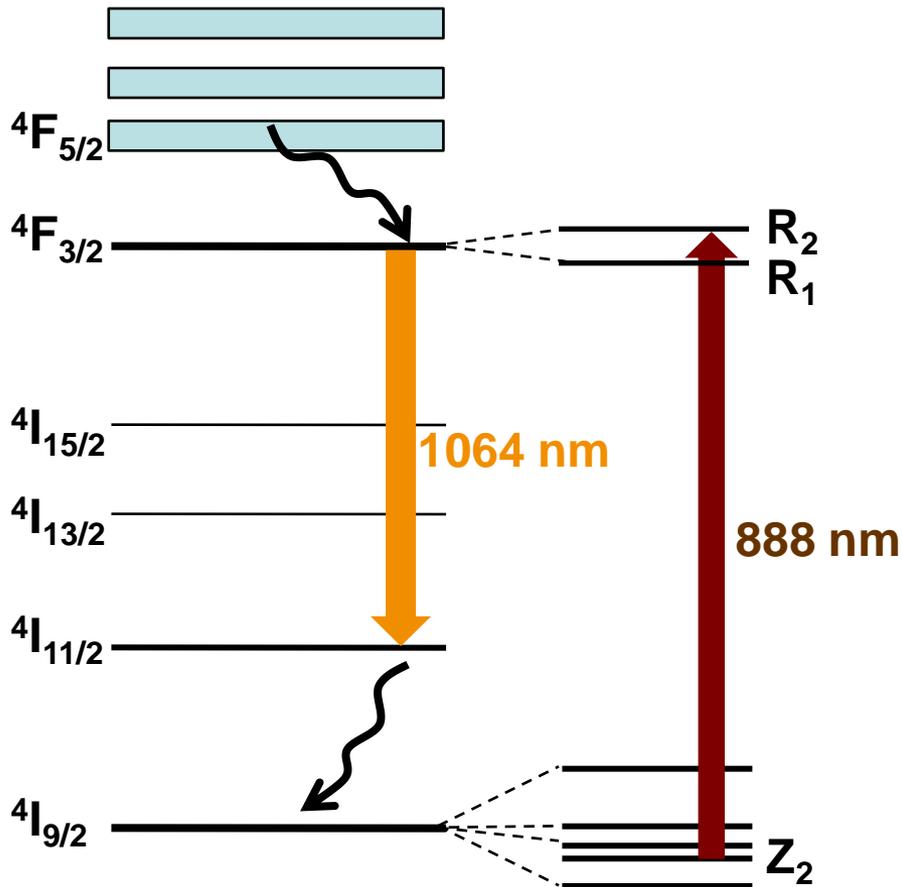
Réduction du défaut quantique :

λ_p (nm)	808	880
$1-\eta_Q$	24 %	17.3 %

808 nm : R.A. Fields et al., Appl. Phys. Lett., 51 (1987).
Peng et al., IEEE JQE, 38, (2002).

880 nm : R. Lavi et al., Appl. Opt., 39 (2000).

Diagramme énergétique du Nd³⁺:YVO₄



Réduction du défaut quantique :

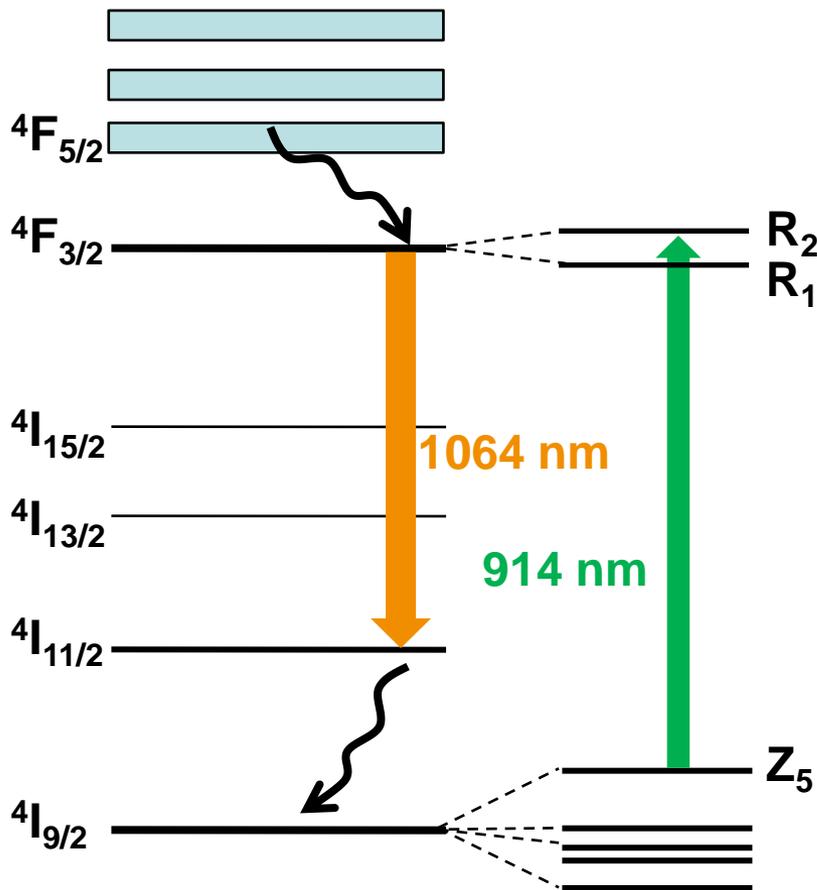
λ_p (nm)	808	880	888
$1-\eta_Q$	24 %	17.3 %	16.8 %

808 nm : R.A. Fields et al., Appl. Phys. Lett., 51 (1987).
Peng et al., IEEE JQE, 38, (2002).

880 nm : R. Lavi et al., Appl. Opt., 39 (2000).

888 nm : L. McDonagh et al., Opt. Lett. 31 (2006).

Diagramme énergétique du Nd³⁺:YVO₄



Réduction du défaut quantique :

λ_p (nm)	808	880	888	914
$1-\eta_Q$	24 %	17.3 %	16.8 %	14,1 %

**➔ Réduction importante
de la charge thermique**

Introduction

1. **Pompage direct de cristaux dopés Néodyme**

1.1 Principe du concept

➔ 1.2 Etude expérimentale du Nd:YVO₄ pompé à 914 nm

1.3 Conclusions et perspectives

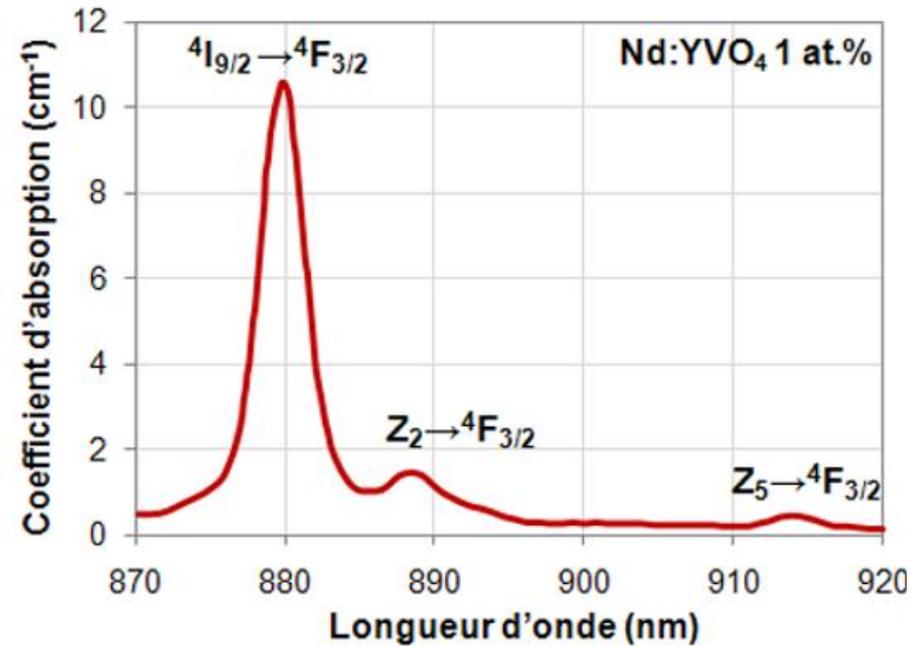
2. Lasers à fibres cristallines dopées Ytterbium

Conclusion

**Spectre @ T° ambiante
(non polarisé) :**

Absorption très faible à 914 nm :

$\alpha_p = 0,5 \text{ cm}^{-1}$ (pour 1 at.%)



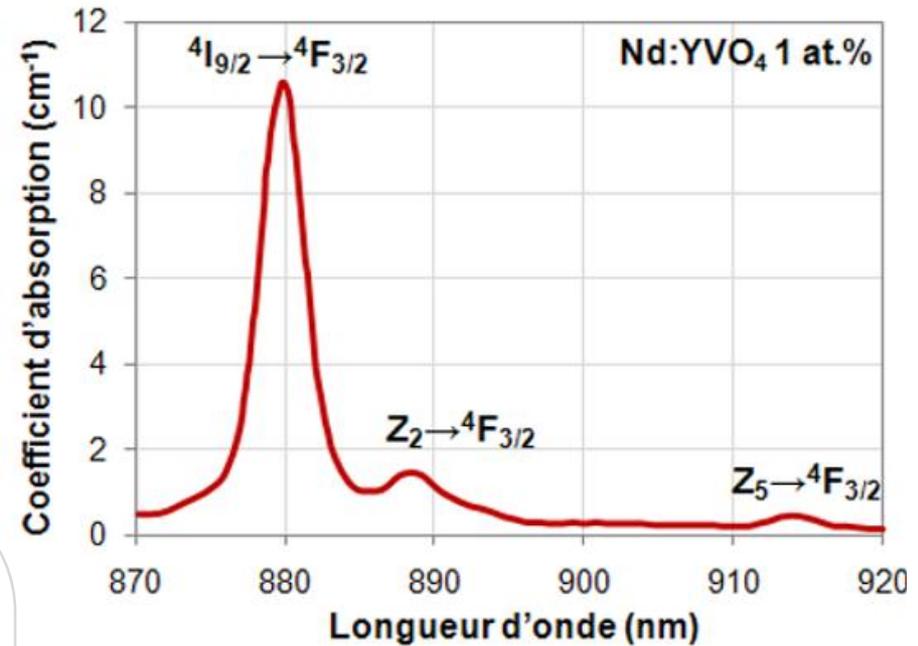
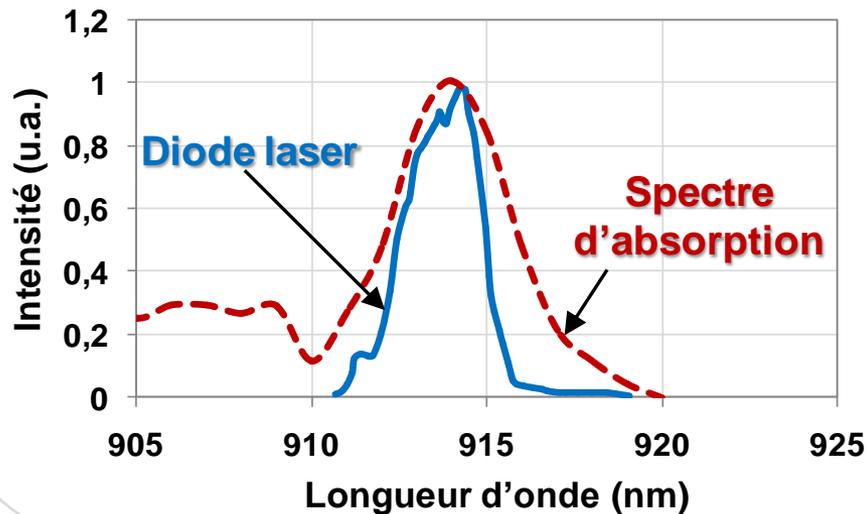
**Spectre @ T° ambiante
(non polarisé) :**

Absorption très faible à 914 nm :

$$\alpha_p = 0,5 \text{ cm}^{-1} \text{ (pour 1 at.\%)}$$

Recouvrement spectral

**Diode : 35 W, $\lambda = 914 \text{ nm}$, $\Phi = 100 \mu\text{m}$,
ON = 0,22, $\Delta\lambda = 2,5 \text{ nm}$**



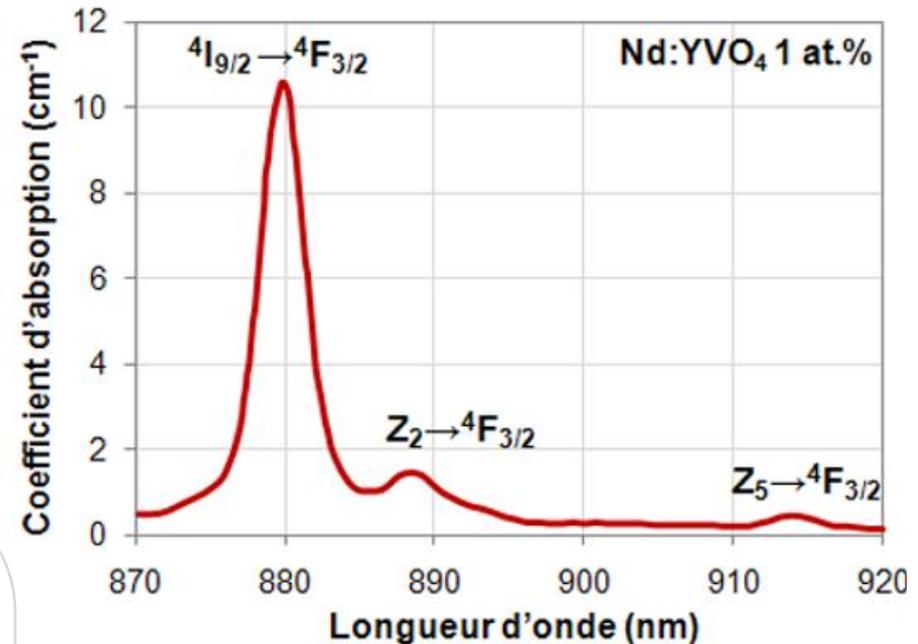
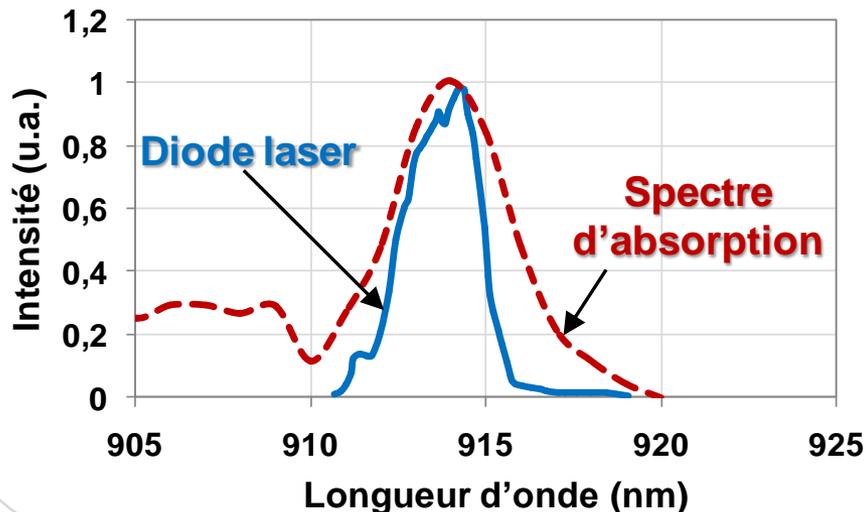
**Spectre @ T° ambiante
(non polarisé) :**

Absorption très faible à 914 nm :

$$\alpha_p = 0,5 \text{ cm}^{-1} \text{ (pour 1 at.\%)}$$

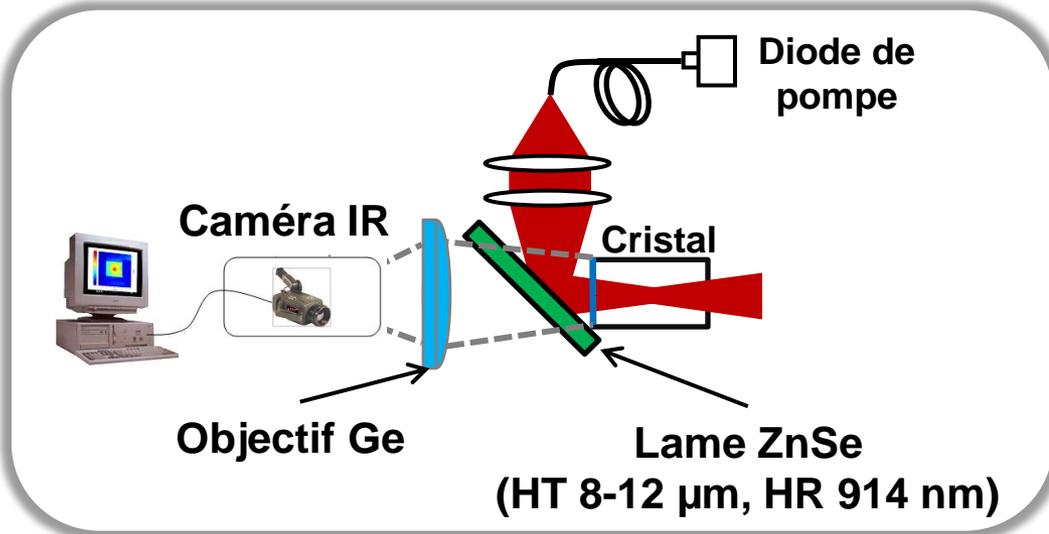
Recouvrement spectral

**Diode : 35 W, $\lambda = 914 \text{ nm}$, $\Phi = 100 \mu\text{m}$,
ON = 0,22, $\Delta\lambda = 2,5 \text{ nm}$**

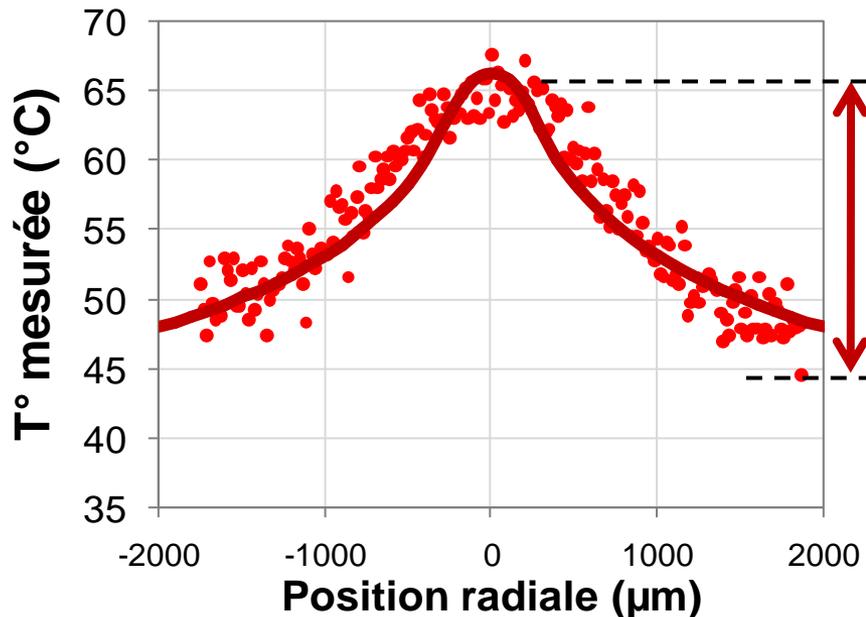
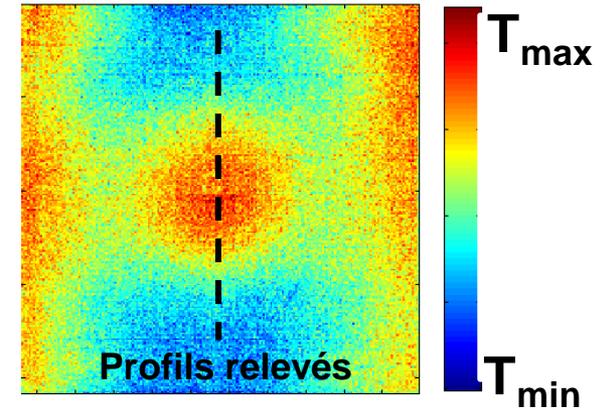


Cristal utilisé :
L = 10 mm
Taux de dopage : 1,5 at.%

**Absorption = 44 %
(non polarisée)**

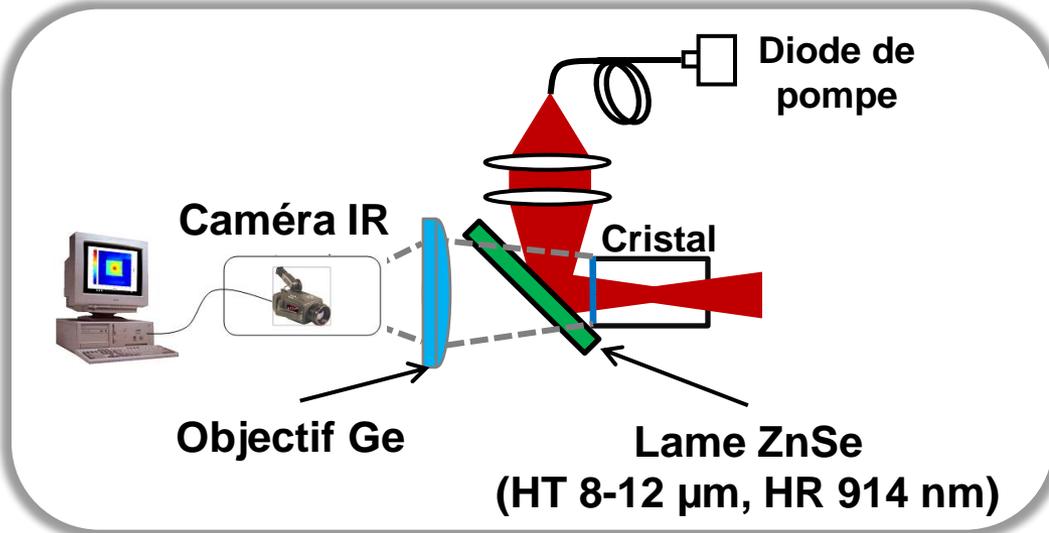


Pour 14,6 W absorbés

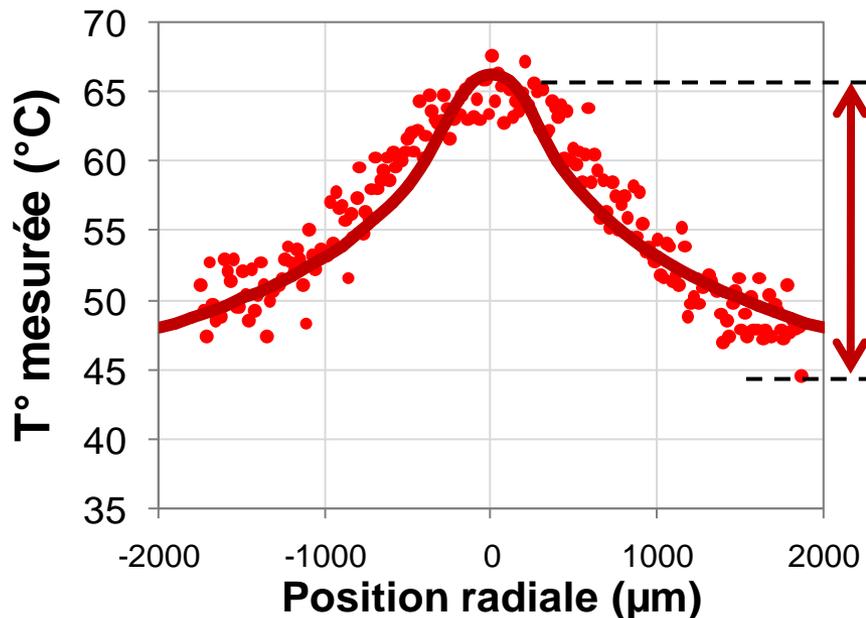
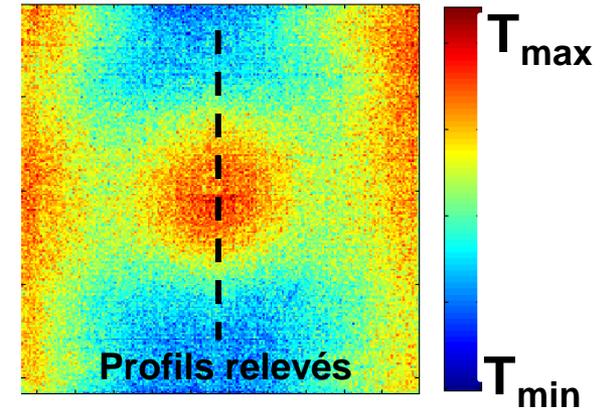


$\Delta T < 25^\circ$
sans laser

**Faible
échauffement**



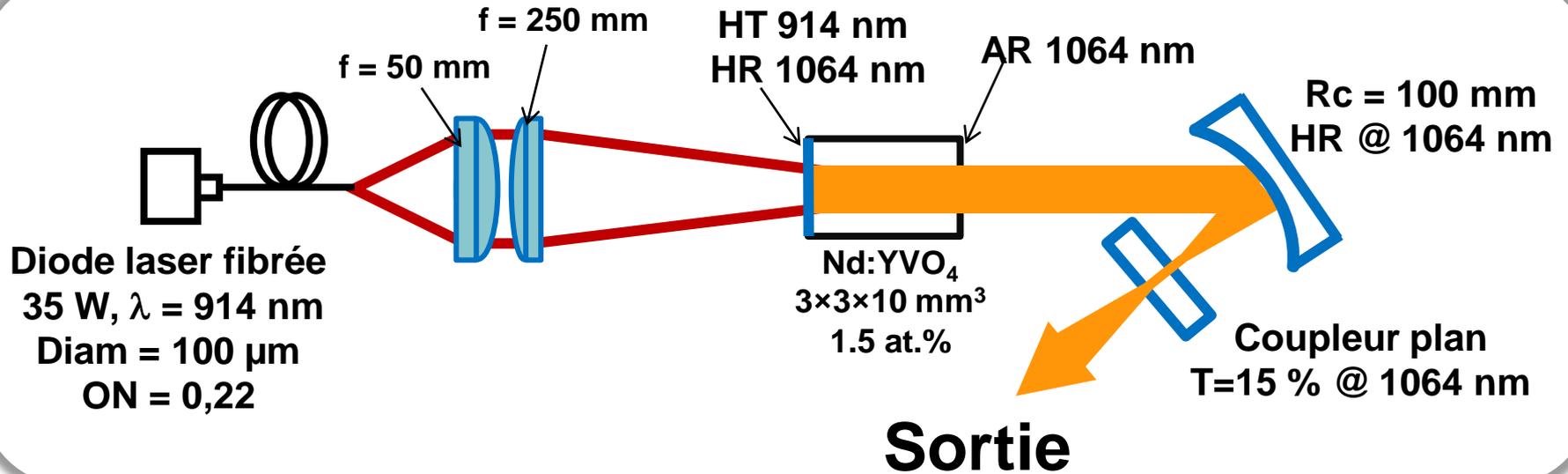
Pour 14,6 W absorbés



$\Delta T < 25^\circ$
sans laser

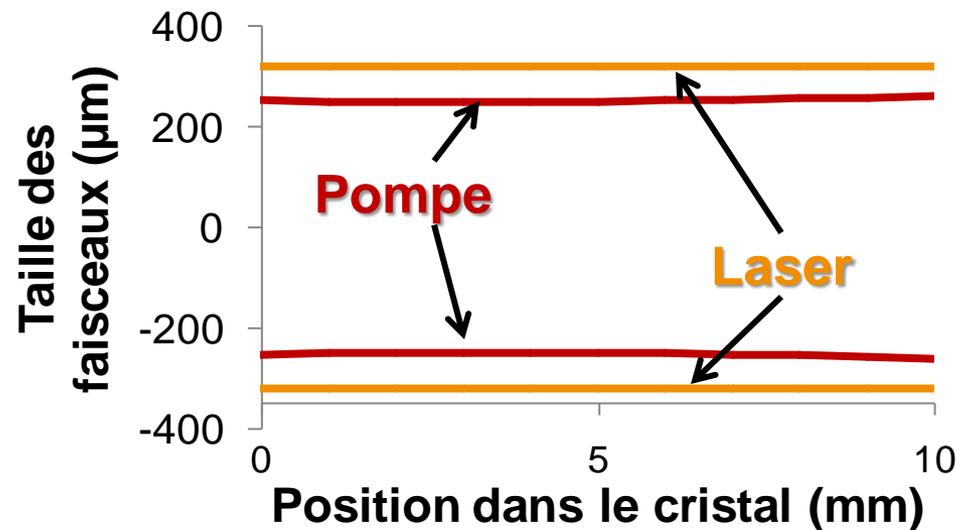
**Faible
échauffement**

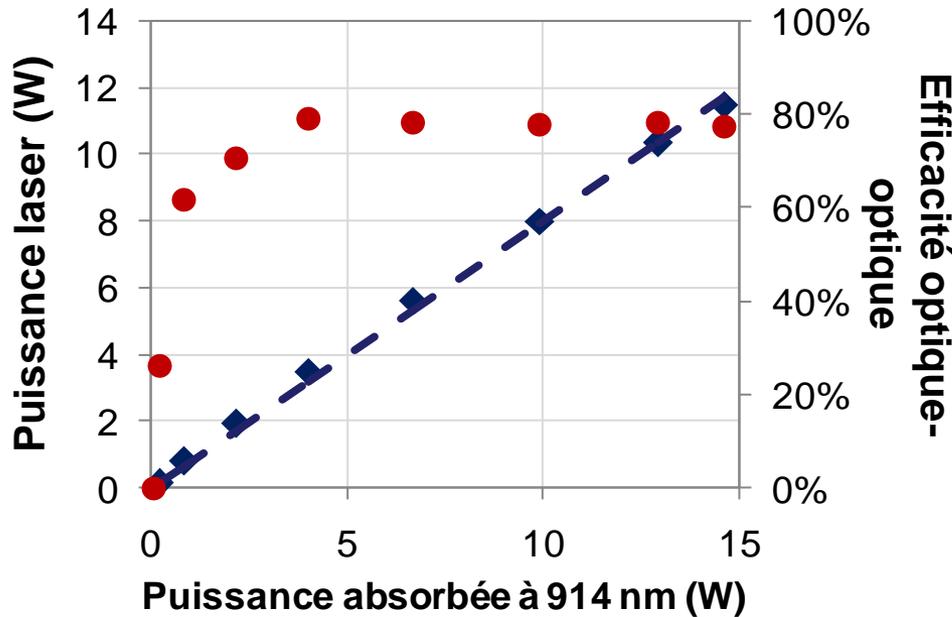
A 808 nm :
 $\Delta T > 80^\circ\text{C}$ pour 10 W absorbés



• Objectif avec cette cavité:

Favoriser le recouvrement
spatial « pompe/laser »
dans le cristal





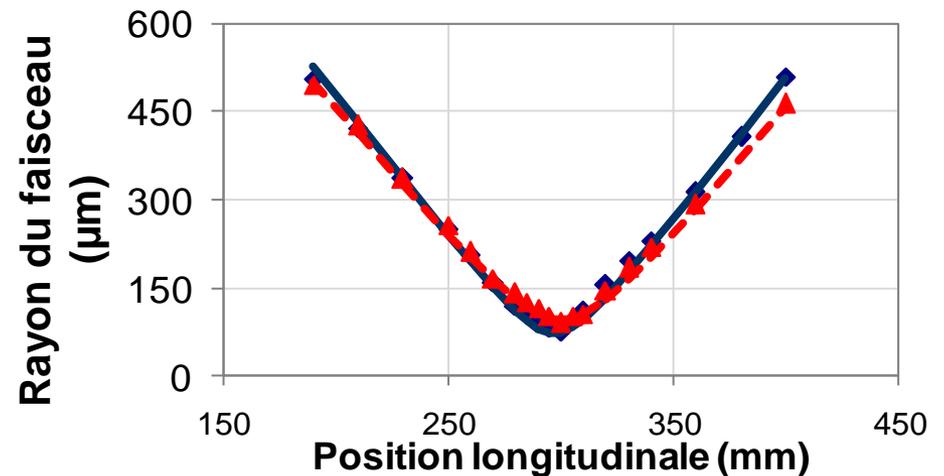
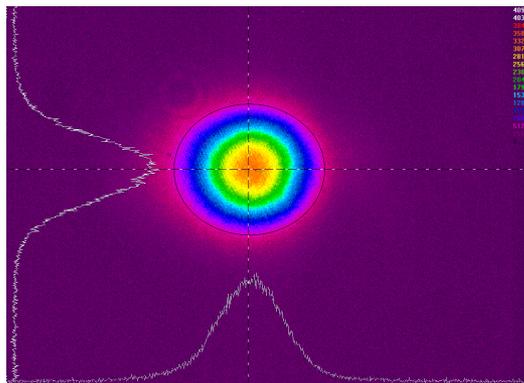
A température ambiante :

$P_{\text{max laser}} = 11.5 \text{ W @ } 1064 \text{ nm}$
 pour $14.6 \text{ W absorbés @ } 914 \text{ nm}$

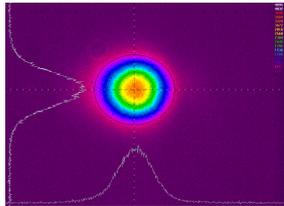
Pente d'efficacité = 80.7%
 ($\eta_Q = 85.9 \%$)

$M^2 < 1.2$

D. Sangla et al., Opt. Lett. **34**, 14, pp 2159 - 2161(2009)



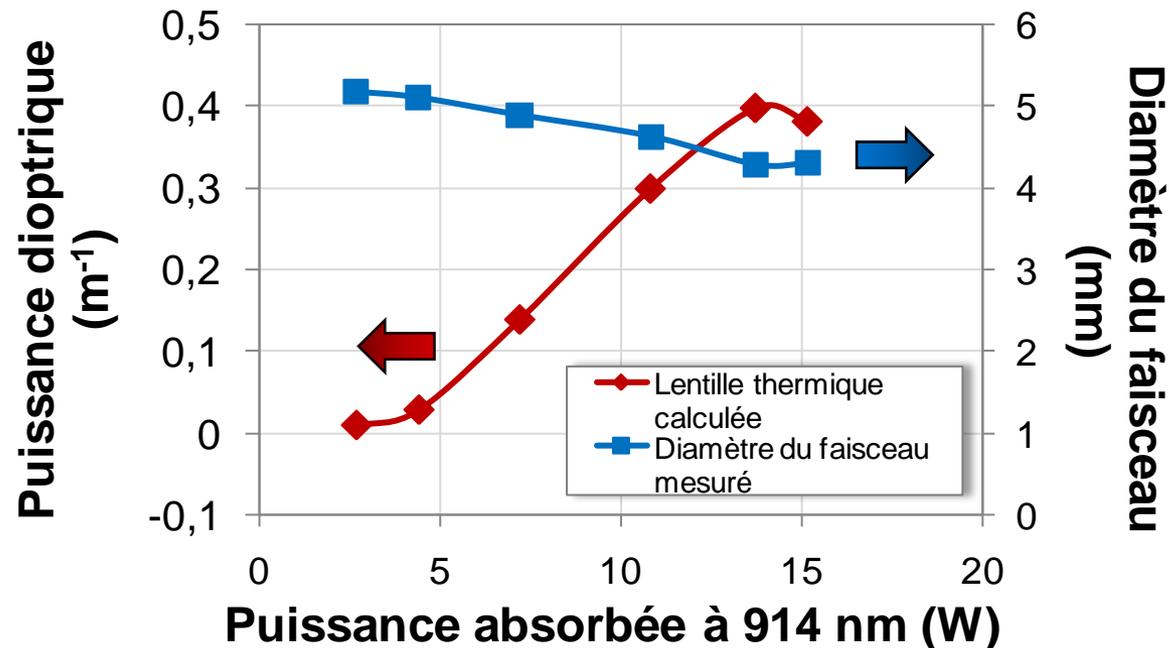
• Evaluation de la lentille thermique



Evolution de la taille du faisceau avec P_{pompe}

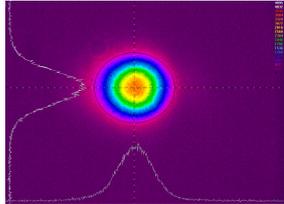
Calculs
(matrices ABCD)

Puissance dioptrique
(m^{-1})



➔ Lentille thermique très faible : $f_{\text{th}} > 2,5 \text{ m}$ ($D_{\text{th}} = 0,4 \text{ m}^{-1}$)

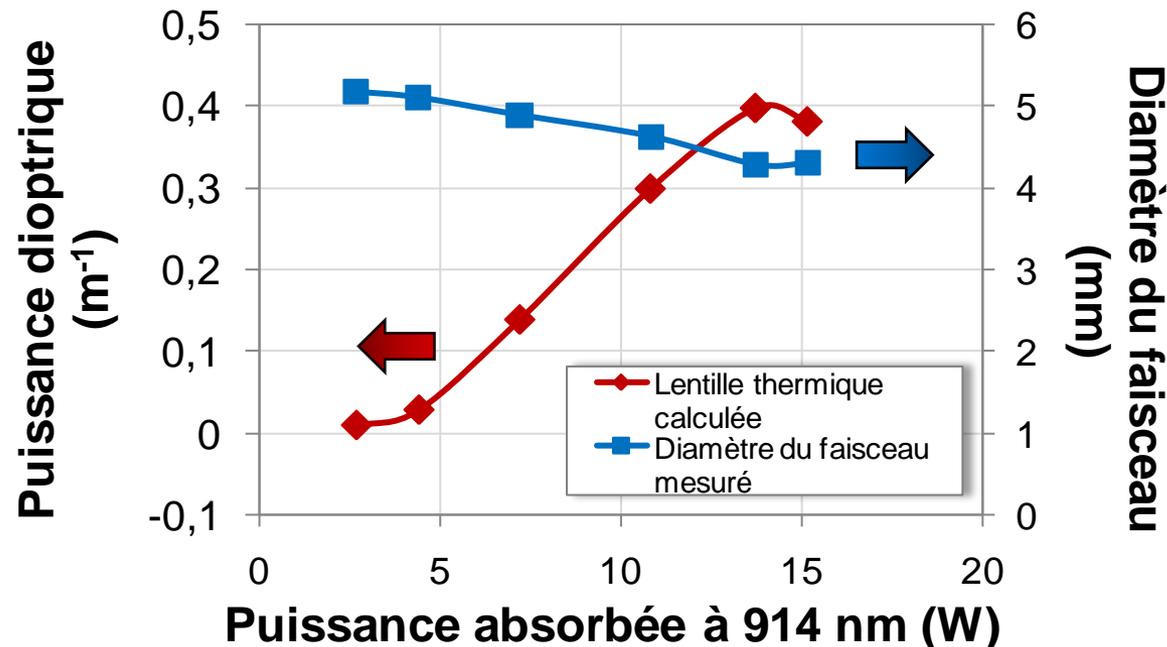
• Evaluation de la lentille thermique



Evolution de la taille du faisceau avec P_{pompe}

Calculs
(matrices ABCD)

Puissance dioptrique
(m^{-1})



➔ **Lentille thermique très faible : $f_{\text{th}} > 2,5 \text{ m}$ ($D_{\text{th}} = 0,4 \text{ m}^{-1}$)**

A 808 nm : $f_{\text{th}} \sim 100 \text{ mm}$ pour 15 W absorbés

Introduction

1. **Pompage direct de cristaux dopés Néodyme**

1.1 Principe du concept

1.2 Etude expérimentale du Nd:YVO₄ pompé à 914 nm

➔ 1.3 Conclusions et perspectives

2. Lasers à fibres cristallines dopées Ytterbium

Conclusion

Conclusions

- ✓ Premier laser **Nd:YVO₄** pompé par diode à **914 nm**
 - **11.5 W @ 1064 nm** pour **14.6 W** absorbés @ **914 nm**, **$M^2 < 1,2$**
 - **80.7 %** de pente d'efficacité (soit **~79 %** d'efficacité optique/optique)
- ✓ Très faible génération d'effets thermiques : **$1 - \eta_Q = 14 \%$**

Perspectives

- Amélioration de l'efficacité globale :
 - *Recyclage de la pompe, augmentation du produit {dopage*longueur}*
- Montée en puissance
- Applications aux régimes impulsionnels
- Etude du même concept avec d'autres cristaux dopés **Nd³⁺**

➡ Nd:YAG pompé @ 938 nm : D. Sangla et al., Opt. Exp., 17, 10091-10097 (2009)

Introduction

1. **Pompage direct de cristaux dopés Néodyme**
2. **Lasers à fibres cristallines dopées Ytterbium**



fibercryst



Conclusion

Introduction

1. Pompage direct de cristaux dopés Néodyme

2. Lasers à fibres cristallines dopées Ytterbium



2.1 Concept et élaboration de fibres cristallines

2.2 Dimensionnement du système

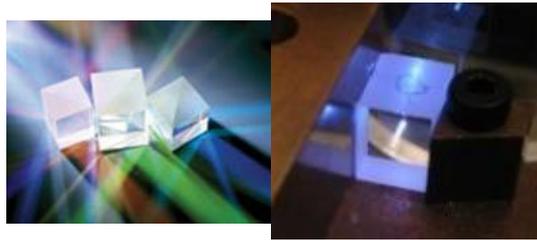
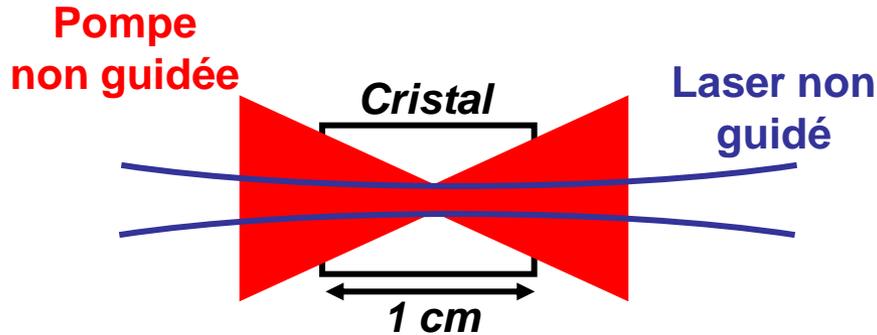
2.3 Caractérisations des fibres

2.4 Résultats lasers en régimes continu et déclenché

2.5 Conclusions et perspectives

Conclusion

Cristaux massifs

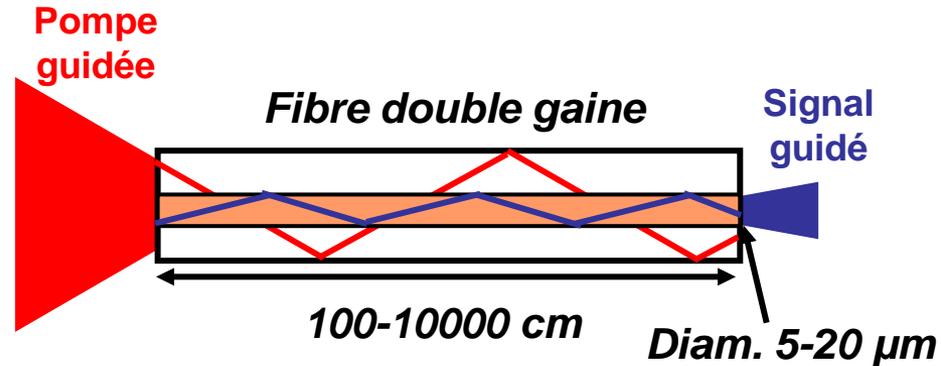


- 😊 - Forte énergie
- ☹️ - Effets thermiques à fort pompage

➔ **Performances limitées :**

- $P_{\text{moyenne}} \sim 10 \text{ W}$ en déclenché

Fibres de verre dopées

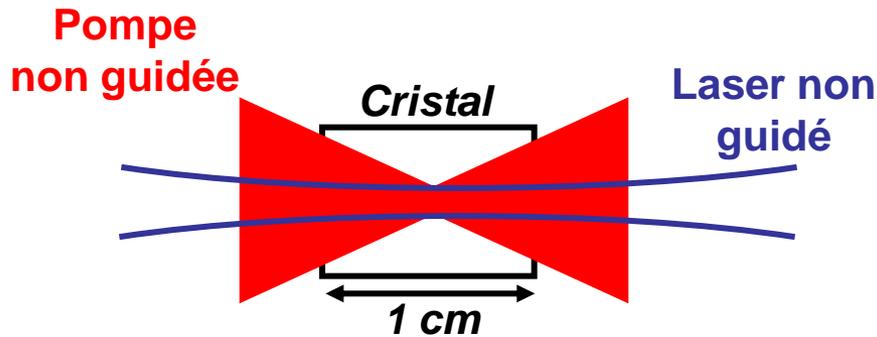


- Très performantes thermiquement 😊
- Confinement du signal ☹️

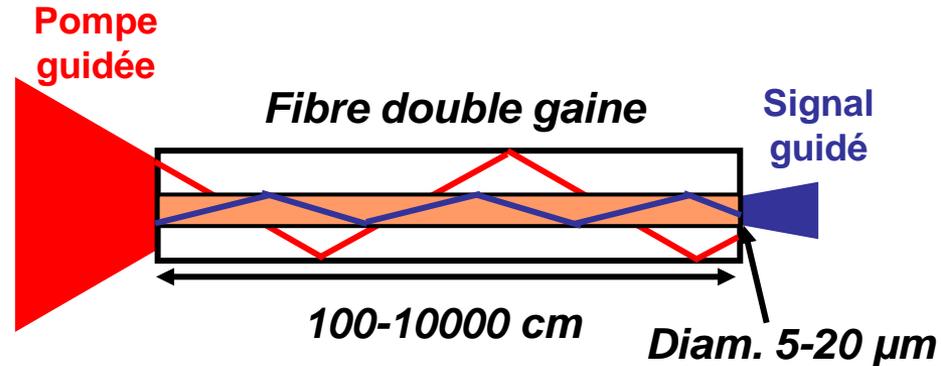
➔ **Effets non linéaires limitants :**

- *Energie* < 1 mJ
- $\Delta\tau > 150 \text{ ns}$

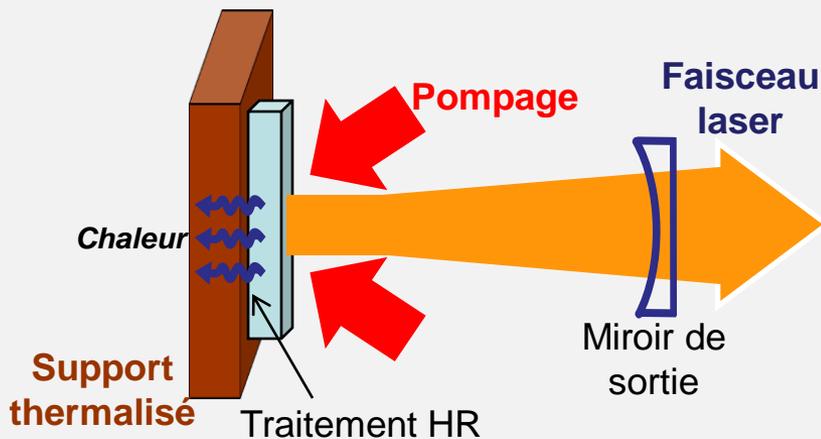
Cristaux massifs



Fibres de verre dopées



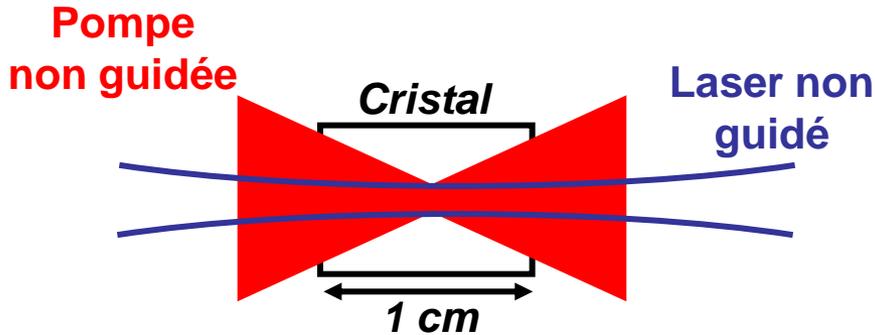
Disques minces



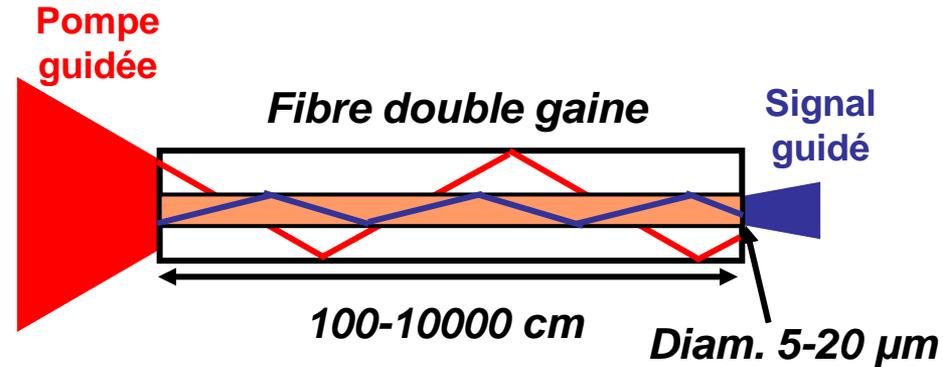
- Gestion thermique 😊
- Pompage complexe 😞
- Gain très limité 😞

➔ **Performances limitées :**
• $\Delta\tau \sim 300$ ns en déclenché

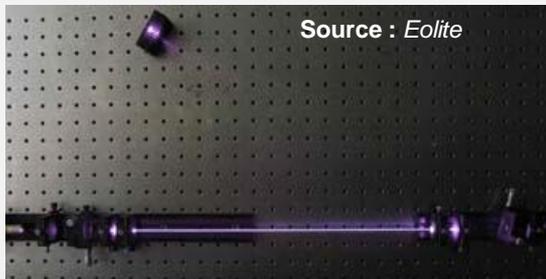
Cristaux massifs



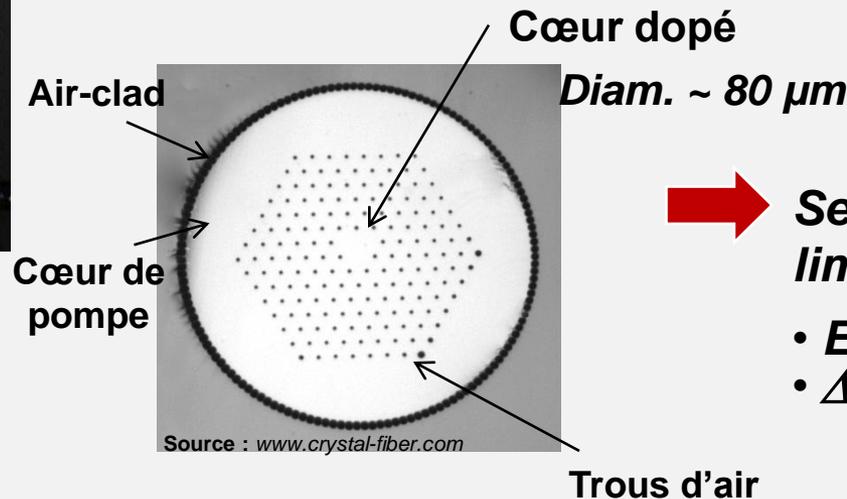
Fibres de verre dopées



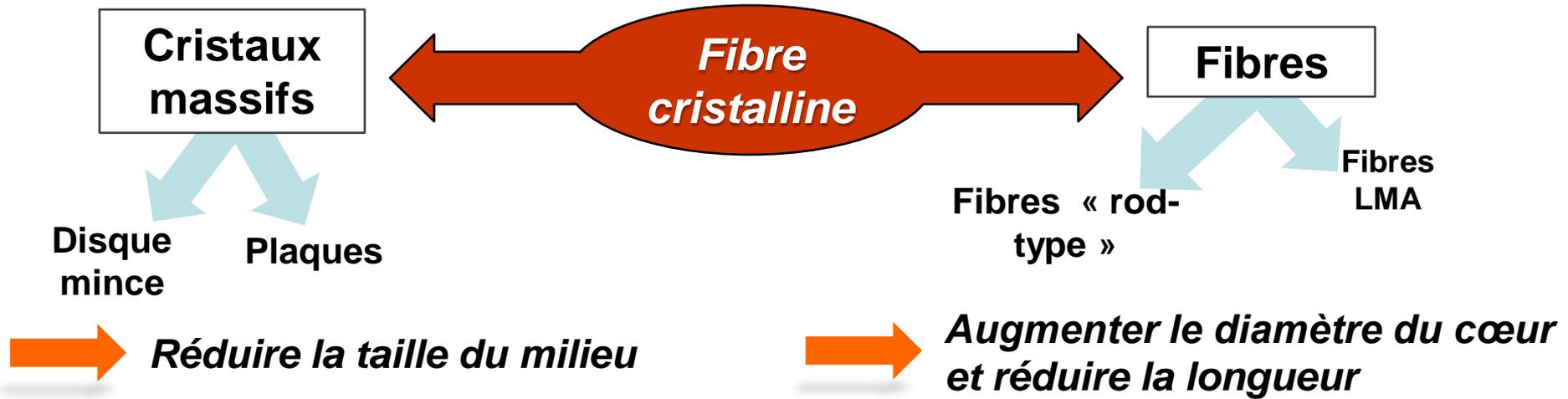
Fibres de type « barreau » (rod-type fiber)



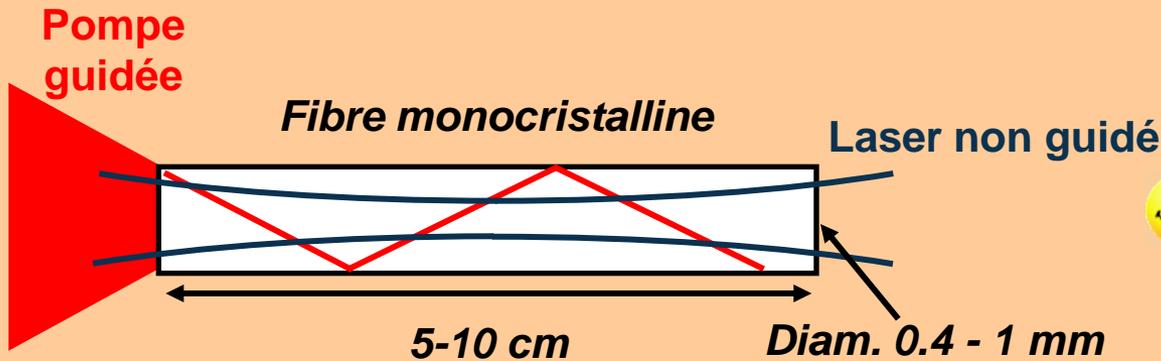
Longueur ~ 100 cm



- Seuils de dommage limitants :**
- **Energie < 2 mJ**
 - **$\Delta\tau > 7 \text{ ns}$**



Laser à fibre cristalline

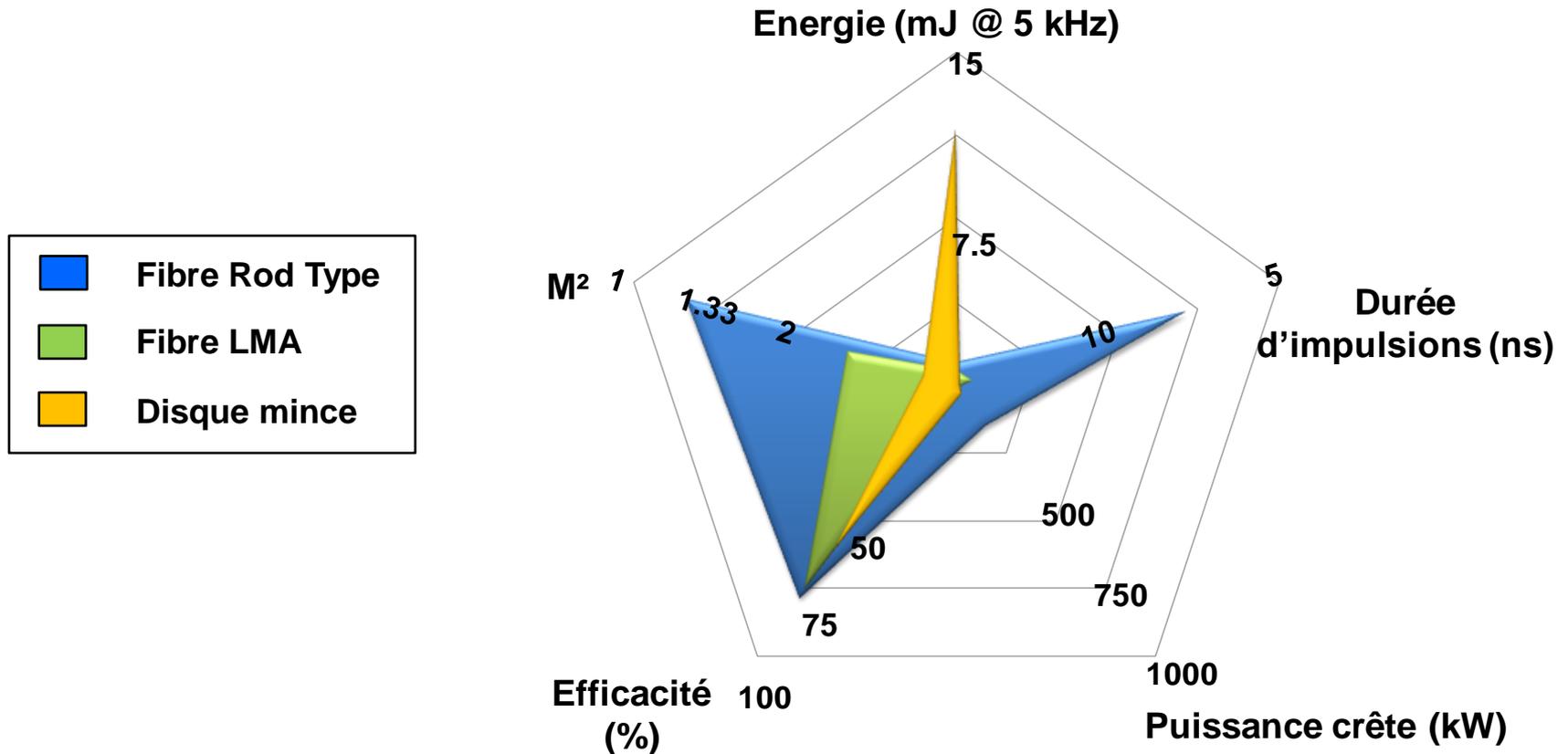


- Monocristal :
Bonnes K_c et $\sigma_{\text{émission}}$
- Confinement et guidage de la pompe
- Gestion de la thermique
- Mode transverse défini par la cavité



Brevet n° 0550900 (CNRS/Fibercryst)

Performances en régime déclenché :



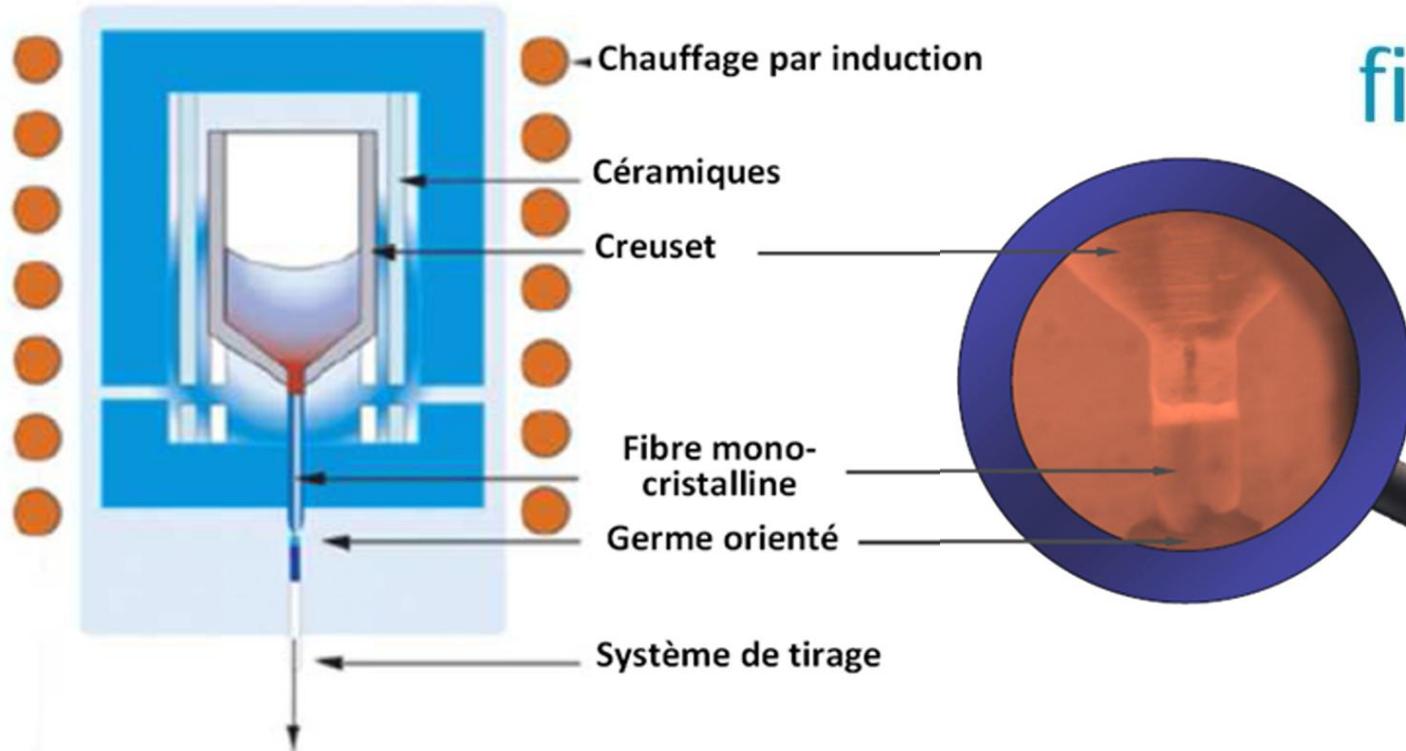
Objectifs :

Génération d'impulsions courtes, de forte énergie et de forte puissance crête.

Comment obtenir des fibres cristallines ?

Comment obtenir des fibres cristallines ?

La technique Micro-Pulling Down



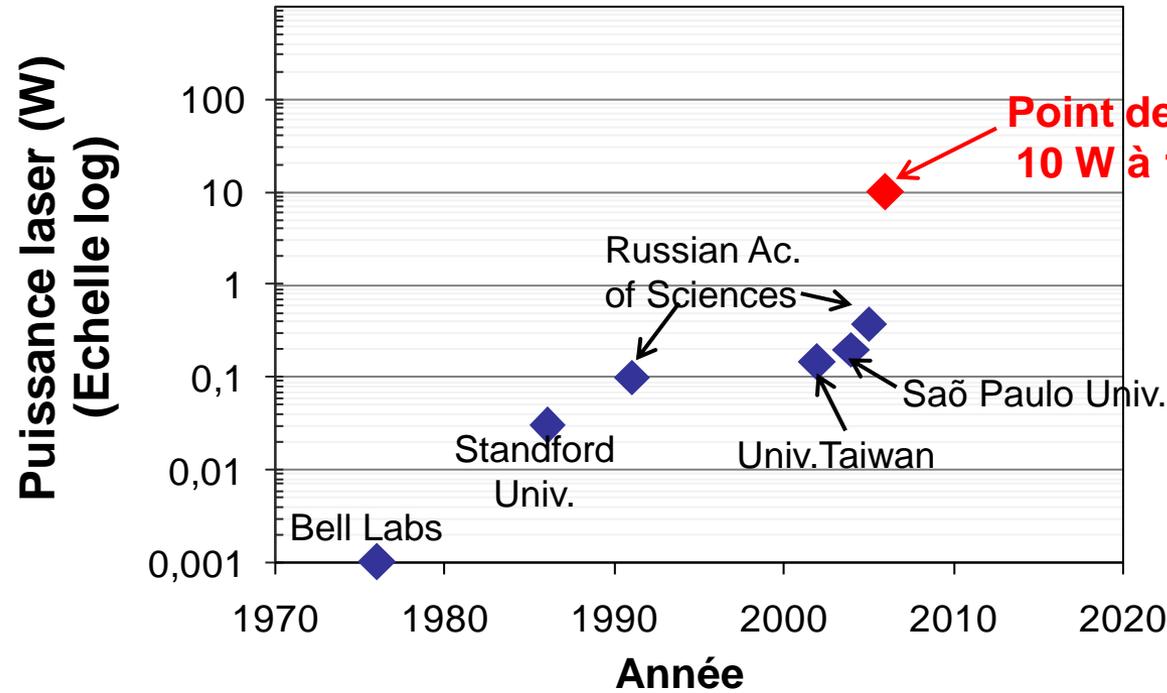
fibercryst

😊 **Pas de carottage ou polissage du cylindre nécessaire**
(≠ Méthode Czochralski)

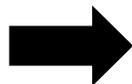
😊 **Fibres de bonne qualité cristalline et de faible diamètre**

Fibres cristallines dopées Nd³⁺

(obtenues par croissance directe et en régime continu)



Fibres cristallines Nd:YAG → J.DIDIERJEAN et al., Optics Letters, Vol. 31, N°23, 2006



Aucune étude laser sur des fibres dopées Ytterbium

Introduction

1. Pompage direct de cristaux dopés Néodyme

2. Lasers à fibres cristallines dopées Ytterbium

2.1 Concept et élaboration de fibres cristallines



2.2 Dimensionnement du système

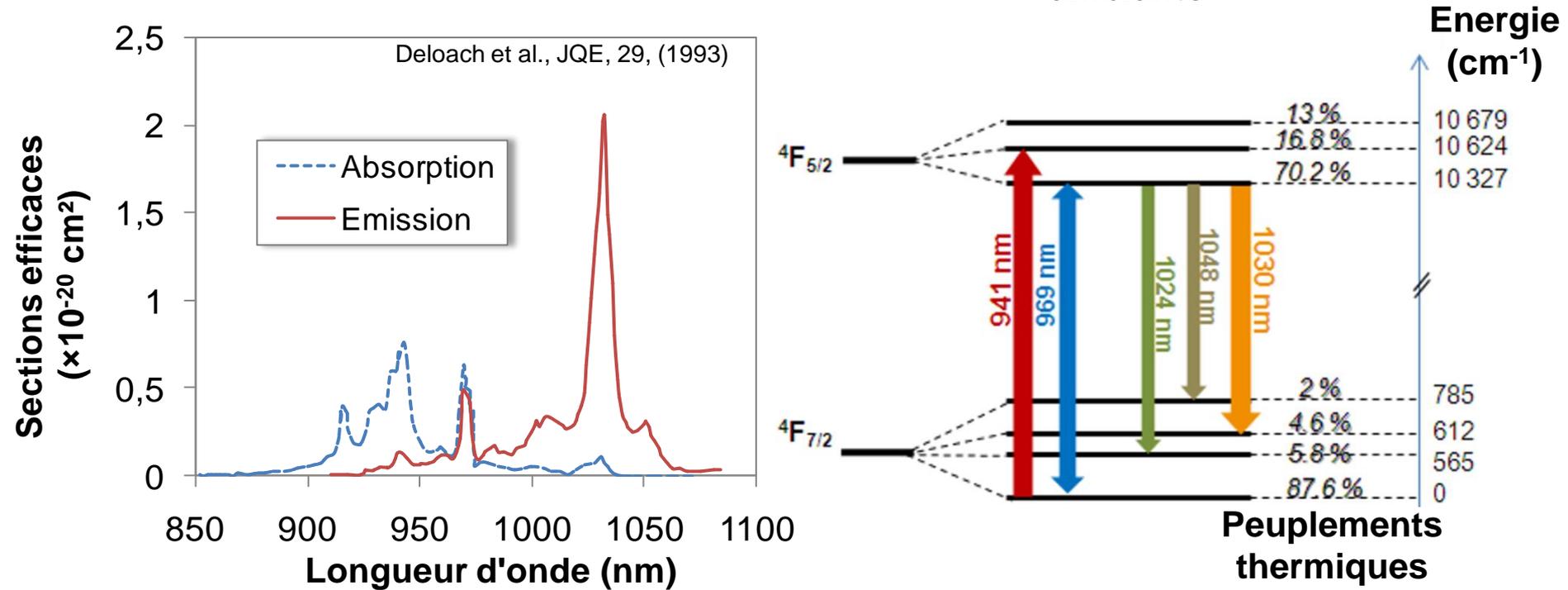
2.3 Caractérisations des fibres

2.4 Résultats lasers en régimes continu et déclenché

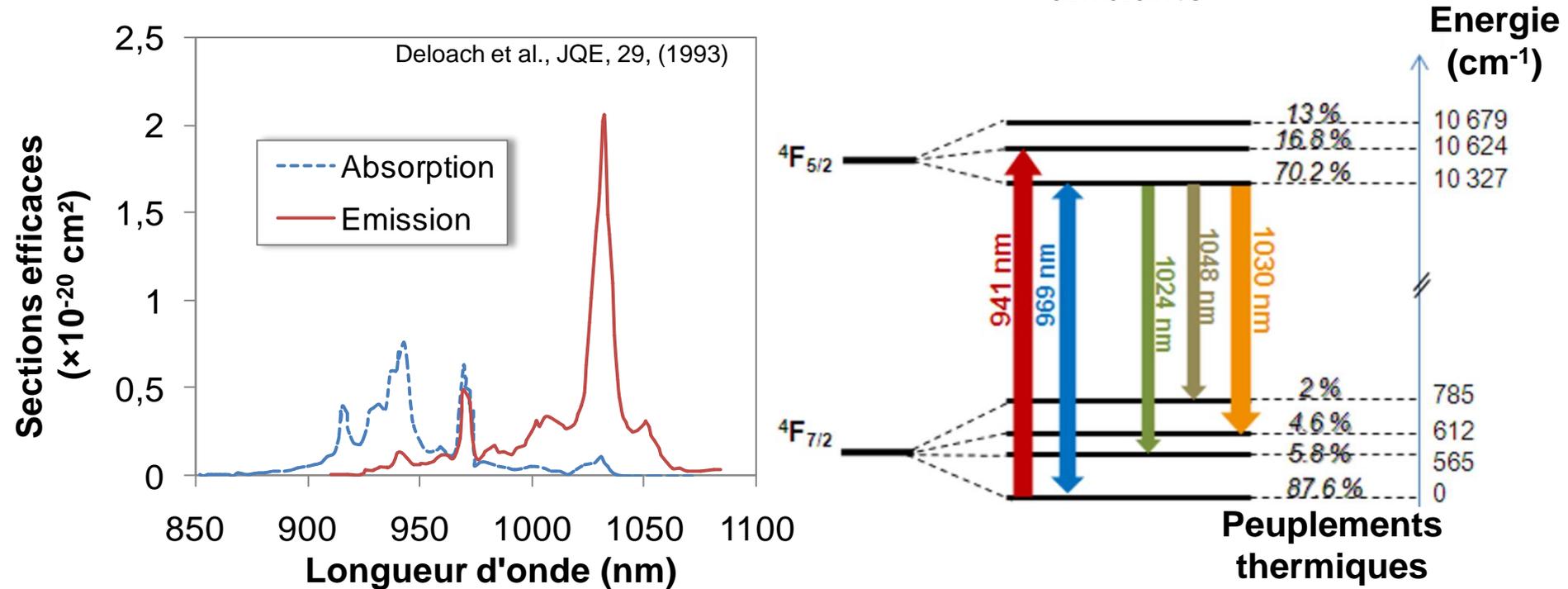
2.5 Conclusions et perspectives

Conclusion

Spectroscopie de l'Yb:YAG à T° ambiante :



Spectroscopie de l'Yb:YAG à T° ambiante :

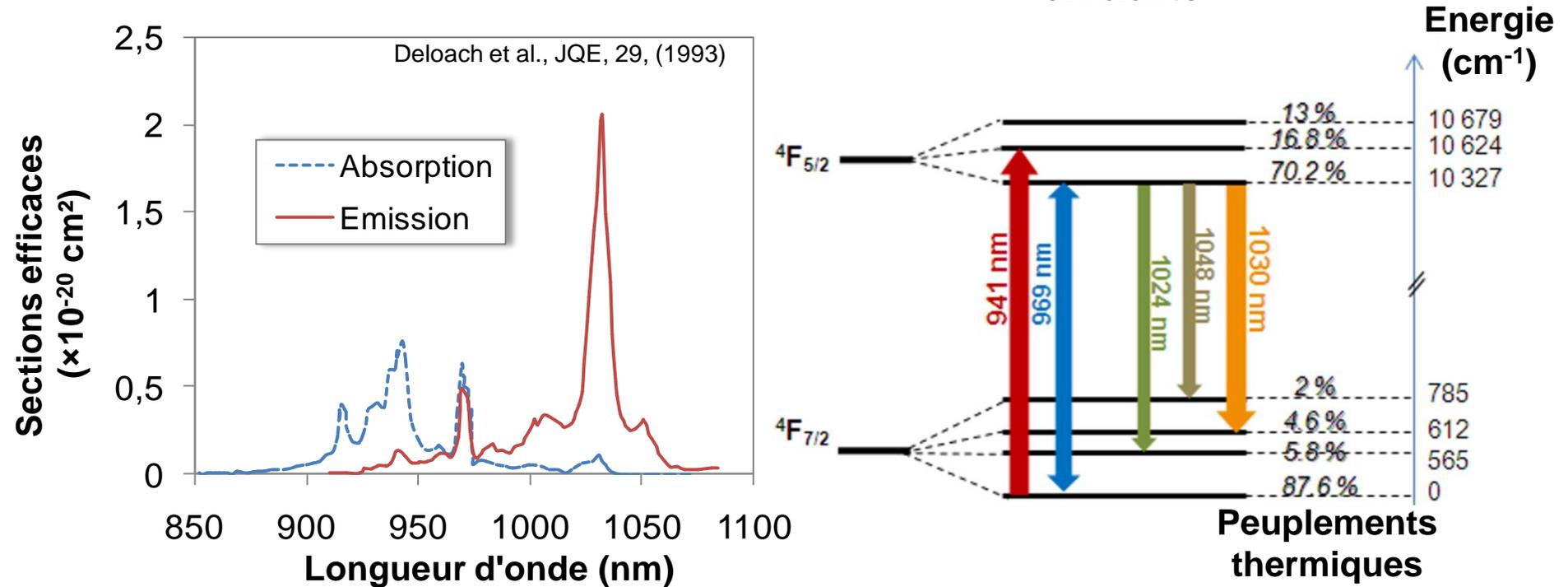


- Réabsorption à la longueur d'onde laser



Dimensionnement soigné

Spectroscopie de l'Yb:YAG à T° ambiante :



• Réabsorption à la longueur d'onde laser

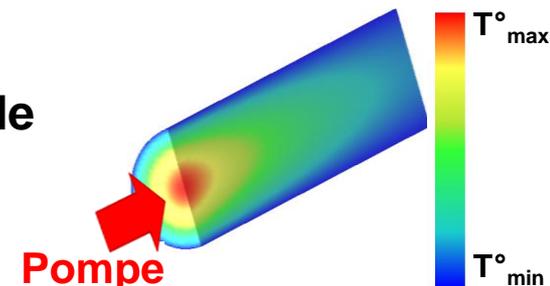


Dimensionnement soigné

• Forte dépendance à la température



Prise en compte de l'échauffement thermique



Démarche suivie :

- **Modélisations du milieu laser (Yb:YAG)**
→ Propriétés spectroscopiques et thermiques
- **Modélisations du système laser**
→ Propriétés géométriques des faisceaux de pompe et laser
- **Validation expérimentale du modèle**

*Ajustements
successifs*



• **Spécifications du milieu laser et du système**

Fibre cristalline

Diamètre = ?, Longueur = ?
Taux de dopage = ?

Système global

Système de pompe ?
Géométrie des faisceaux ?

- Favoriser un milieu ayant un gain le plus important

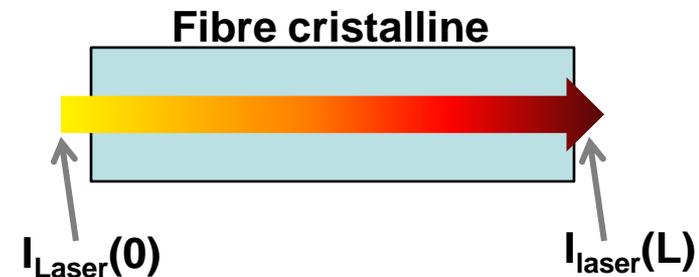
➔ Définition d'un module *de gain (module amplificateur)*

➔ Optimisation du régime impulsionnel (durée d'impulsions)

Choix du critère d'optimisation :

$$G_0 = \frac{I_{\text{Laser}}(L)}{I_{\text{Laser}}(0)}$$

$$= \text{Exp} \left[\int_{\text{Fibre cristalline}} g_{01} \cdot f(W_{\text{Laser}}, W_{\text{pompe}}) \right]$$



- Favoriser un milieu ayant un gain le plus important

➔ Définition d'un module *de gain (module amplificateur)*

➔ Optimisation du régime impulsionnel (durée d'impulsions)

Choix du critère d'optimisation :

$$G_0 = \frac{I_{\text{Laser}}(L)}{I_{\text{Laser}}(0)}$$

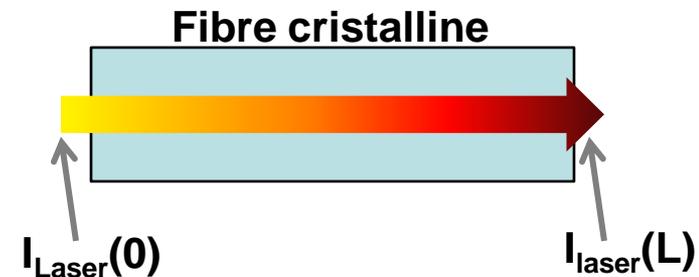
$$= \text{Exp} \left[\int_{\text{Fibre cristalline}} g_{0L} \cdot f(W_{\text{Laser}}, W_{\text{pompe}}) \right]$$

Fibre
cristalline

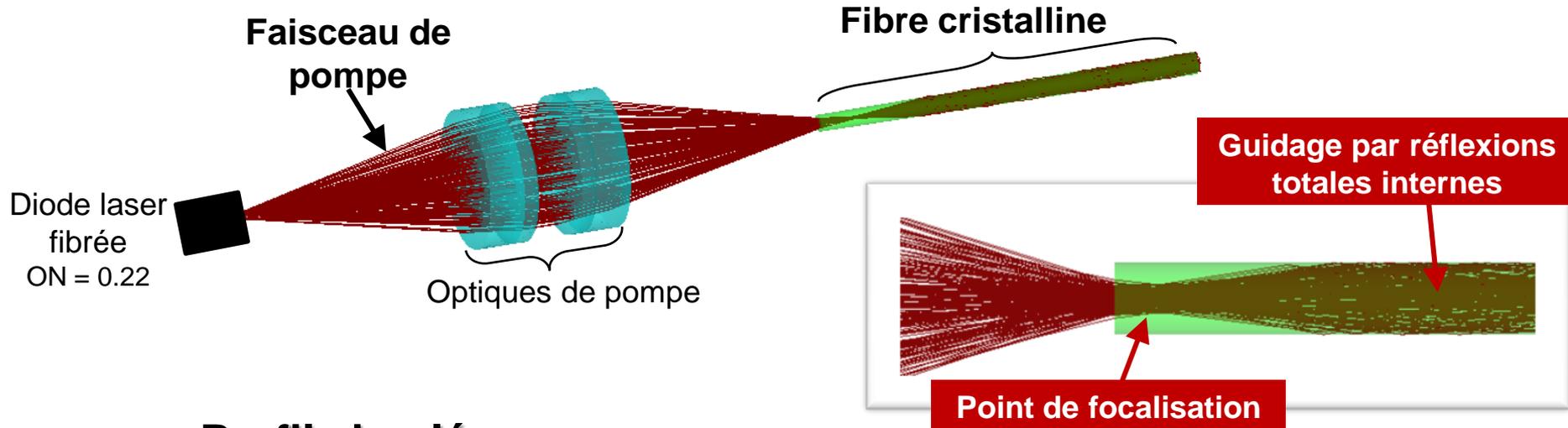
g_{0L} le gain linéique (cm^{-1})

$$g_{0L} = \sigma_{\text{EmL}} \cdot N_2 - \sigma_{\text{AbsL}} \cdot N_1$$

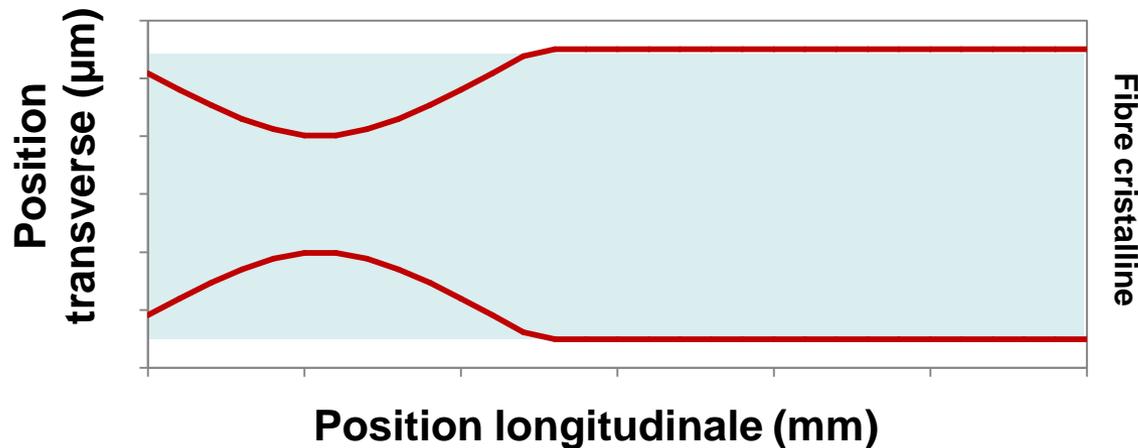
Fonction de recouvrement
des faisceaux de pompe
et laser



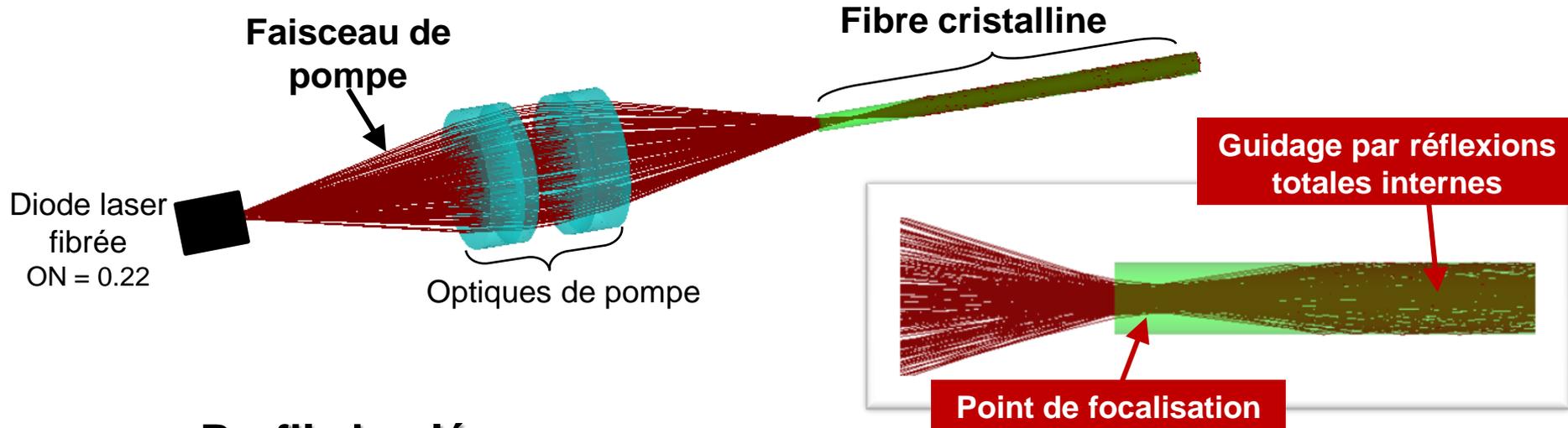
- **Propagation réelle** (*simulation sous Apilux*)



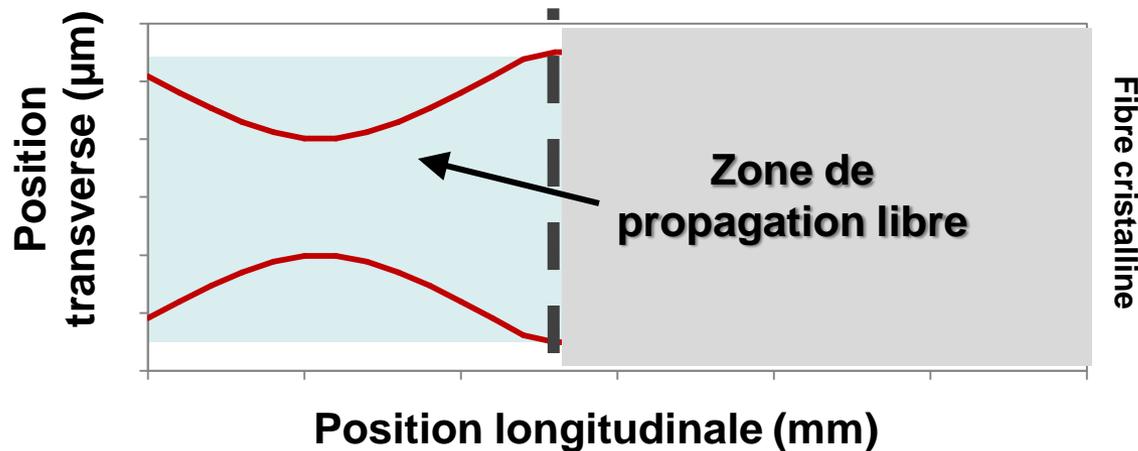
Profil simulé :



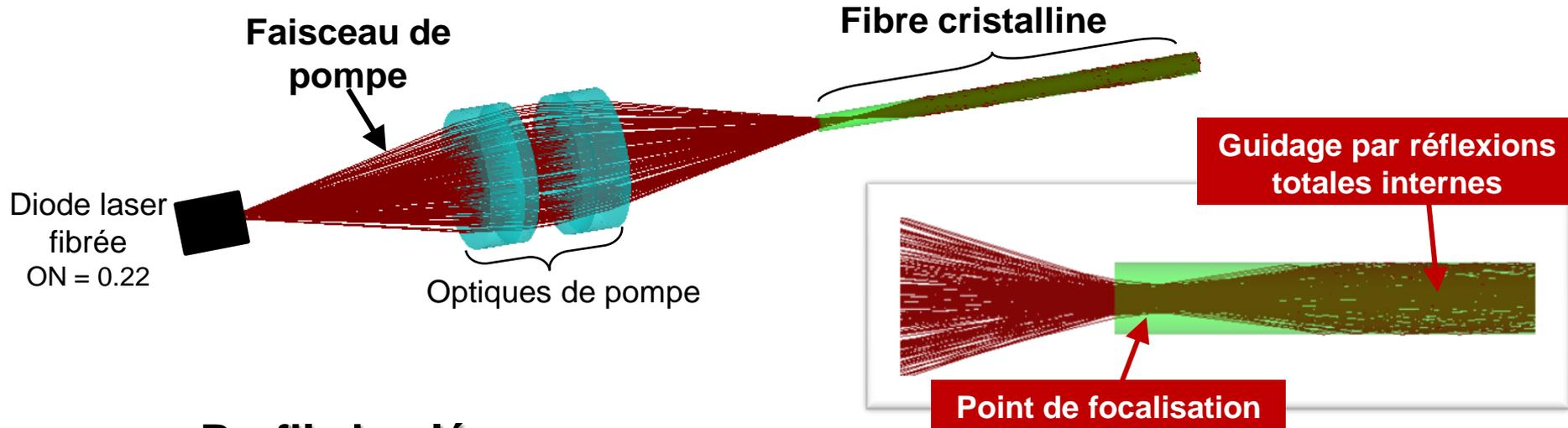
- **Propagation réelle** (*simulation sous Apilux*)



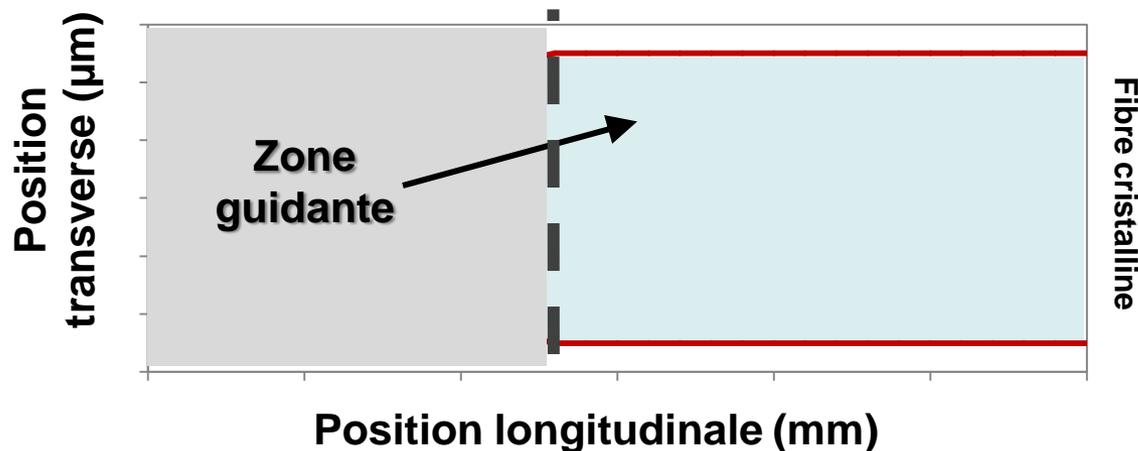
Profil simulé :



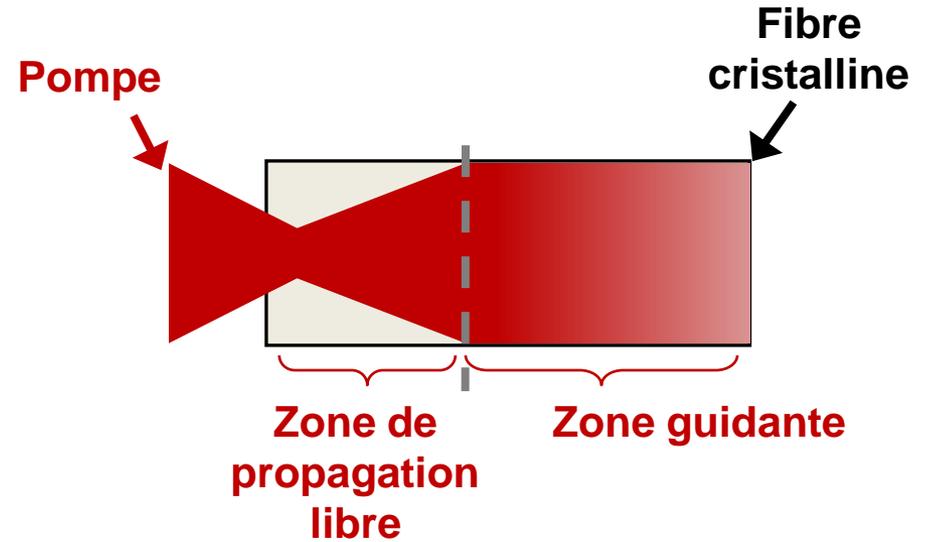
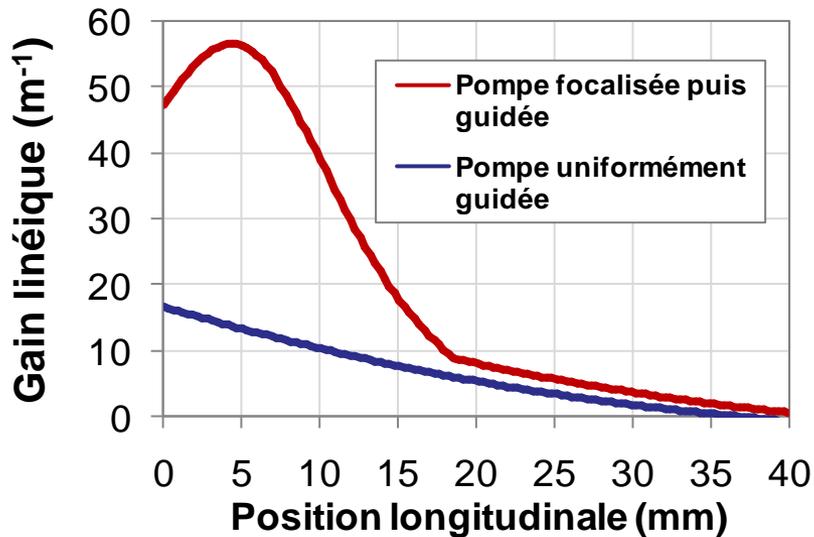
- **Propagation réelle** (*simulation sous Apilux*)



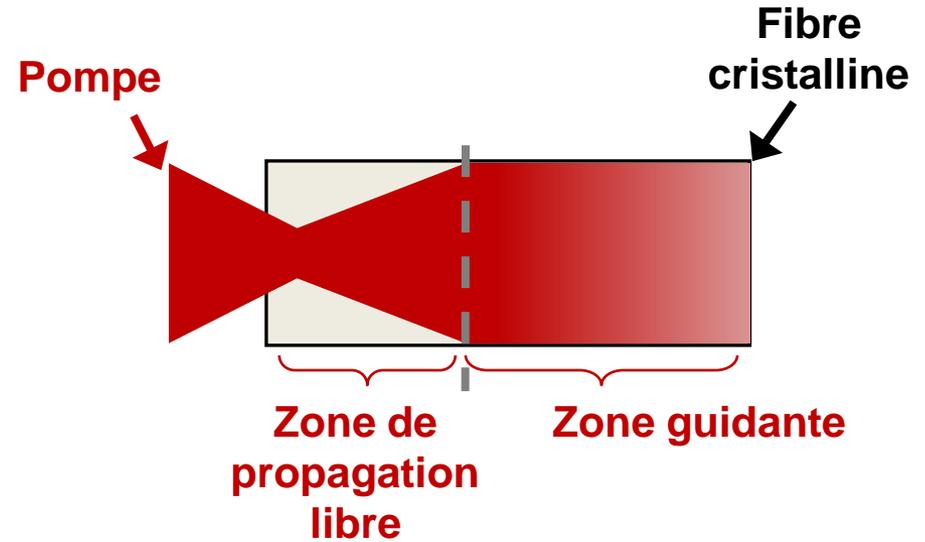
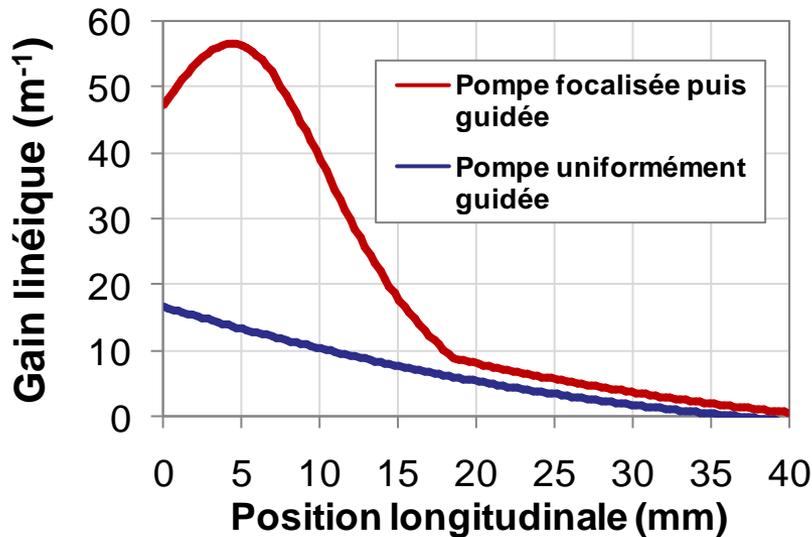
Profil simulé :



Sur le gain linéique :



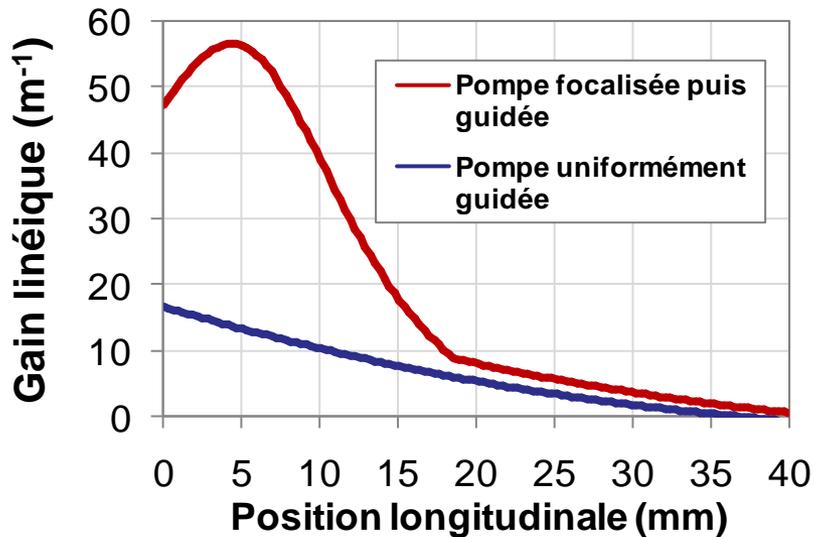
Sur le gain linéique :



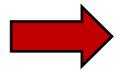
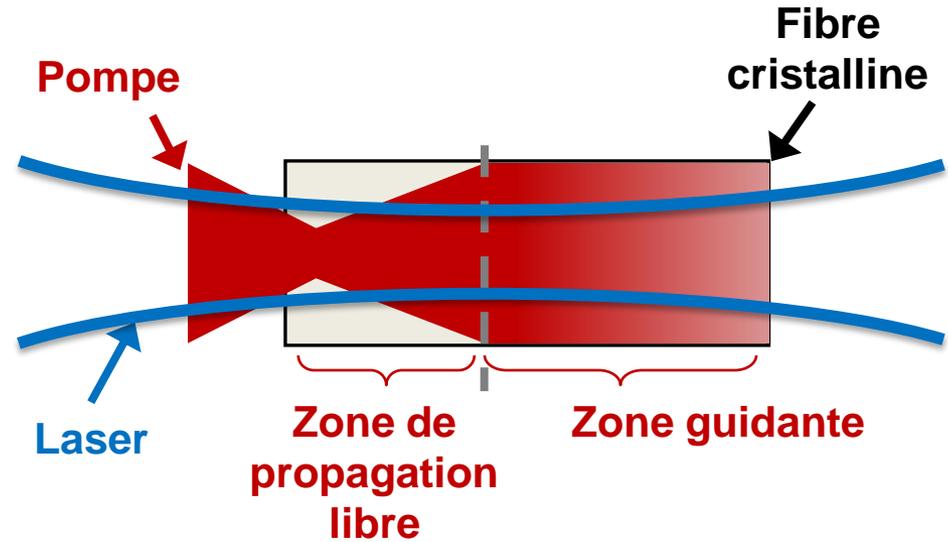
 **Brevet : PCT/FR2009/051973**

fibercryst

Sur le gain linéique :



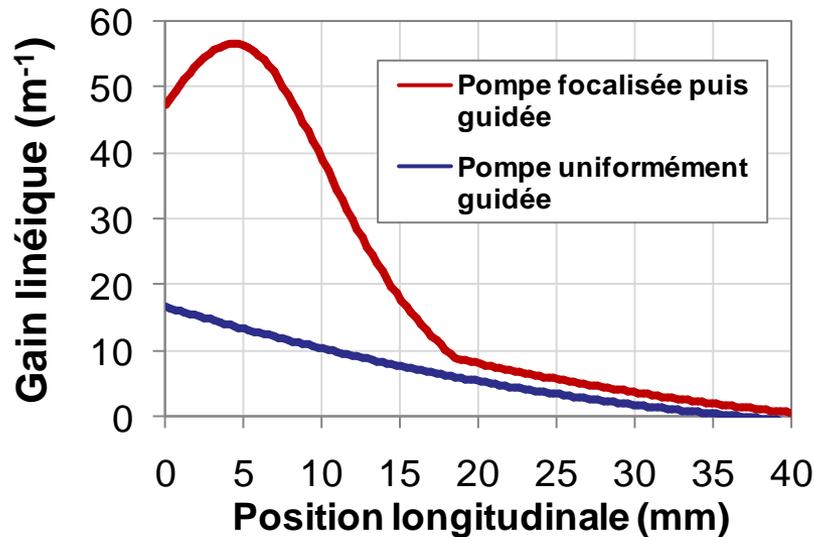
Sur la qualité spatiale :



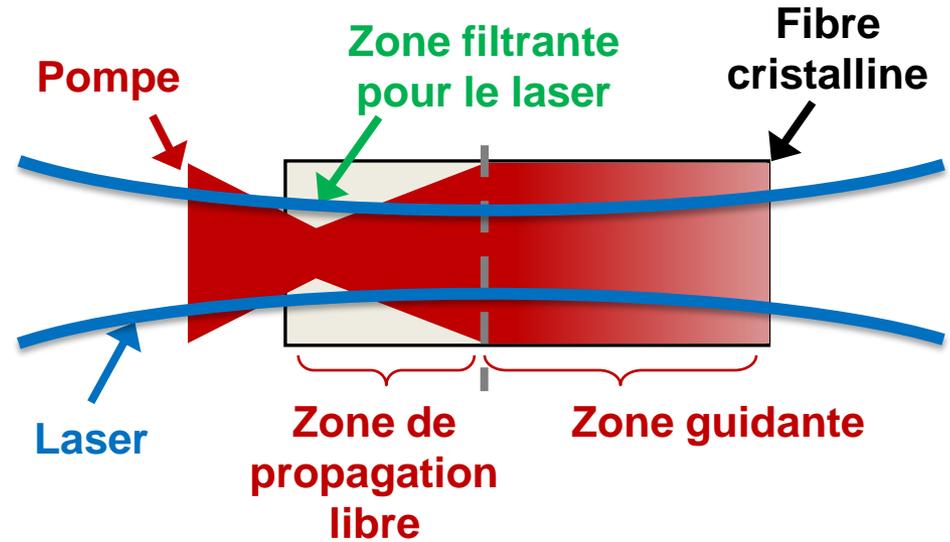
Brevet : PCT/FR2009/051973

fibercryst

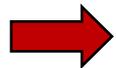
Sur le gain linéique :



Sur la qualité spatiale :



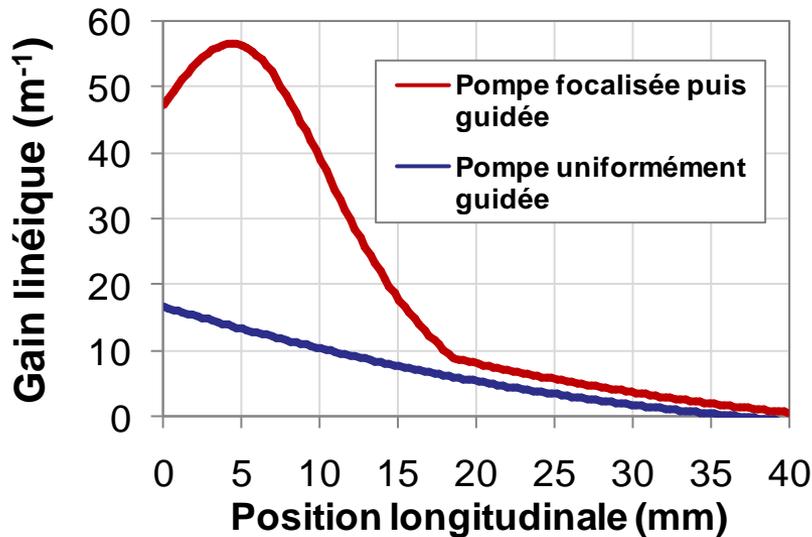
« **Soft aperture** » (*Diaphragme progressif*)
T. Y. Fan, Opt. Lett., 19, (8) pp 554-556, 1994.



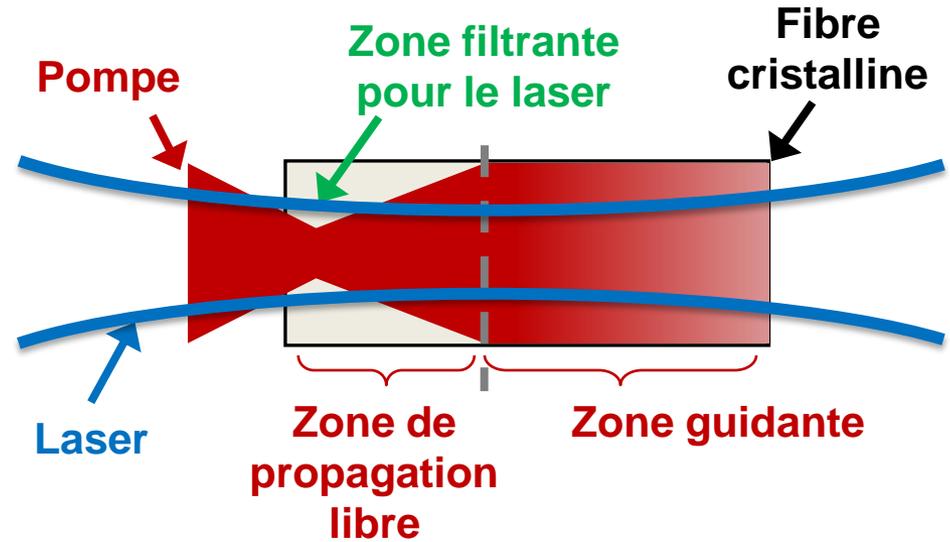
Brevet : PCT/FR2009/051973

fibercryst

Sur le gain linéique :



Sur la qualité spatiale :



« *Soft aperture* » (*Diaphragme progressif*)
T. Y. Fan, Opt. Lett., 19, (8) pp 554-556, 1994.

➔ Brevet : PCT/FR2009/051973

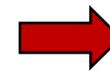
fibercryst

➔ **Choix du système de pompe :**
Luminance la plus importante possible

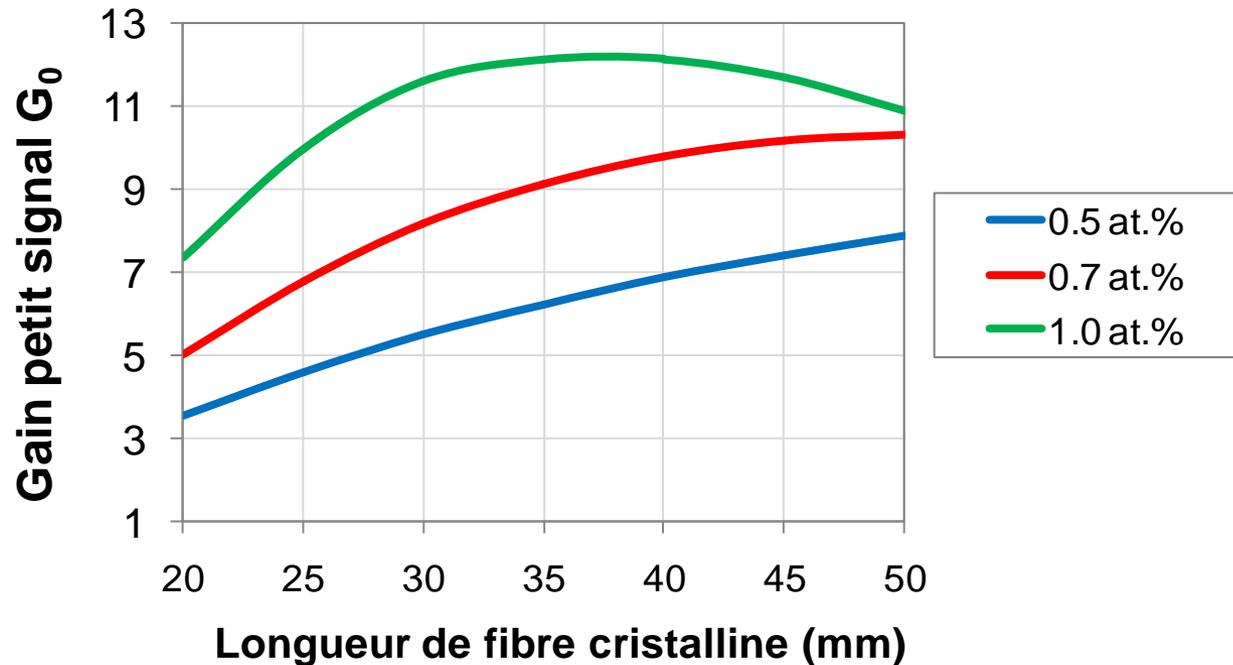
Puissance : 200 W
Diode fibrée : 200 μm
ON = 0.22

Point de départ :

- Puissance de pompe : 200 W
- Diamètre de 1 mm
- Taux de dopage max : 1 at.%



Choix de la longueur et
du taux de dopage

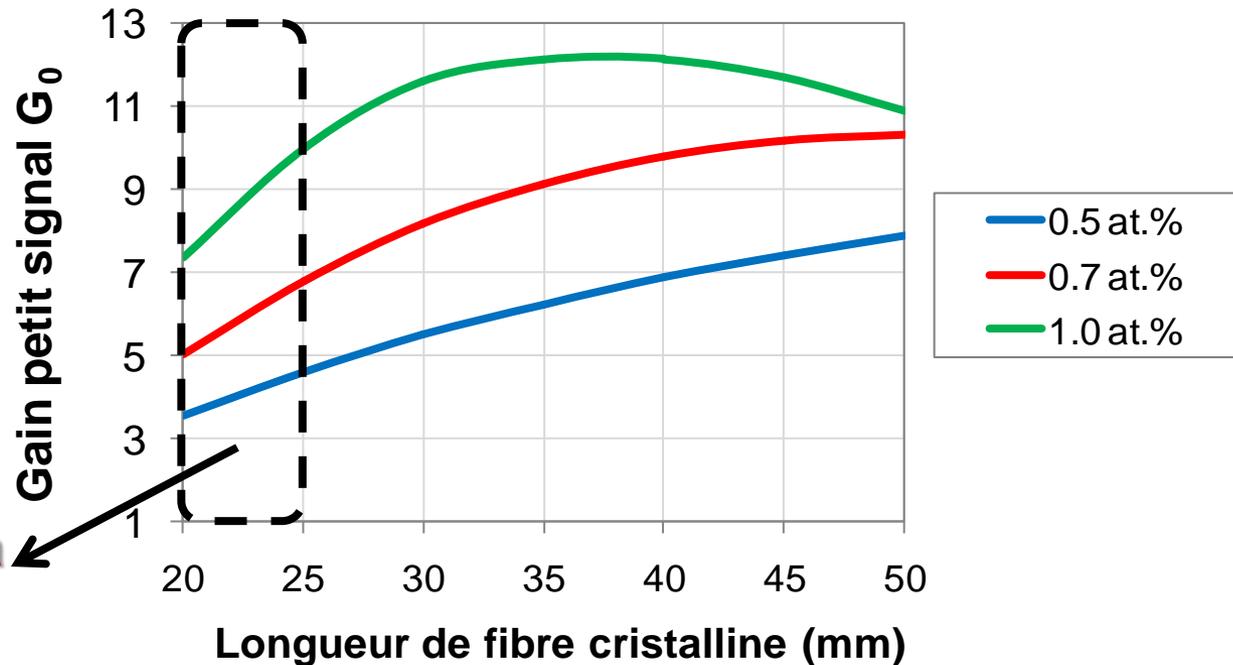


Point de départ :

- Puissance de pompe : 200 W
- Diamètre de 1 mm
- Taux de dopage max : 1 at.%



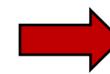
Choix de la longueur et
du taux de dopage



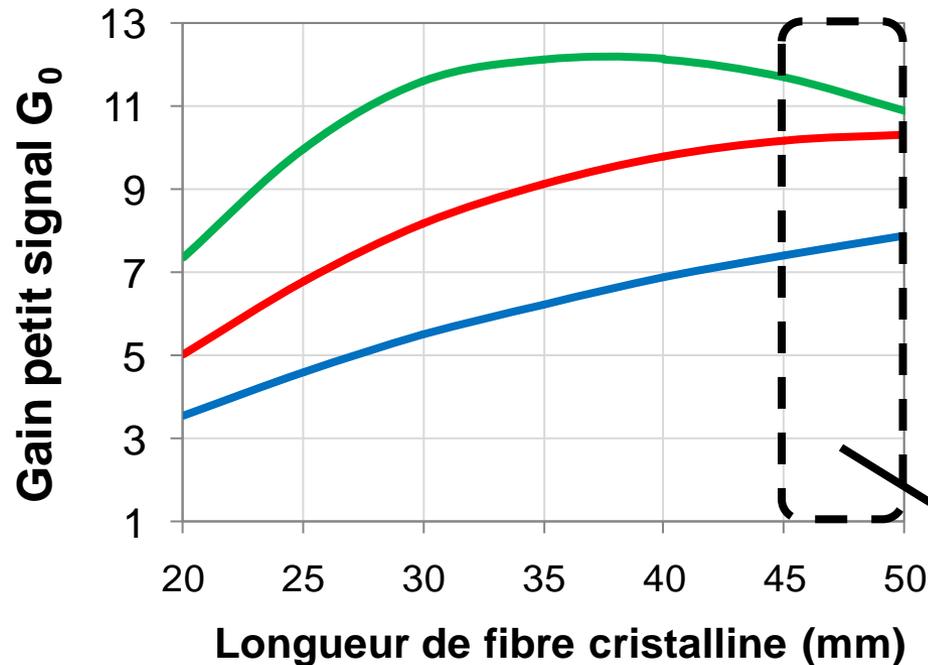
Absorption de la pompe limitée

Point de départ :

- Puissance de pompe : 200 W
- Diamètre de 1 mm
- Taux de dopage max : 1 at.%



Choix de la longueur et
du taux de dopage



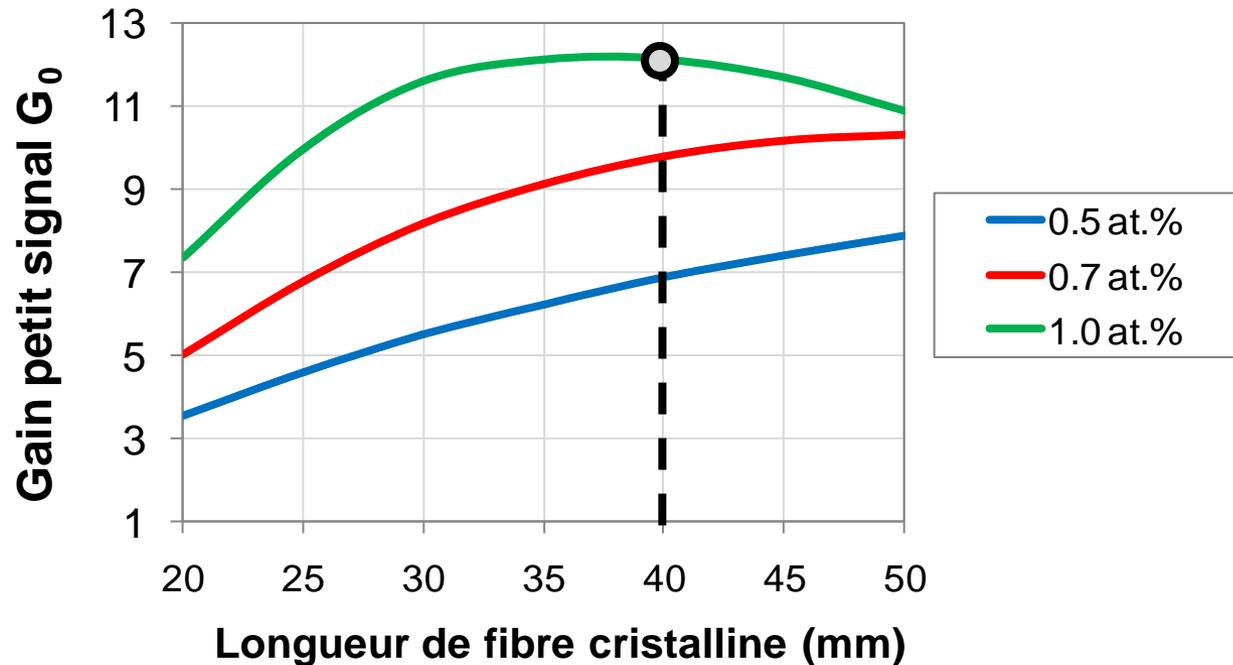
**Réabsorption
à la longueur
d'onde laser**

Point de départ :

- Puissance de pompe : 200 W
- Diamètre de 1 mm
- Taux de dopage max : 1 at.%

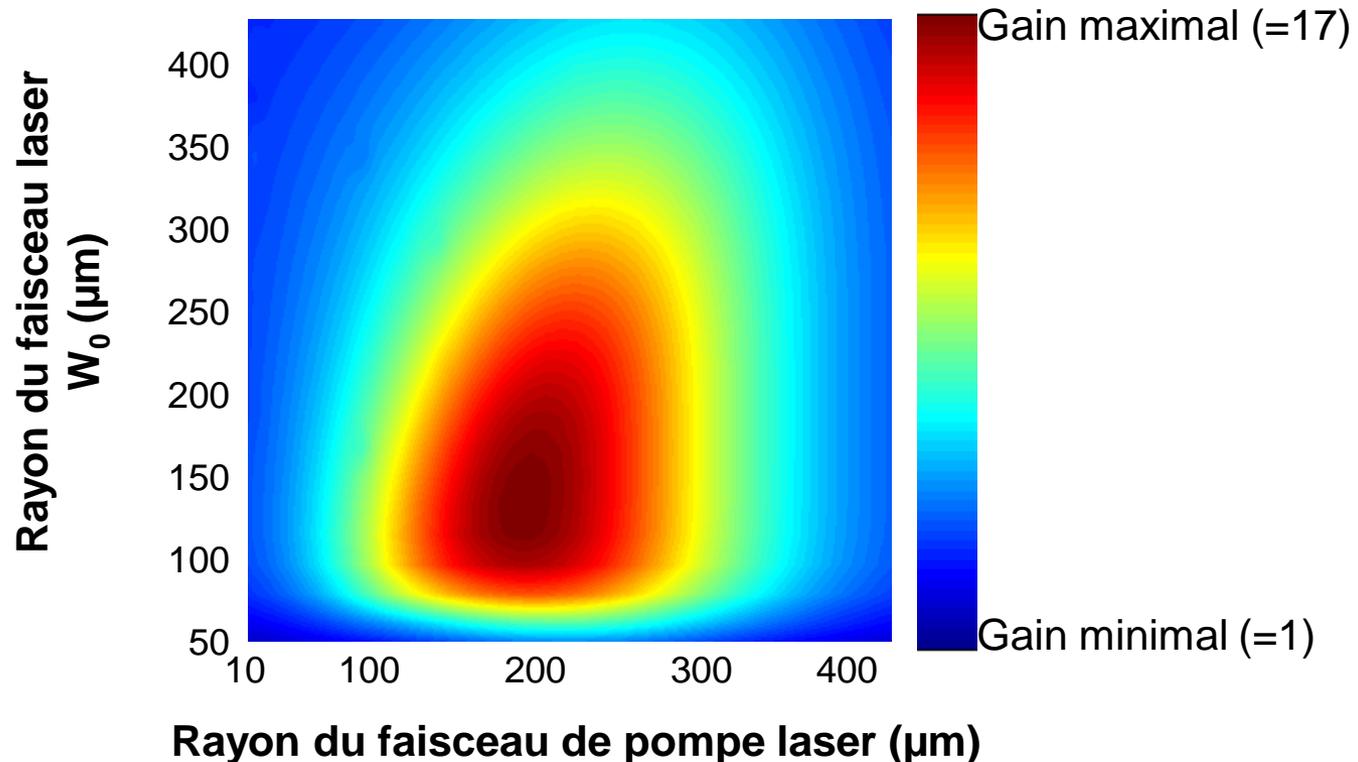


Choix de la longueur et
du taux de dopage



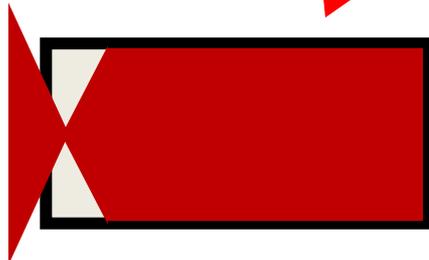
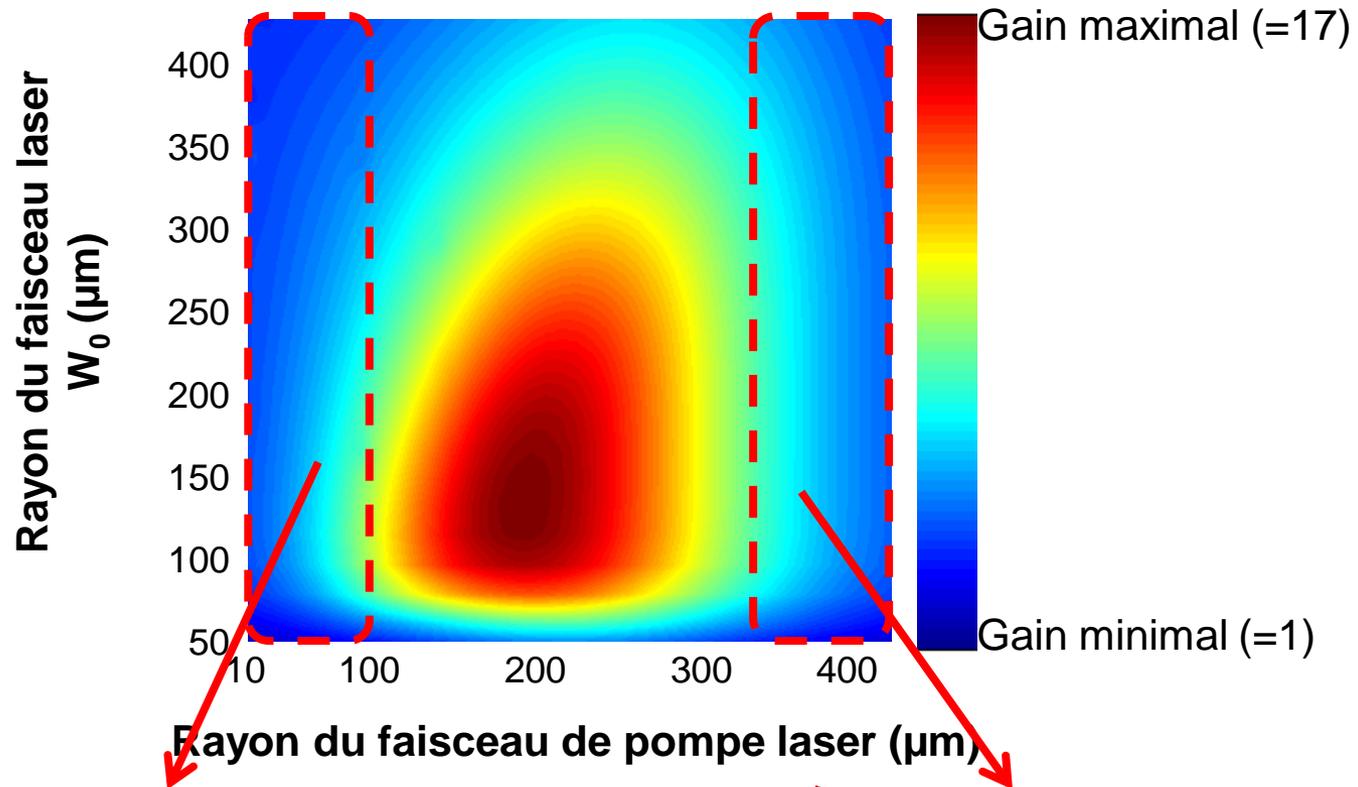
$L = 40$ mm, Taux de dopage = 1 at.%

- Optimisation du gain petit signal $G_0 \longrightarrow W_P, W_L$

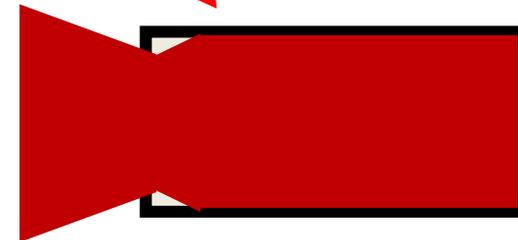


Puissance de pompe : 200 W
Diamètre = 1 mm, Longueur = 40 mm
Dopage = 1 at.%

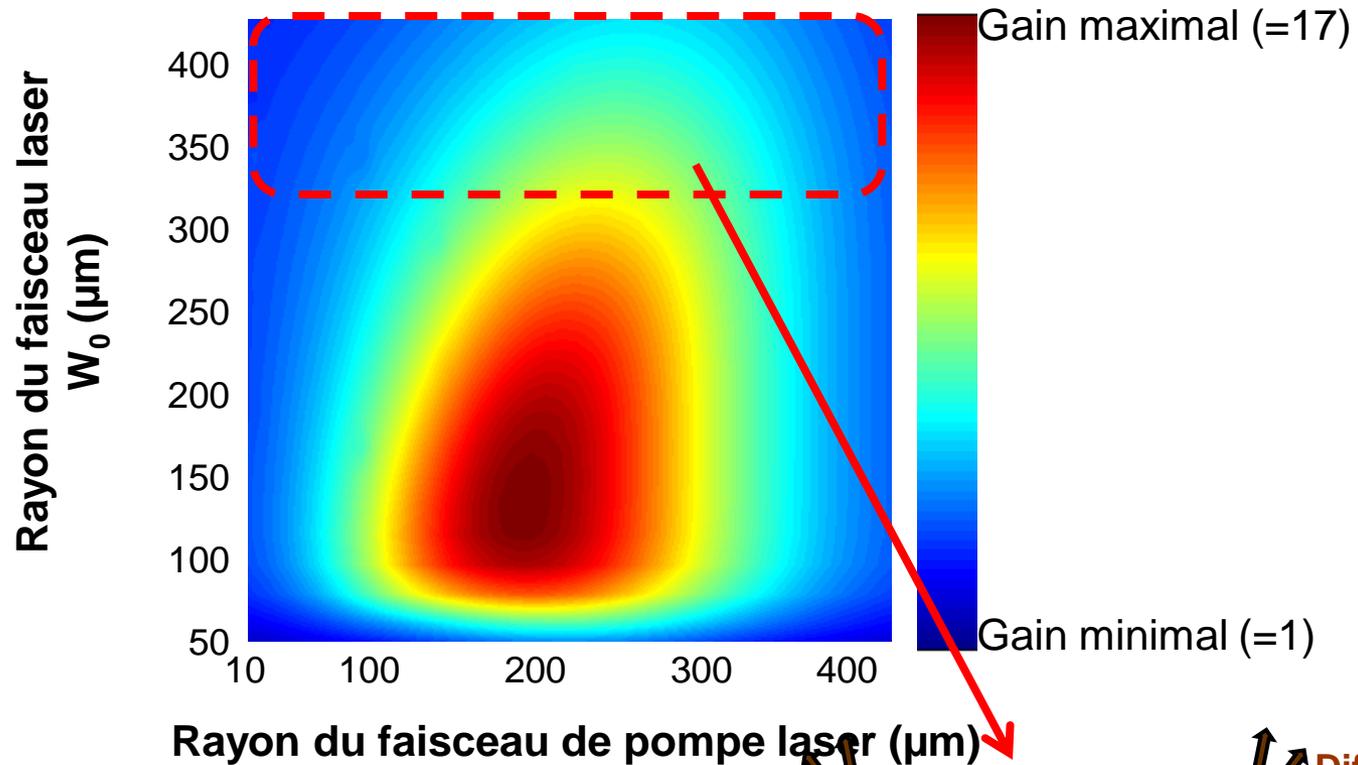
- Optimisation du gain petit signal $G_0 \longrightarrow W_P, W_L$



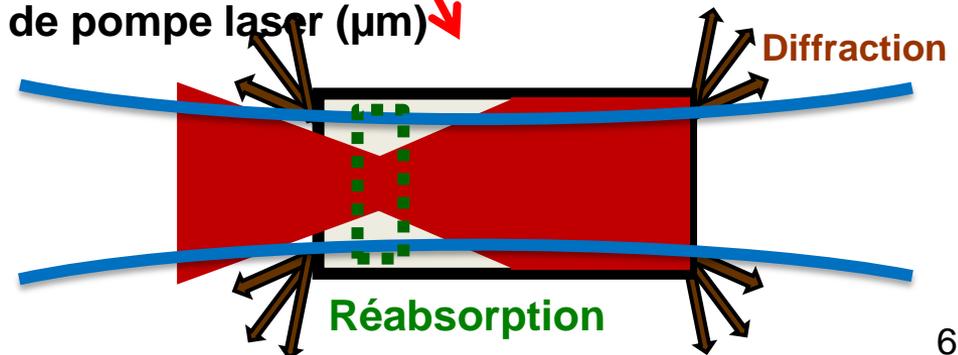
Zone de propagation libre trop courte



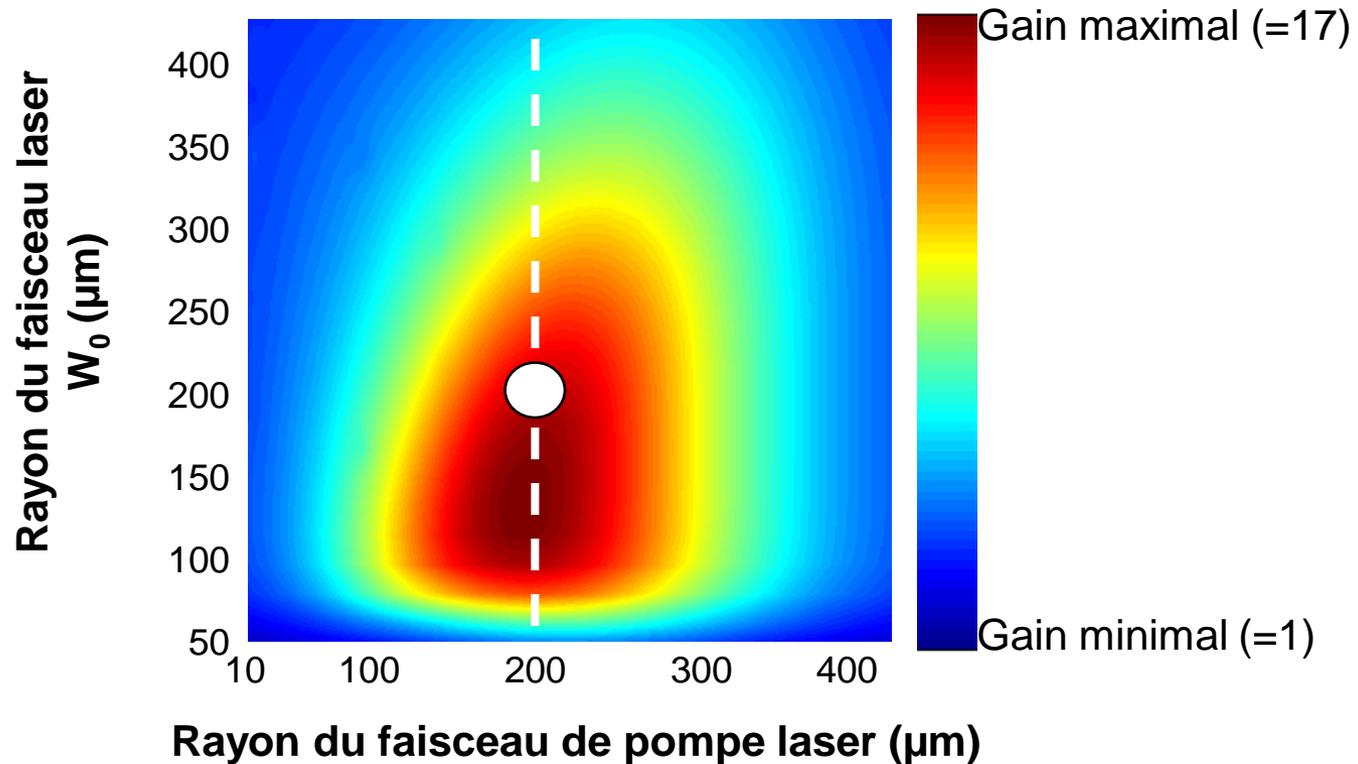
- Optimisation du gain petit signal $G_0 \longrightarrow W_P, W_L$



Diffraction et/ou réabsorption importante



- Optimisation du gain petit signal $G_0 \longrightarrow W_P, W_L$



Choix :

Pompe : $W_P = 200 \mu\text{m}$

Laser : $W_L = 220 \mu\text{m}$

\longrightarrow Pas exactement à l'optimum

Définition du système

- Etude théorique

Fibre cristalline

$\Phi = 1\text{ mm}$, $L = 40\text{ mm}$

Taux de dopage = 1 at.%

Système global

Système de pompe :

200 W, $\Phi = 200\ \mu\text{m}$

Géométrie des faisceaux :

Pompe : $W_p = 200\ \mu\text{m}$

Laser : $W_L = 220\ \mu\text{m}$

Définition du système

- Etude théorique

- Fibre cristalline
- Système de pompe
- Géom. des faisceaux

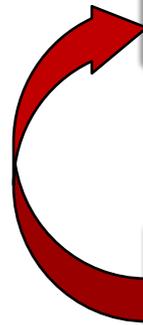
Croissance et
préparation des fibres

- Croissance μ PD

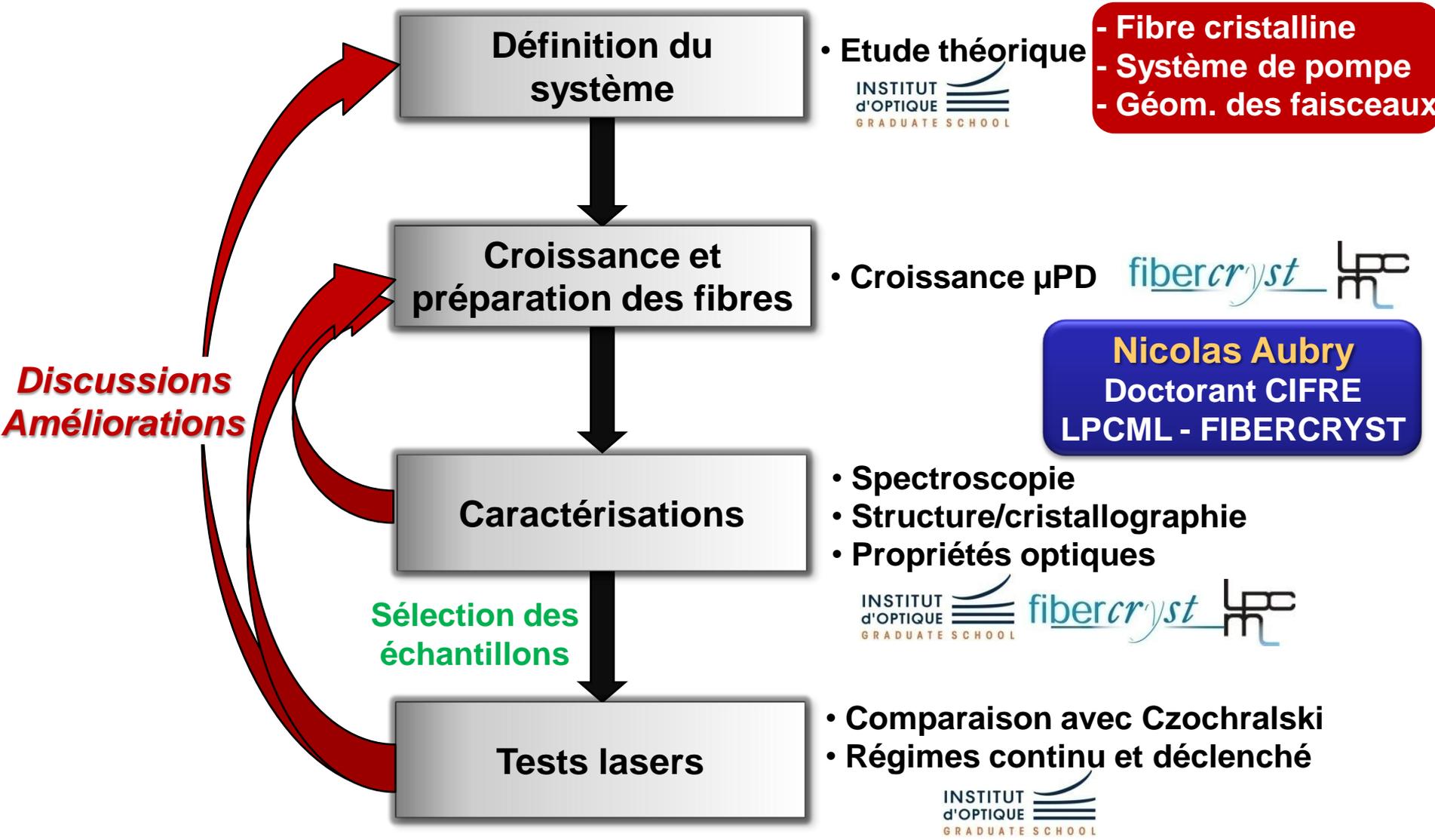
Nicolas Aubry
Doctorant CIFRE
LPCML - FIBERCRYST

Caractérisations

- Spectroscopie
- Structure/cristallographie
- Propriétés optiques

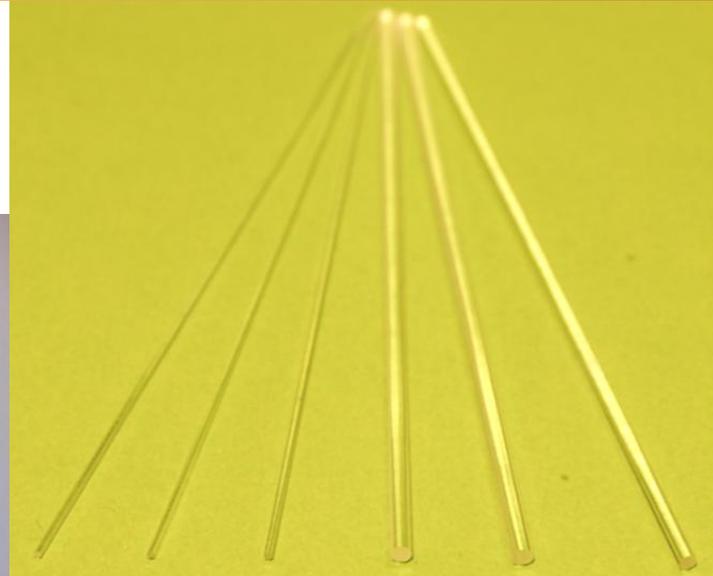
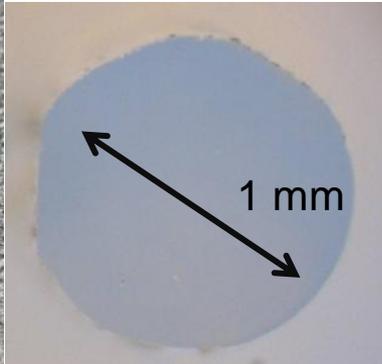
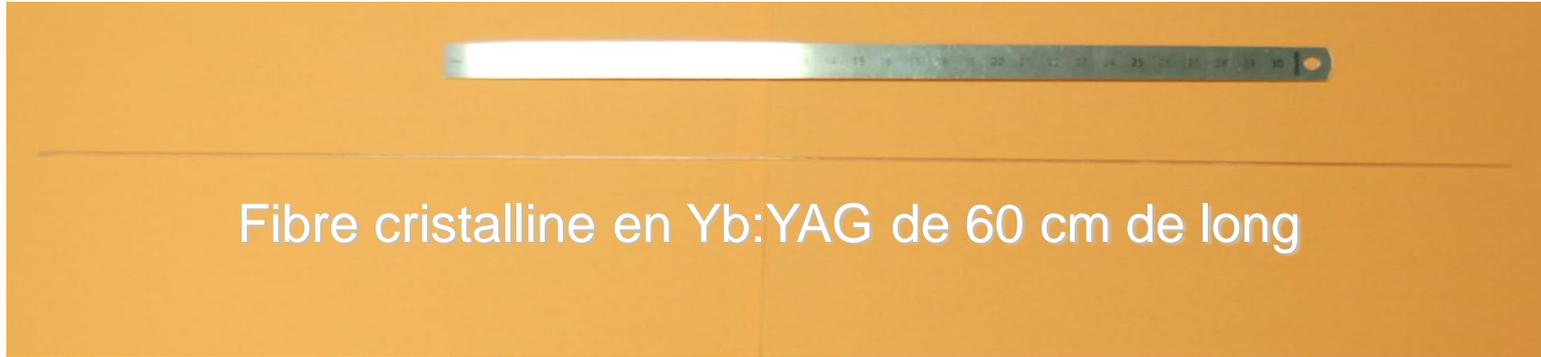


**Discussions
Améliorations**



- Fibre cristalline
- Système de pompe
- Géom. des faisceaux

Nicolas Aubry
Doctorant CIFRE
LPCML - FIBERCRYST



Introduction

1. Pompage direct de cristaux dopés Néodyme

2. Lasers à fibres cristallines dopées Ytterbium

2.1 Concept et élaboration de fibres cristallines

2.2 Dimensionnement du système

➔ 2.3 Caractérisations des fibres

2.4 Résultats lasers en régimes continu et déclenché

2.5 Conclusions et perspectives

Conclusion

- Localisation radiale du dopant Yb^{3+}

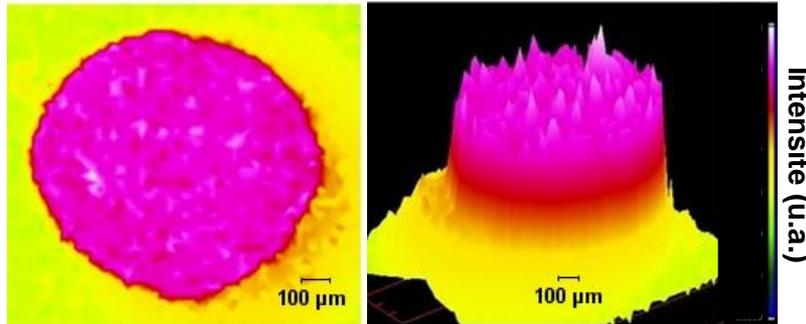
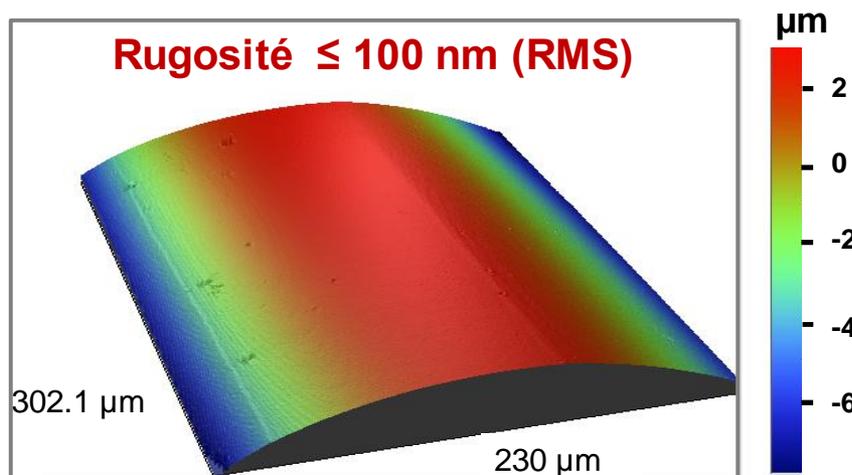


Image de micro-luminescence
(avec excitation à 224 nm)



Répartition homogène

- Etat de surface des fibres cristallines



Atelier d'Optique

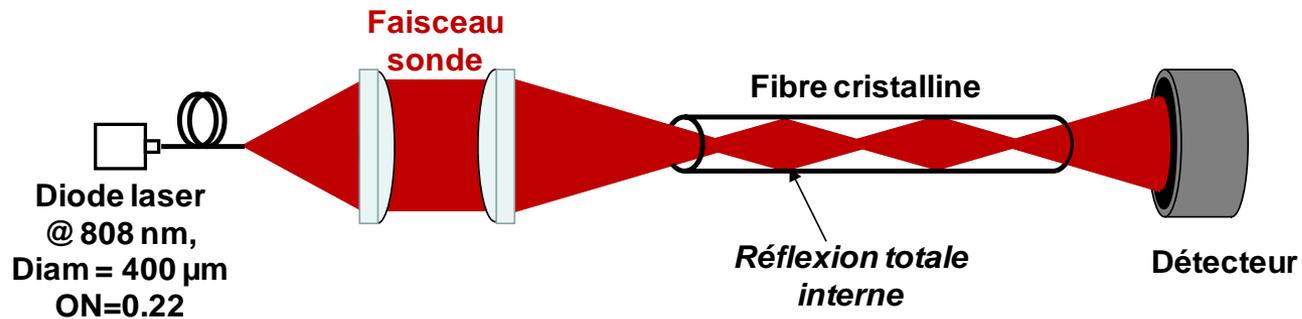
Interférométrie en lumière blanche
sur la surface d'une fibre



**Bonne qualité de surface
($< \lambda/10$ sans polissage)**

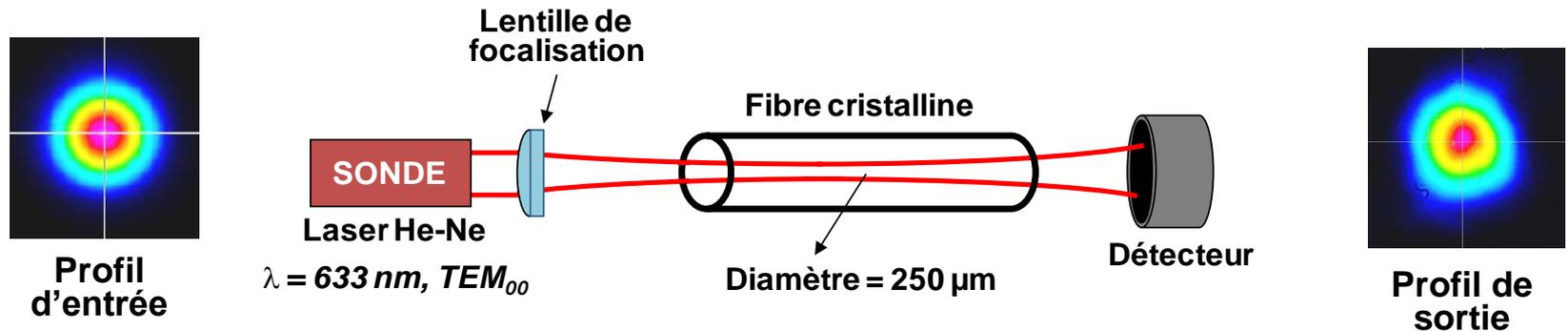
• Propriétés de guidage

Diamètre = 1 mm
Longueur = 40 mm



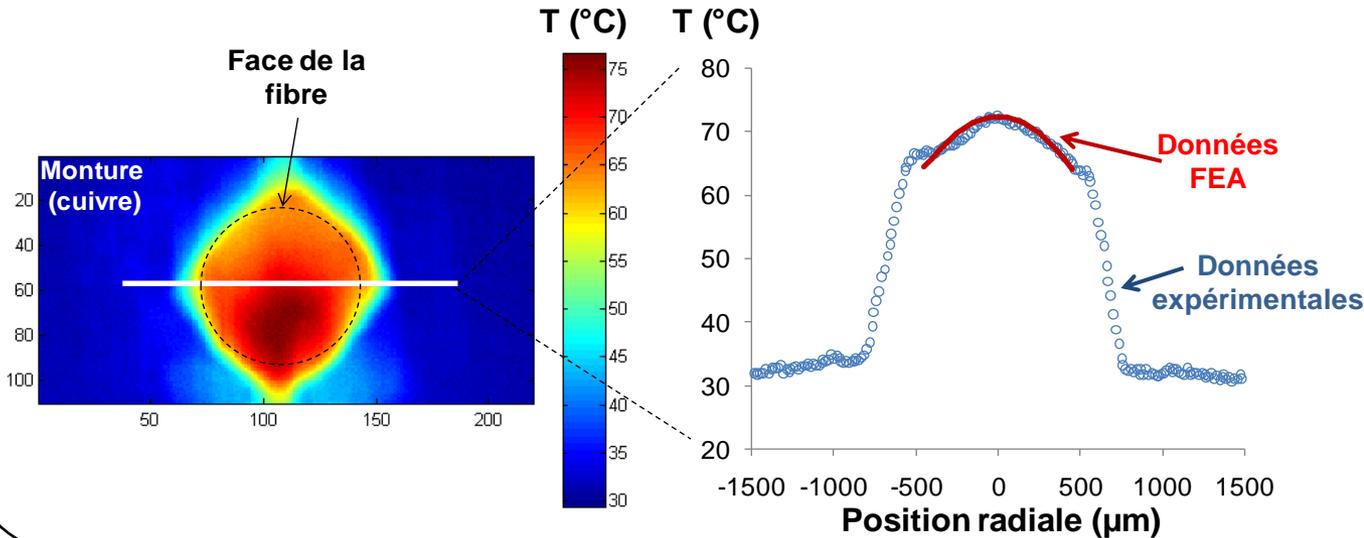
➔ **Guidage > 90 % directement après croissance**

• Transmission intrinsèque



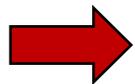
➔ **Transmission mesurée > 98 %**

• Cartographie thermique

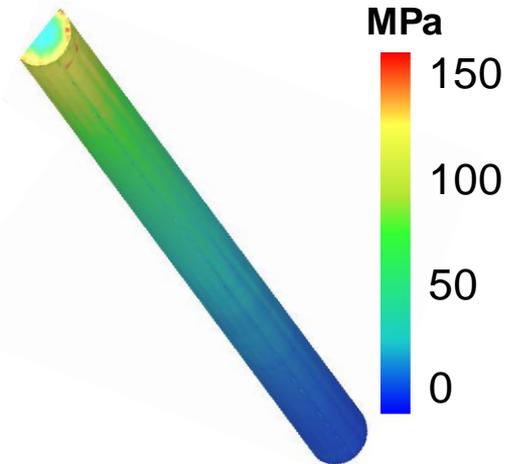


$T^{\circ}_{\max} < 75^{\circ} \text{C}$
 $\Delta T < 15^{\circ} \text{C}$
 pour 200 W de pompe

• Simulations par analyse des éléments finis



$P_{\text{Pompe max}} \sim 1 \text{ kW}$ avant fracture thermique



Introduction

1. Pompage direct de cristaux dopés Néodyme

2. Lasers à fibres cristallines dopées Ytterbium

2.1 Concept et élaboration de fibres cristallines

2.2 Dimensionnement du système

2.3 Caractérisations des fibres

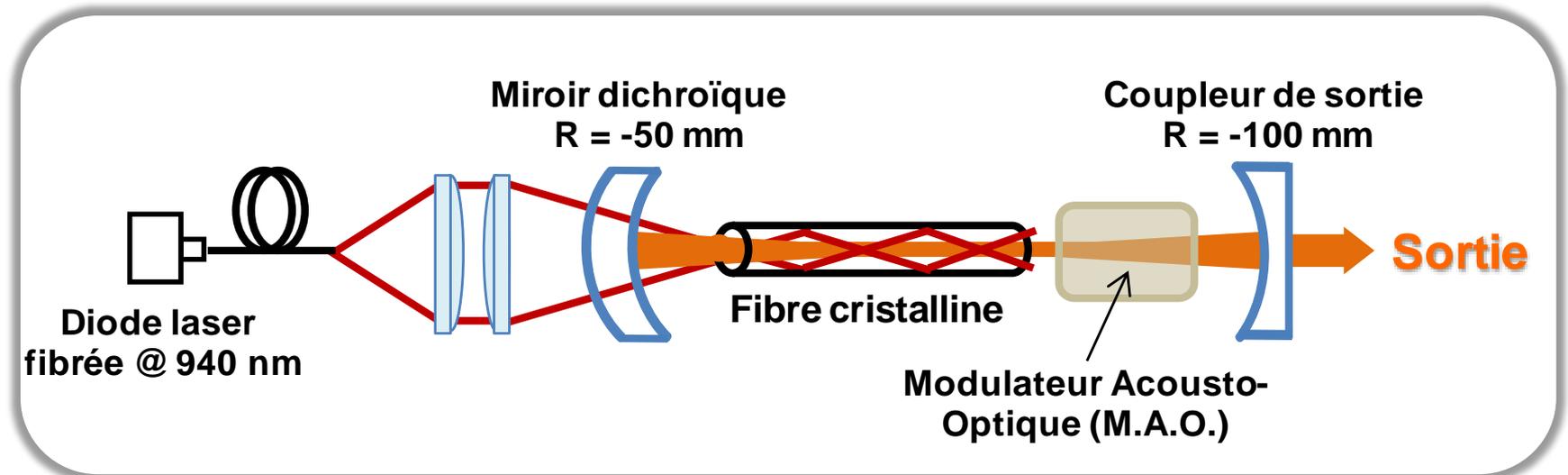
➔ 2.4 Résultats lasers en régimes continu et déclenché

2.5 Conclusions et perspectives

Conclusion

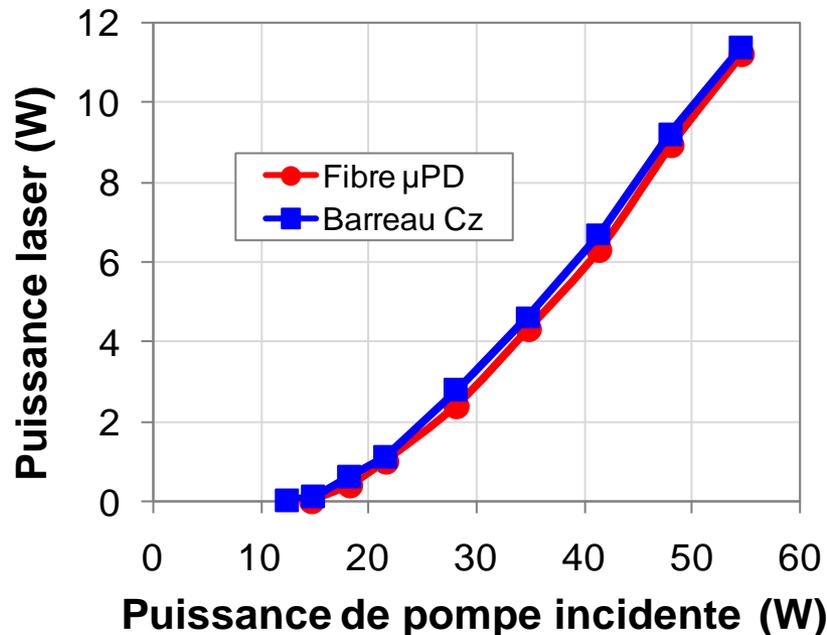
- Définition de la cavité laser

- ➔ Simple : 2 miroirs
- ➔ Adaptée à la montée en puissance
- ➔ Courte pour limiter la durée d'impulsions ($L < 200$ mm)
- ➔ Utilisation d'un Modulateur Acousto-Optique (M. A. O.)



- Comparaison en configuration laser pour 60 W de pompe

	Czochralski (Cz)	Micro-Pulling Down (μ PD)
Diamètre	1 mm	1 mm
Longueur	35 mm	30 mm
Taux de dopage	0.65 at. %	0.7 at. %
Transmission/Guidage	98 % / 91 %	98 % / 90 %



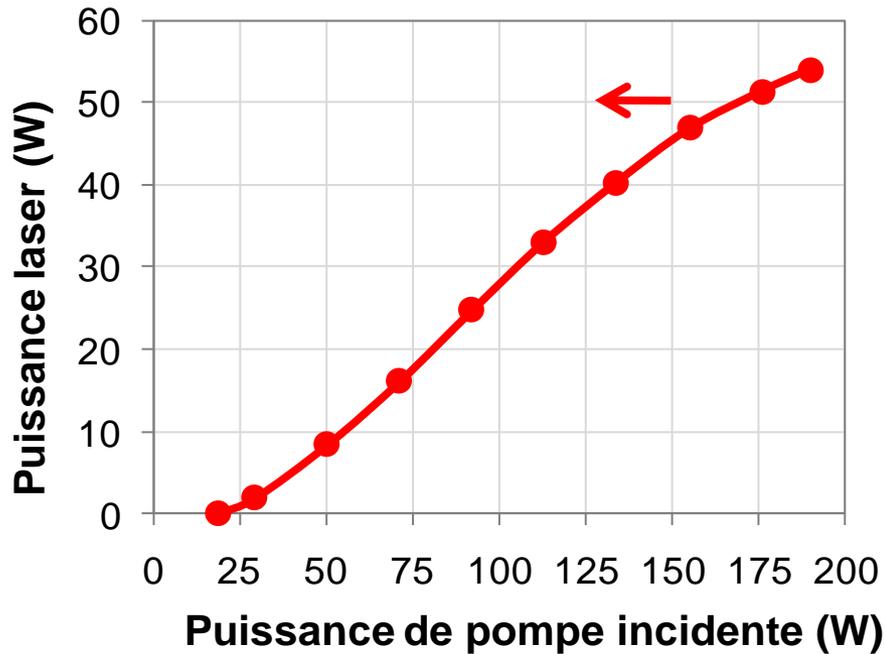
$P_{Max} = 11.3 \text{ W} @ 1031 \text{ nm}$

$M^2 \leq 2.5$

Pente d'efficacité = 31 %

Résultats similaires avec les deux types de croissance

- Efficacité pour 200 W de pompe



$T_{\text{coupleur}} = 40 \%$

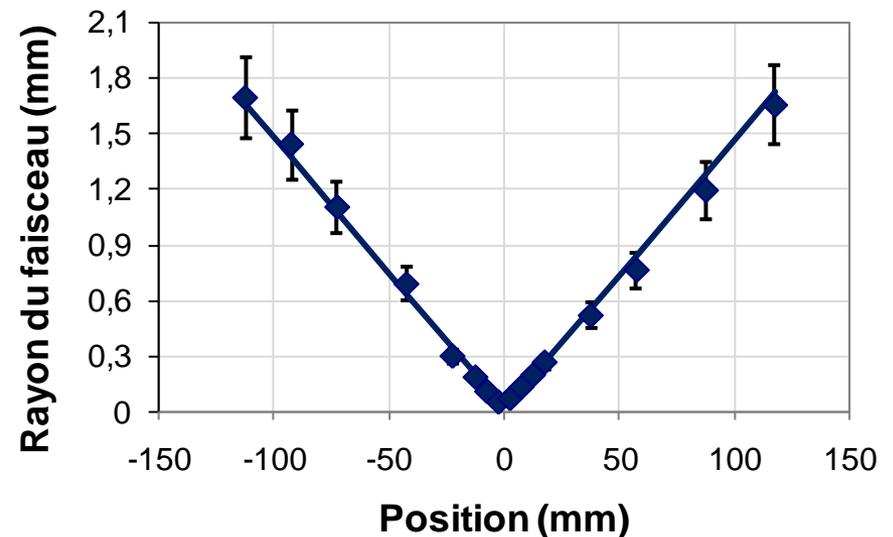
$\Phi = 1 \text{ mm}$, $L = 40 \text{ mm}$, $1 \text{ at.}\%$

$P_{\text{max}} = 55 \text{ W}$

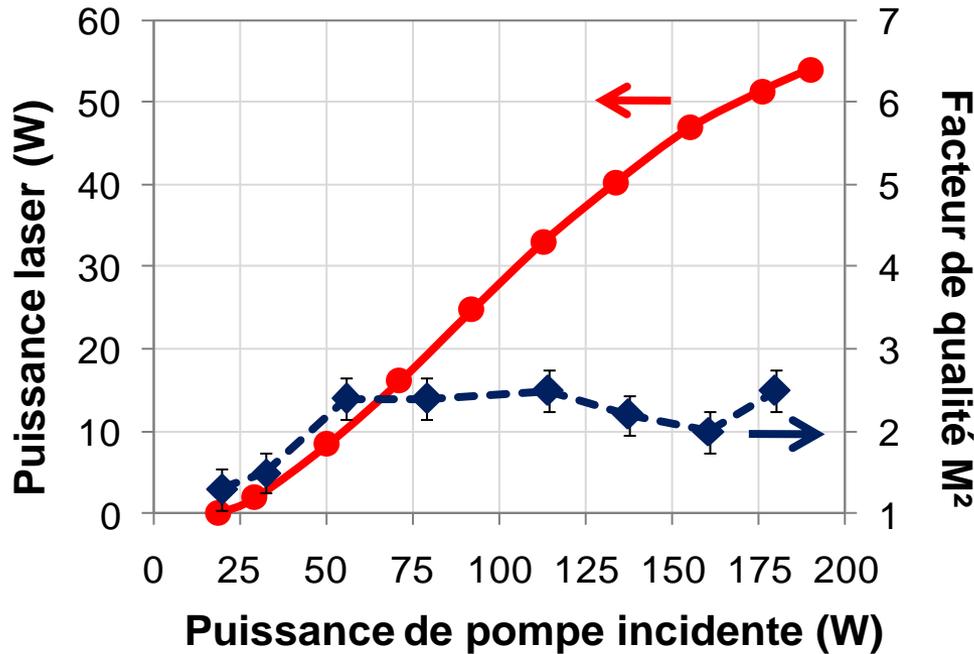
Pente = 35 %

$M^2 \leq 2,5$

D. Sangla et al., Appl. Phys. B, **97** (2009)



• Evolution du facteur de qualité M^2 avec la pompe



$\Phi = 1 \text{ mm}$, $L = 40 \text{ mm}$, 1 at.%

$$P_{\max} = 55 \text{ W}$$

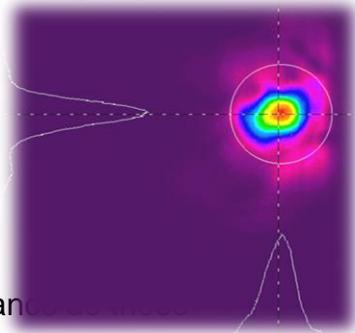
$$\text{Pente} = 35 \%$$

$$M^2 \leq 2,5$$

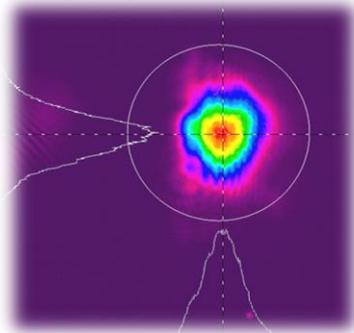
D. Sangla et al., Appl. Phys. B, **97** (2009)

Maintien d'une bonne qualité spatiale (grâce au concept de filtrage)

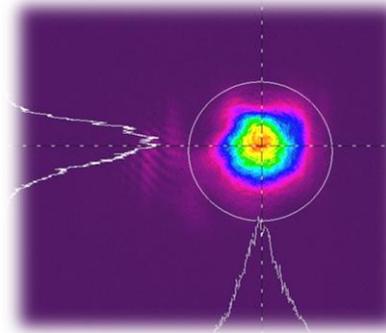
$P_{\text{pompe}} = 50 \text{ W}$



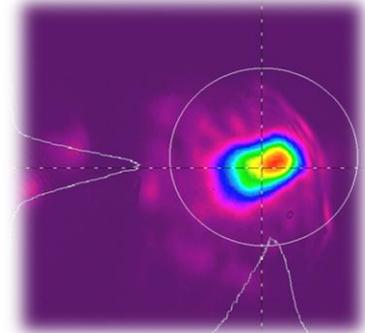
$P_{\text{pompe}} = 110 \text{ W}$

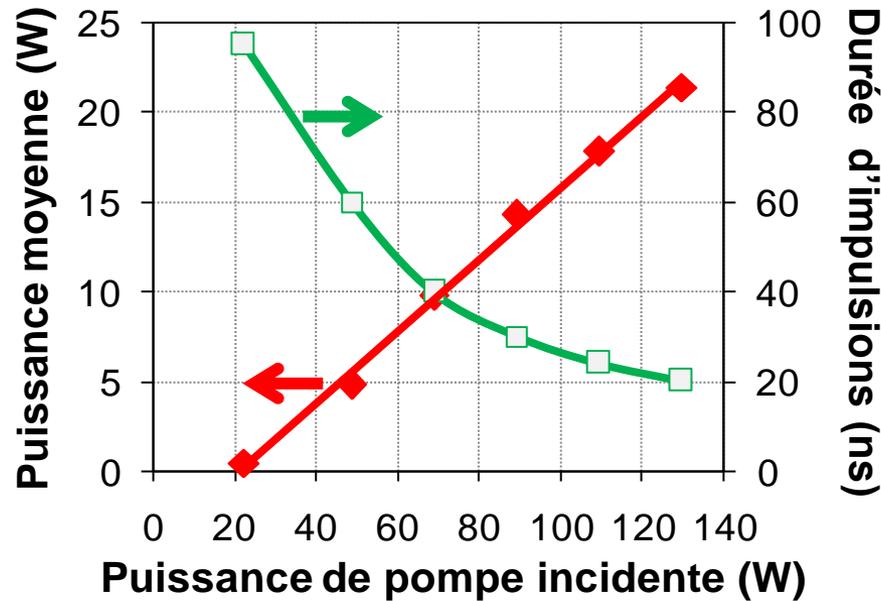
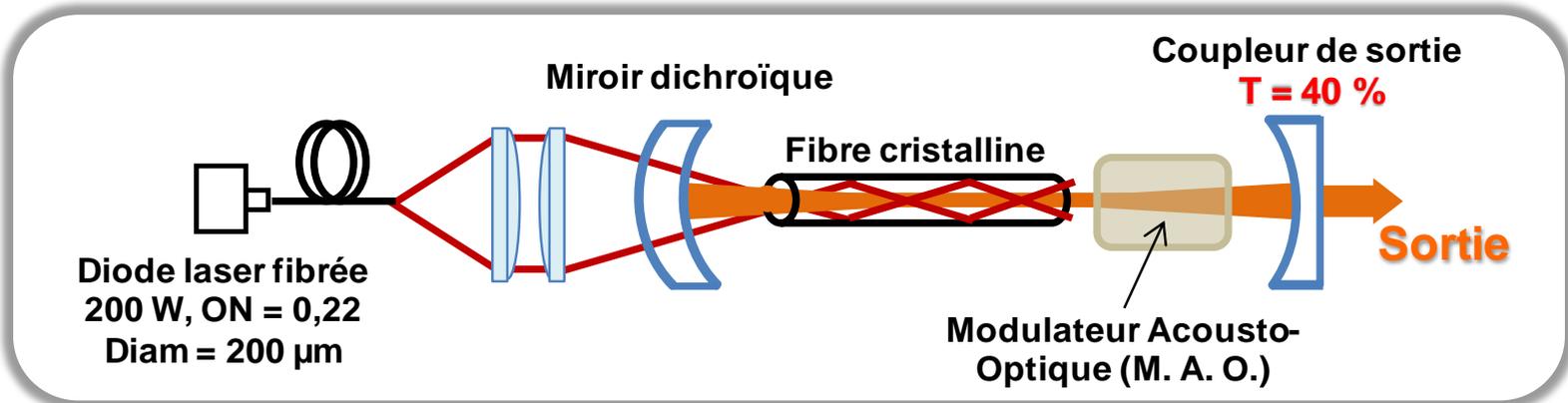


$P_{\text{pompe}} = 140 \text{ W}$



$P_{\text{pompe}} = 170 \text{ W}$





A 20 kHz, 130 W de puissance de pompe :

$P_{\text{moy}} = 22 \text{ W}$

Energie = 1.1 mJ

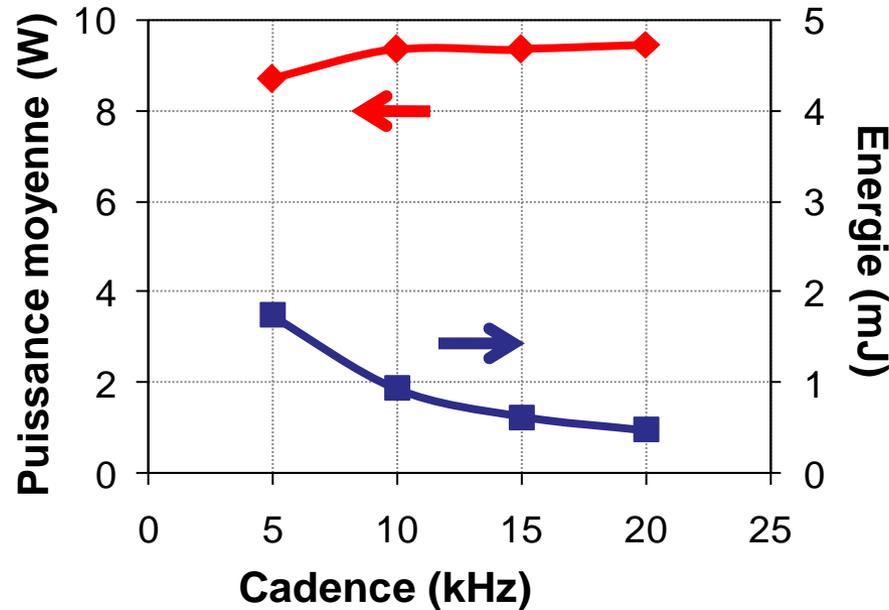
Durée d'impulsions = 20 ns

$P_{\text{crête}} = 54 \text{ kW}$



Au-delà de 130 W, limitation liée au taux d'extinction du M. A. O.

- Extraction d'énergie : $T_{\text{coupleur}} = 80 \%$



Pour 150 W de puissance de pompe :

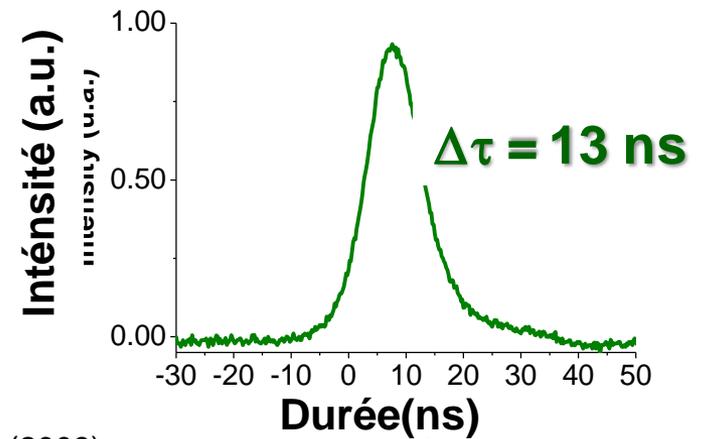
$$P_{\text{moy}} \leq 9.5 \text{ W}$$

A 5 kHz : Energie = 1.8 mJ

Durée d'impulsions = 13 ns

$$P_{\text{crête}} = 138 \text{ kW}$$

➔ A plus basses cadences : limitation due à la densité d'énergie sur les Traitements AR



Introduction

1. Pompage direct de cristaux dopés Néodyme

2. Lasers à fibres cristallines dopées Ytterbium

2.1 Concept et élaboration de fibres cristallines

2.2 Dimensionnement du système

2.3 Caractérisations des fibres

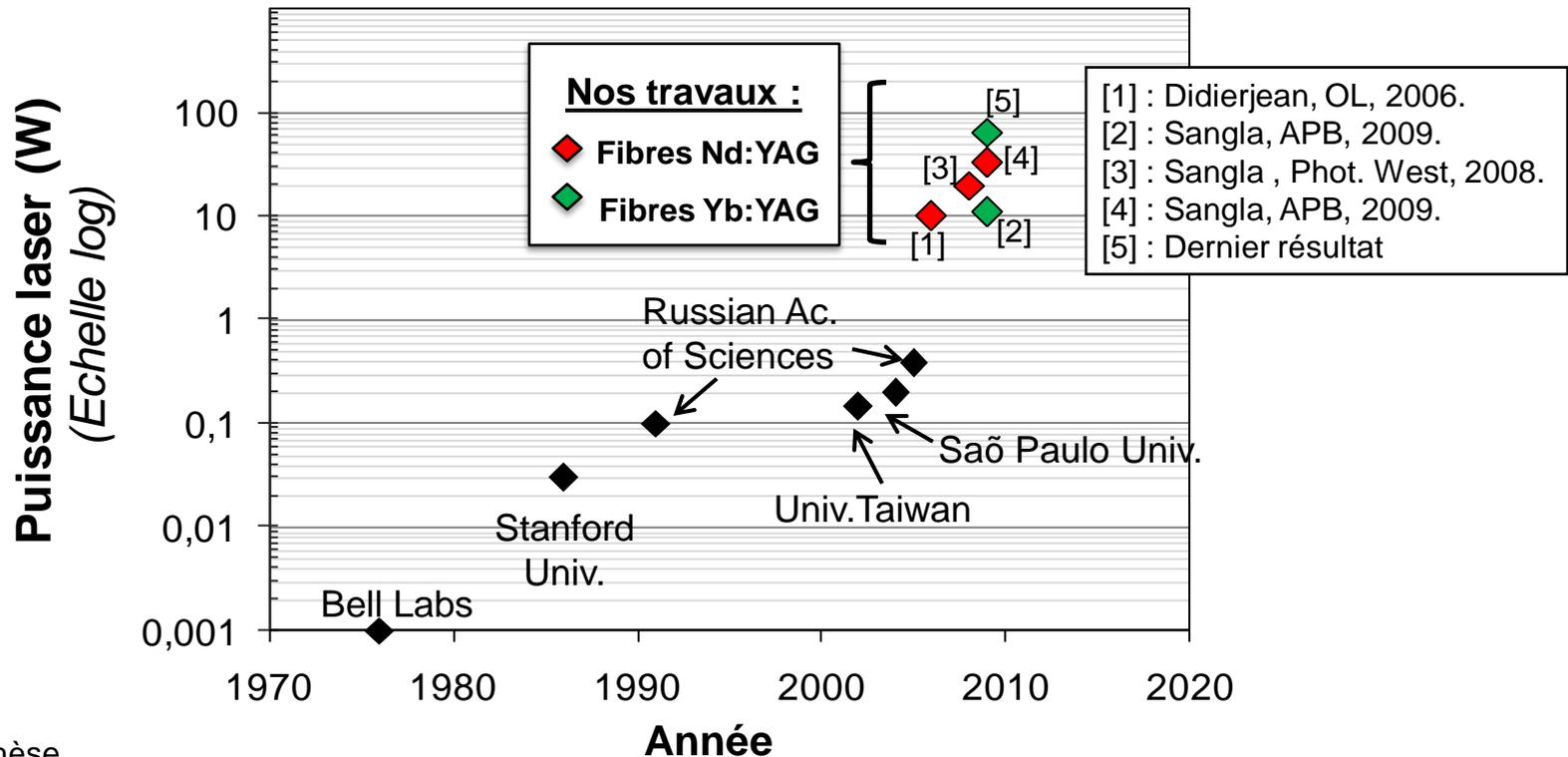
2.4 Résultats lasers en régimes continu et déclenché

➔ 2.5 Conclusions et perspectives

Conclusion

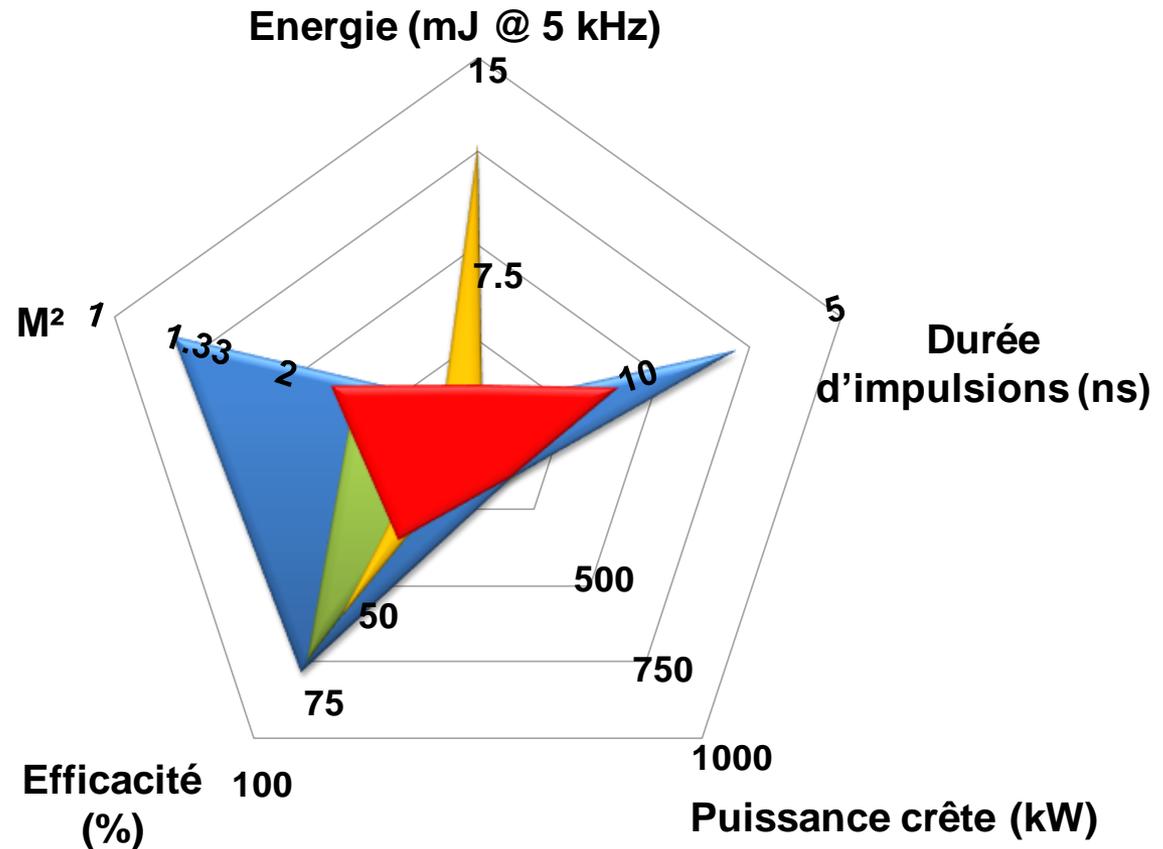
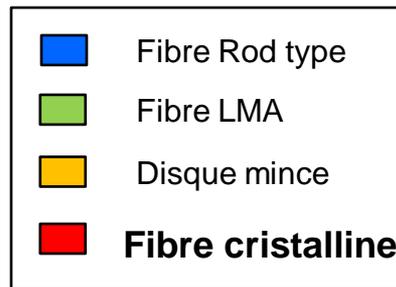
- ✓ Etude du concept de laser à fibre cristalline dopée Yb³⁺
- ✓ **Elaboration et caractérisation** de fibres de **qualité laser**
- ✓ **En régime continu :**

Dernier résultat : plus de **65 W** pour 180 W de puissance de pompe



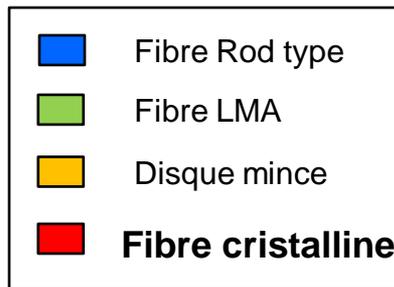
✓ Performances en régime déclenché

- Plus de 20 W à 20 kHz pour **130 W @ 940 nm**, $\Delta\tau = 20$ ns, $P_{\text{crête}} = 54$ kW
- Près de **10 W à 5 kHz** pour **150 W @ 940 nm**, $\Delta\tau = 13$ ns, $P_{\text{crête}} = 138$ kW



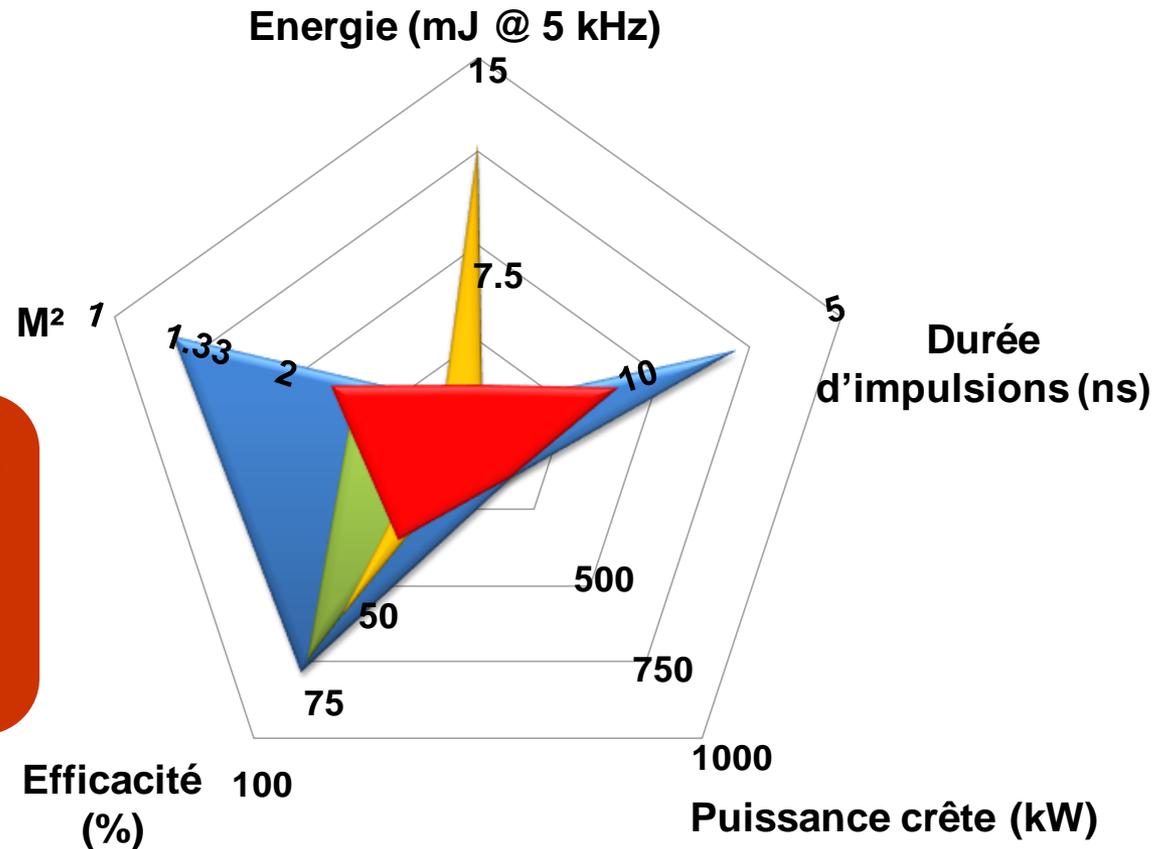
✓ Performances en régime déclenché

- Plus de 20 W à 20 kHz pour **130 W @ 940 nm**, $\Delta\tau = 20$ ns, $P_{\text{crête}} = 54$ kW
- Près de **10 W à 5 kHz** pour **150 W @ 940 nm**, $\Delta\tau = 13$ ns, $P_{\text{crête}} = 138$ kW



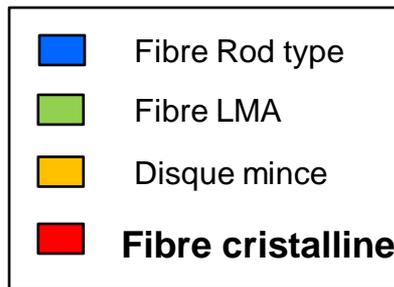
Performances visées :

1 kHz < Cadence < 10 kHz
 Energie ~ 10 mJ
 Puissance crête ~ 1 MW
 Impulsions < 10 ns



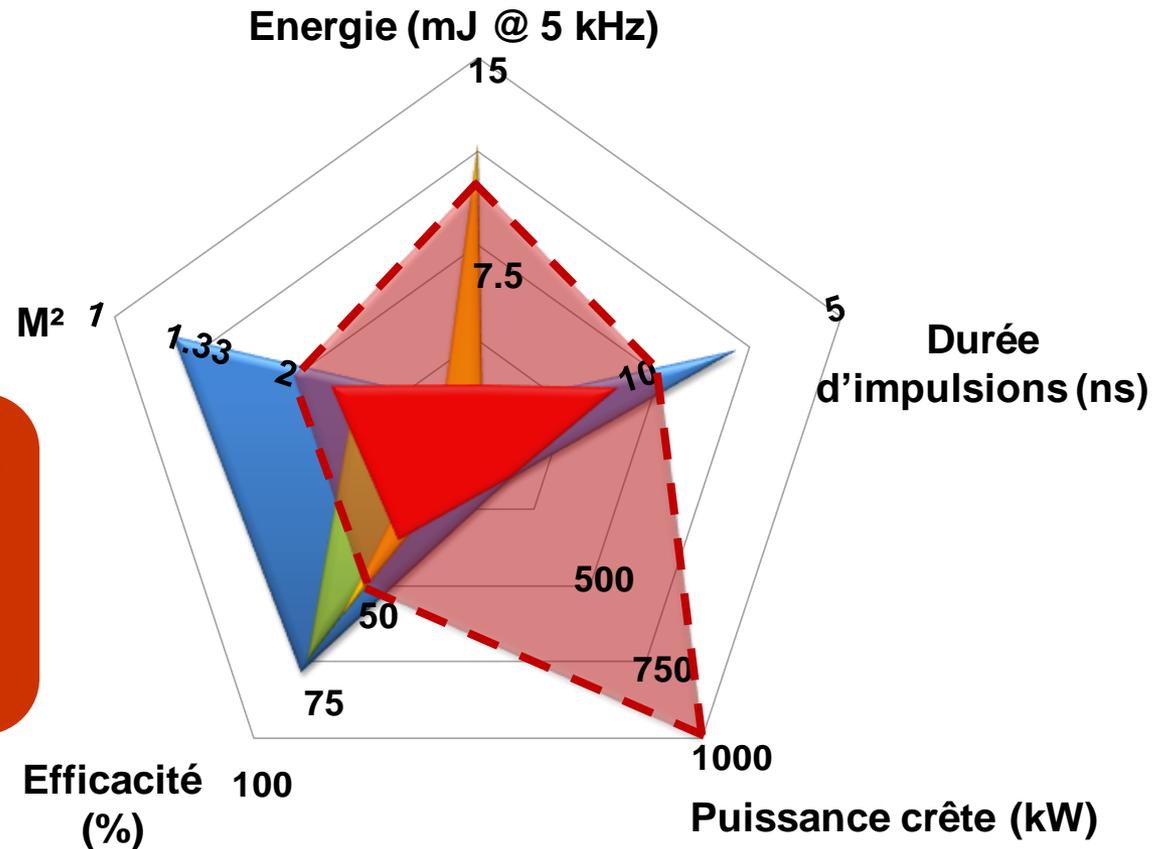
✓ Performances en régime déclenché

- Plus de 20 W à 20 kHz pour **130 W @ 940 nm**, $\Delta\tau = 20$ ns, $P_{\text{crête}} = 54$ kW
- Près de **10 W à 5 kHz** pour **150 W @ 940 nm**, $\Delta\tau = 13$ ns, $P_{\text{crête}} = 138$ kW



Performances visées :

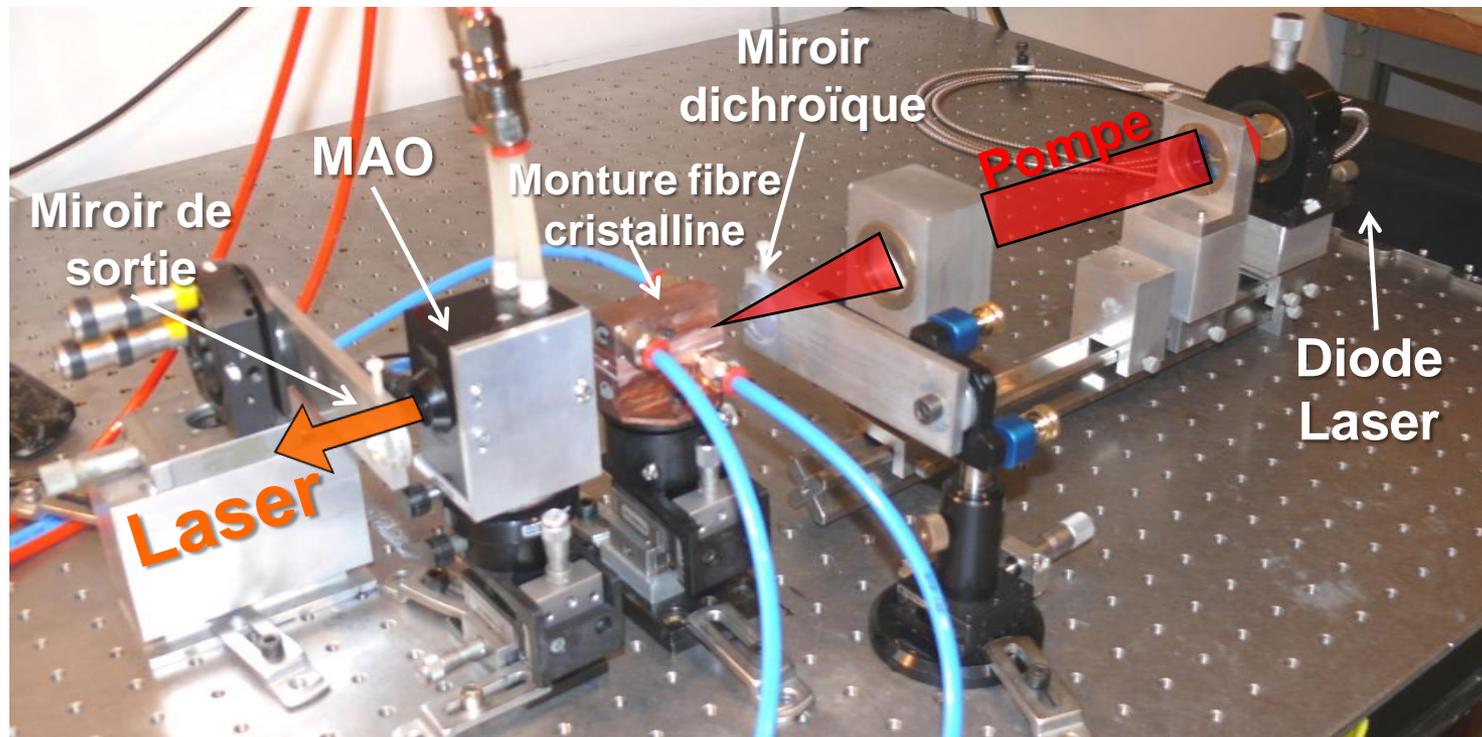
1 kHz < Cadence < 10 kHz
 Energie ~ 10 mJ
 Puissance crête ~ 1 MW
 Impulsions < 10 ns



➤ Extension des résultats en régime impulsionnel

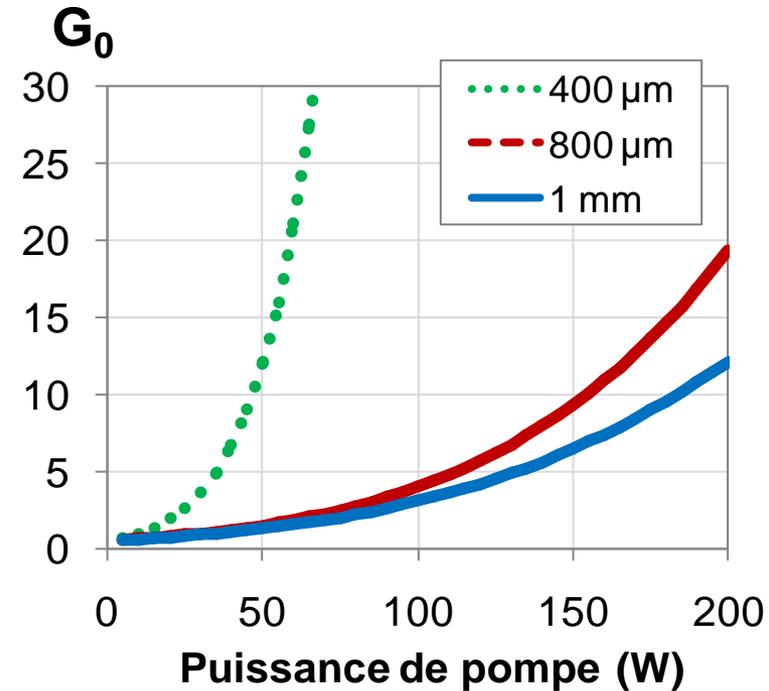
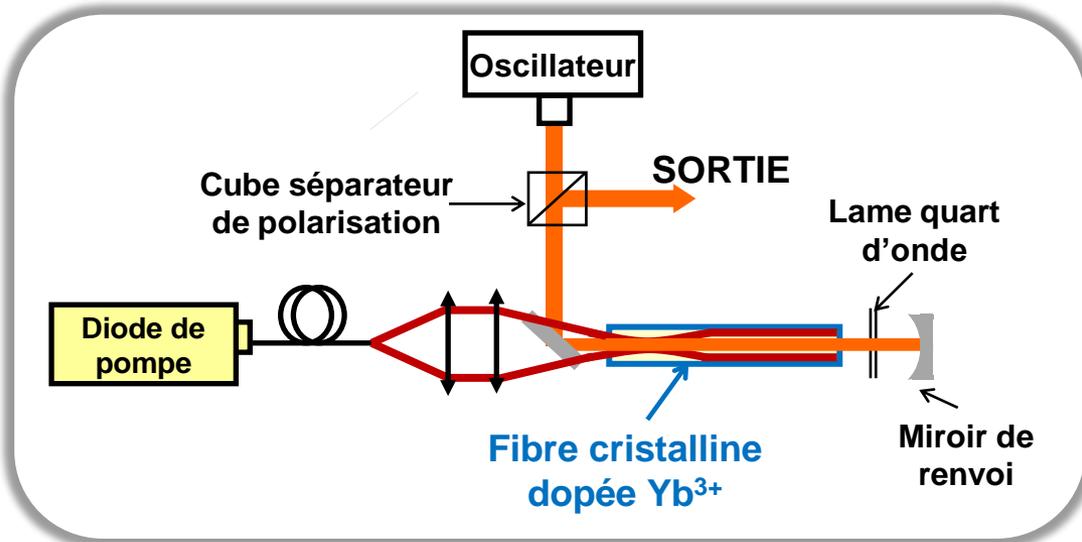
➔ Igor Martial (Thèse CIFRE IO/Fibercryst)

De la table optique...



➔ ... à l'intégration et à la réalisation d'un prototype ?

➤ Amplificateurs à fibres cristallines



➤ Réduction diamètre

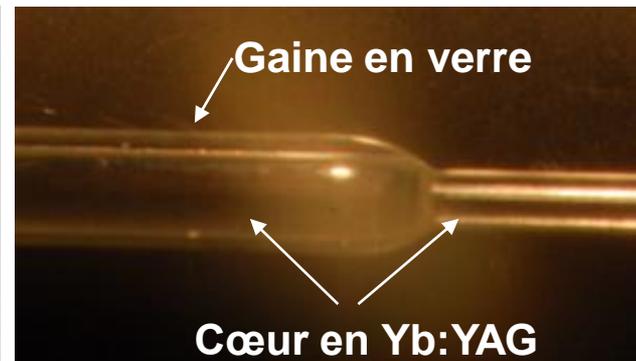
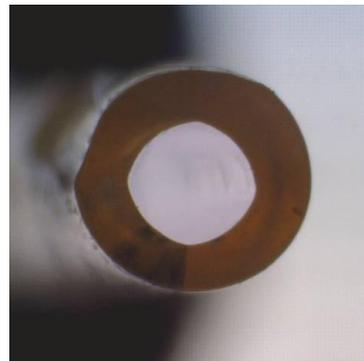
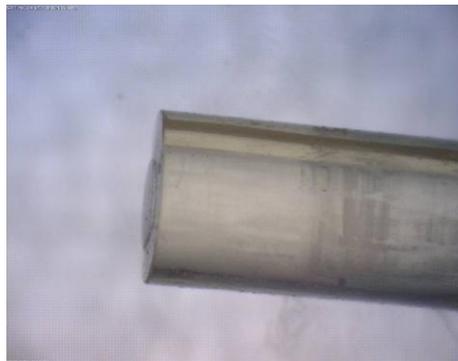
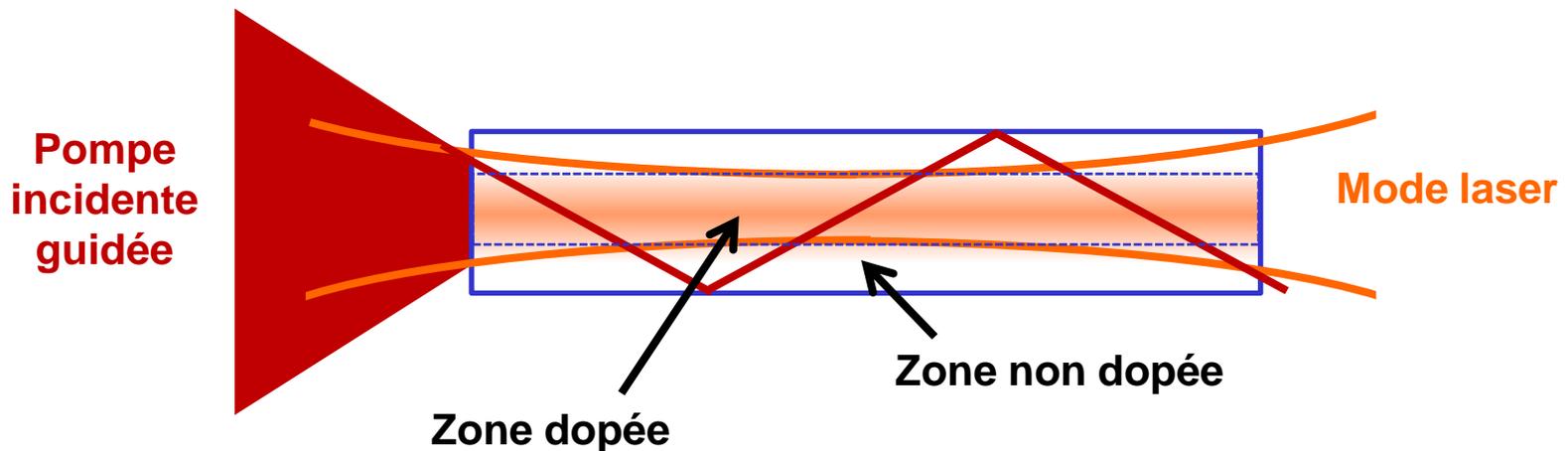
➤ Etude d'autres matériaux dopés Yb³⁺

- ✓ **Fibres cristallines en Yb:LuAG**
- ✓ **Yb:YSO, Yb:CaF₂, Yb:CALGO...**

D. Sangla et al., J. Cryst. Growth, **312**, (2009).

- **Fonctionnalisation des fibres cristallines**

➔ **But** : concentrer l'inversion de population au cœur de la fibre



Introduction

1. **Pompage direct de cristaux dopés Néodyme**
2. **Lasers à fibres cristallines dopées Ytterbium**

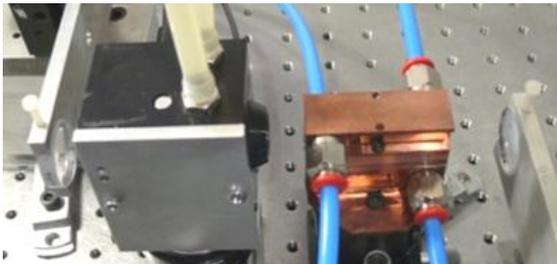
Conclusion

Étude du pompage direct de cristaux dopés Néodyme

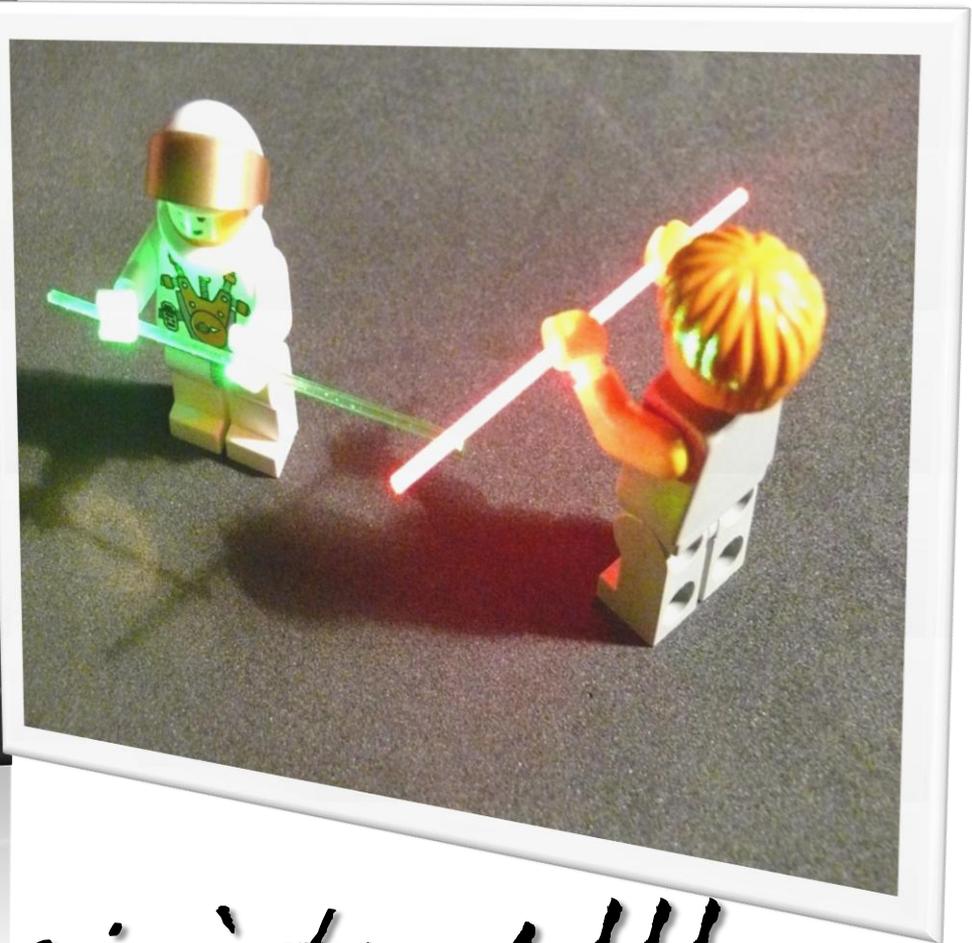
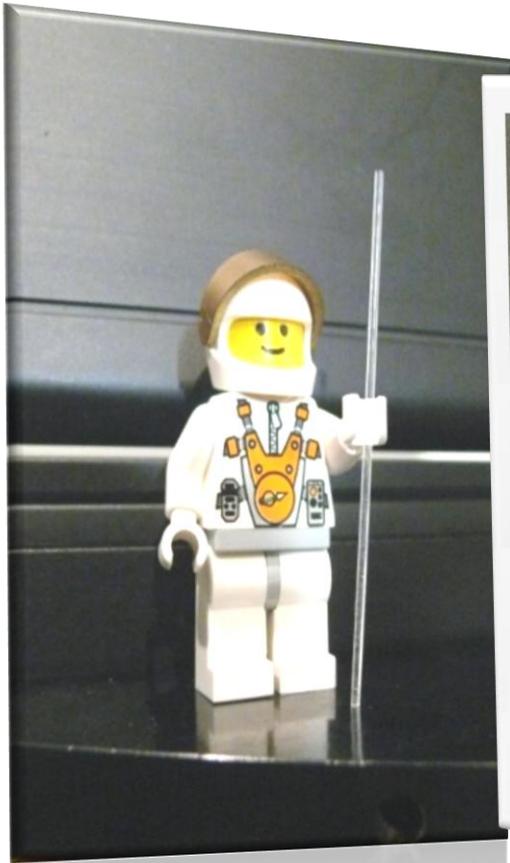


- Premières démonstrations avec un pompage par diode dans la bande d'émission
- Fort potentiel pour la montée en puissance de systèmes existants

Étude de fibres cristallines dopées Ytterbium



- Croissance par la technique micro-pulling-down :
- Premiers résultats laser
 - Fort potentiel pour atteindre des performances inédites en régime déclenché



Merçi à tous !!!