

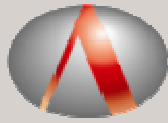
Amplitude

S Y S T E M E S

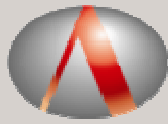
Lasers femtoseconde de forte puissance moyenne : état de l'art et perspectives

Antoine Courjaud

Journée thématique CMDO
25-26 novembre 2010 – ILP Le Barp



- Motivations : les lasers intenses pour quoi faire?
- Physique des lasers Ytterbium
- Etat de l'art oscillateurs & amplis
- Axes de développements matériaux
- Conclusion

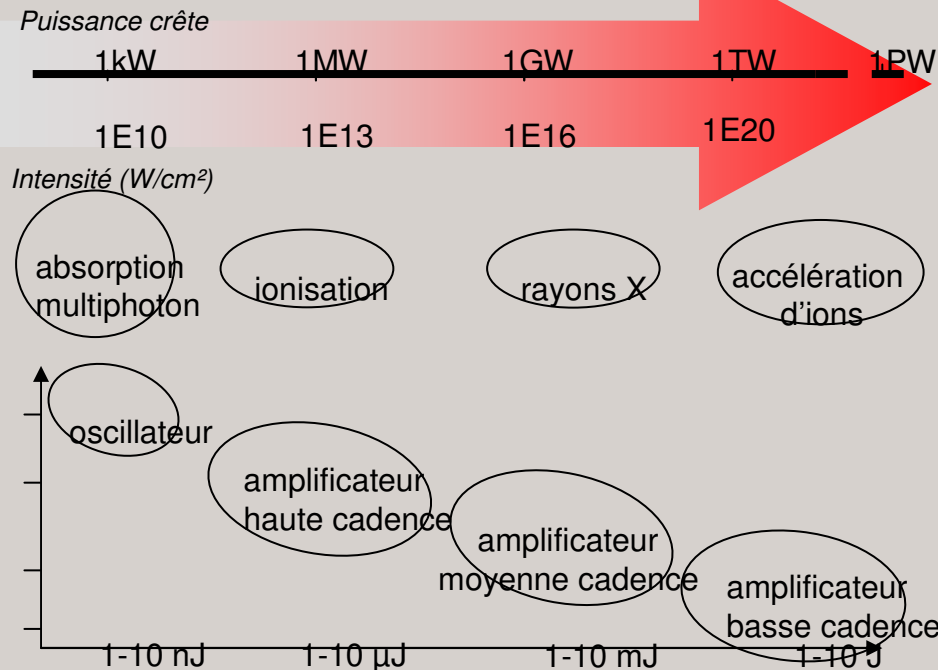


Amplitude

SYSTEMES

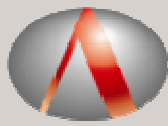
Intérêt des lasers intenses

- Micro-usinage : structuration, ablation sélective, microperçage
- Interaction en volume dans les matériaux transparents
microscopie, photopolymérisation, marquage interne du verre, chirurgie de l'œil
- Sources secondaires : THz, X-UV, protons, électrons
- Production d'impulsions attoseconde : dynamiques ultrarapides



Besoin forte puissance moyenne (>100W) :

- Industrie : temps de process
- Scientifique : flux moyen sources secondaires



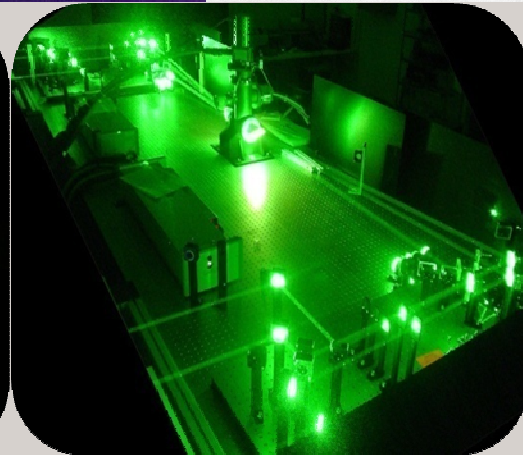
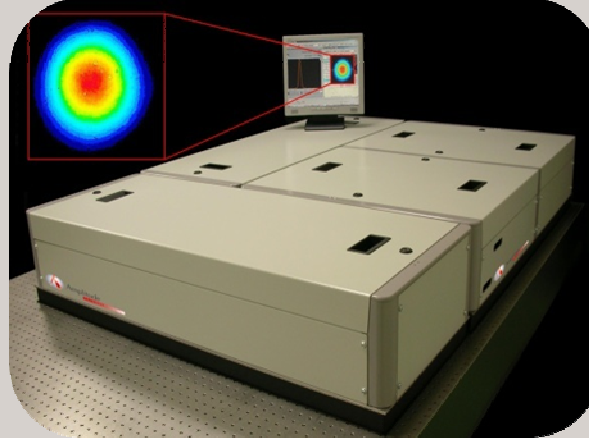
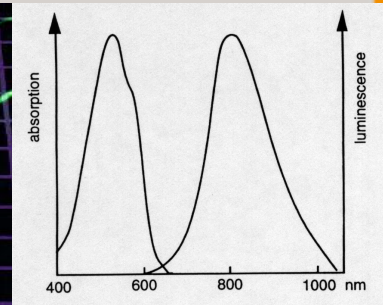
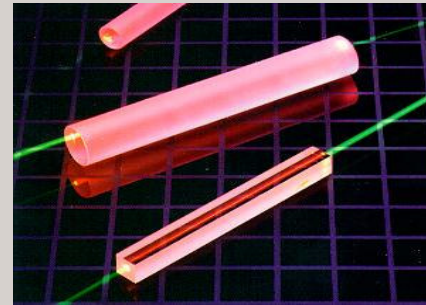
Amplitude

SYSTEMES

Lasers 100TW commerciaux

Technologie Ti:Sa :

- large spectre
- fort gain
- bonnes propriétés thermiques

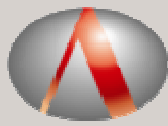


Pompes : Nd:YAG doublé pompé flash
Durées courtes ~25-30 fs

faible coût au Joule
faible besoin d'énergie

Meilleur compromis coût/TW

Favorable à forte puissance moyenne... en route vers le PW commercial

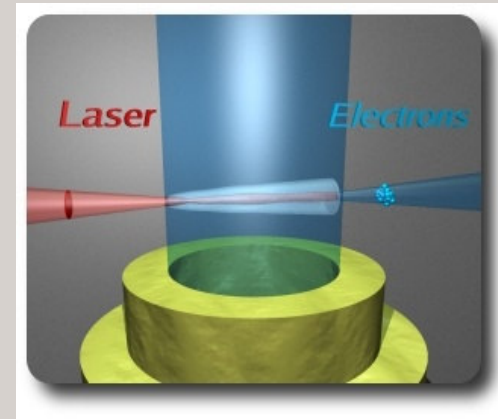


Amplitude

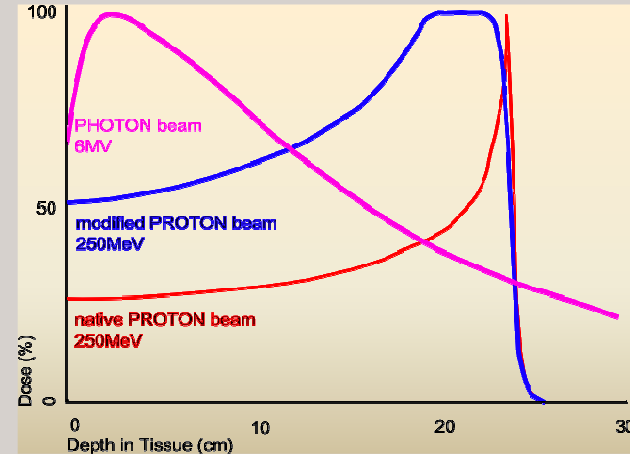
SYSTEMES

Lasers 100-200TW : applications

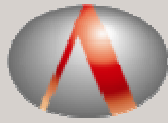
- Accélération d'électrons
Accélérateurs compacts, régime wake-field



- Accélération de protons
Protonthérapie (Cancer)



- Interface avec LINAC, synchrotrons, X-FEL

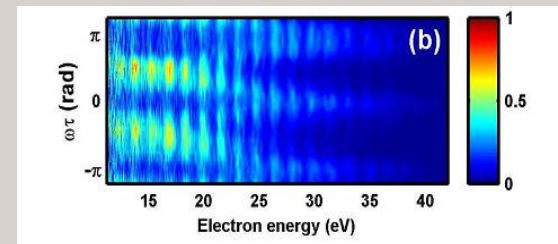


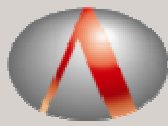
Amplitude

SYSTEMES

Lasers TW kHz - applications

- High order harmonic generation, Attosecond physics
- *Photoinjectors for LINAC*
- *Femtochemistry, femtosecond spectroscopy*





Amplitude

SYSTEMES

Procédés : Besoins marchés

Applications industrielles :

Procédés d'ablation : systèmes amplifiés

Procédé précis, mais faible volume ablaté vs coût investissement

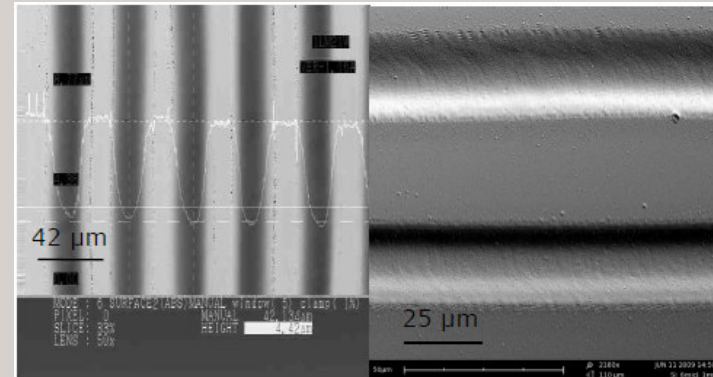
Besoin augmenter la cadence = puissance moyenne

Débat pico vs femto non tranché

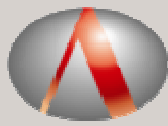
Etudes en cours...

Pulse duration	Energy per pulse	Peak Power	Removal rate (Molybdenum)
10ps	3 μ J	0.3 MW	0.03 mm ³ /min
500fs	3 μ J	6 MW	0.87 mm ³ /min

Lopez et al, LAMP 2009



De belles études pour les spécialistes de l'endommagement!



Intérêt pompage diode

Pour des puissances $>100\text{W}$, considérations :

- Coût principal = coût des pompes
- Gestion alimentations
- Dissipation thermique

Besoin de :

- simplifier l'architecture laser
- optimiser l'efficacité du laser



Pompage diode

Challenge techno : trouver équivalent Ti:Sa pompable par diode

Matériau idéal :

Gain élevé $J_{\text{sat}} < J_{\text{th}} = 1\text{J}/\text{cm}^2$

Large spectralement ($>50\text{nm}$)

Bon thermiquement



=Ti:Sa

« le beurre »

Pompable par diode

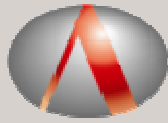
Long temps de fluorescence

Efficace électrique-optique

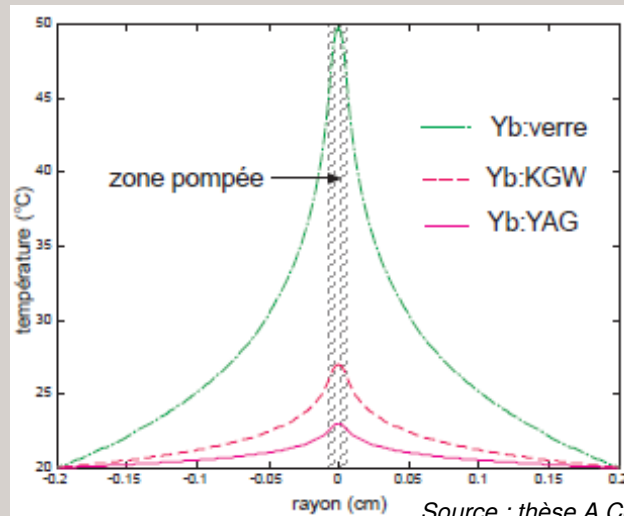


= Ytterbium:xxx

« l'argent du beurre »



Lentille thermique dans un matériau refroidi radialement :



Source : thèse A Courjaud 2001

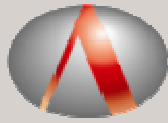
$$f_{th} I_{Pabs} = \frac{2K_c}{\rho \frac{dn}{dT}} \quad \text{« Vergence normalisée »}$$

- Besoin de tenir compte de $\rho = 1 - \frac{\lambda_p}{\lambda_L}$
- Ne dépend pas de L

Contribution des effets conjoints thermo-optique, de dilatation et des contraintes

$$D_{th} = \frac{1}{f_{th}} = \frac{\eta_h \cdot P_{abs}}{2\pi \cdot w_p^2 \cdot K_c} \left[\underbrace{\frac{dn}{dT}}_{\chi_{dn/dT}} + \underbrace{(n_0 - 1)(1 + \nu)\alpha_T}_{\chi_{dilatation}} + \underbrace{2n_0^3 \cdot \alpha_T \cdot C_{r,\theta}}_{\chi_{contraintes}} \right] = \frac{\eta_h \cdot P_{abs} \chi}{2\pi \cdot w_p^2 \cdot K_c}$$

Source : thèse de Julien Didierjean 2007



Amplitude

SYSTEMES

Paramètres intrinsèques

Spectroscopiques

Section efficace émission : λ_0 , $\Delta\lambda$

section efficace absorption : λ_0 , $\Delta\lambda$

temps fluorescence : temps stockage

photodarkening, quenching...

Cristallographiques

anisotropie

densité d'ions (dopage)

dimension : large section, faibles épaisseurs

qualité optique : diffusion

Thermique

conductivité

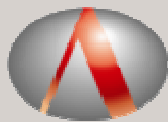
coefficient thermo-optique

coefficient d'expansion

module d'Young

Optique

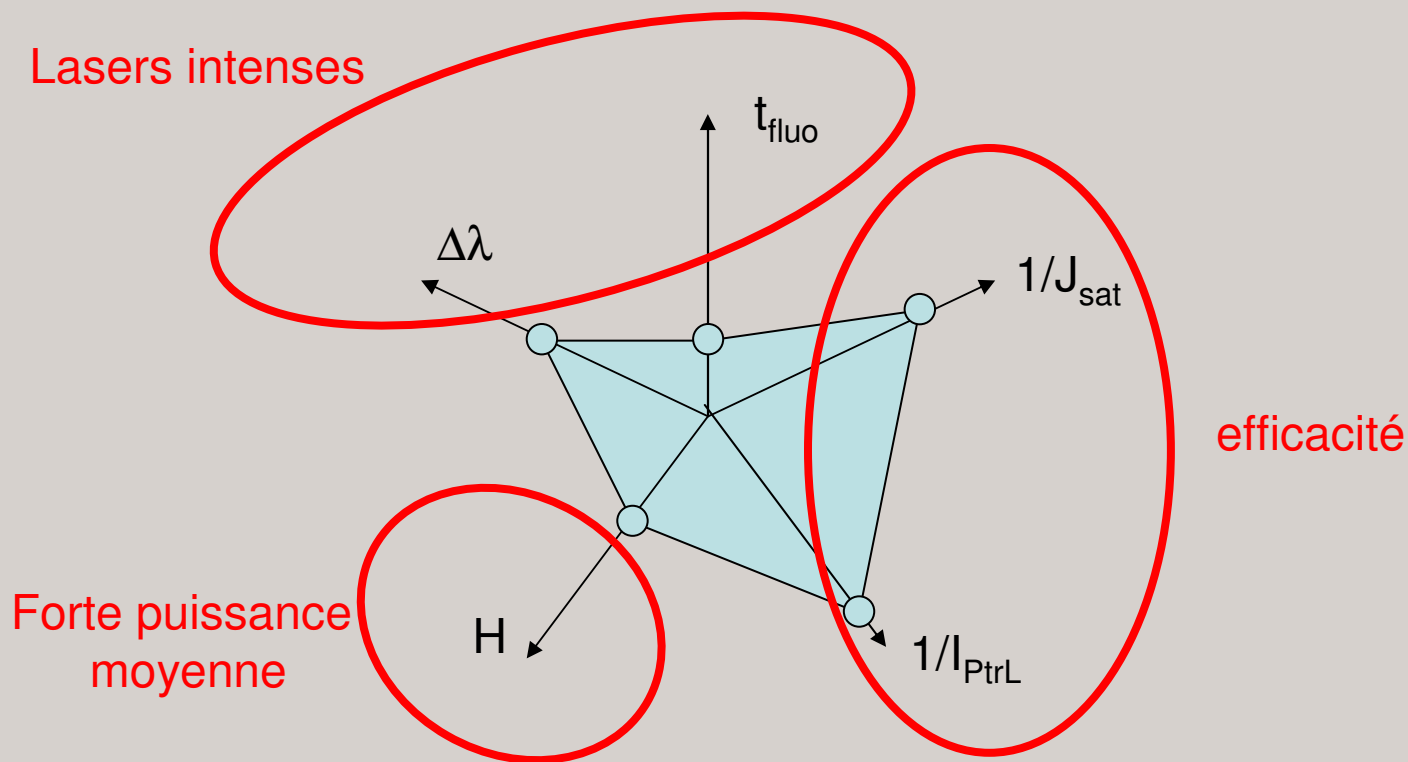
indice nonlinéaire

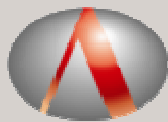


On peut proposer 5 paramètres clés :

1. Temps de fluorescence t_{fluo} : capacité à stocker de l'énergie
2. Fluence de saturation J_{sat} : capacité à extraire l'énergie
3. Intensité de transparence I_{ptrL} : énergie stockée inutilisable
4. Largeur de gain spectral $\Delta\lambda$: potentiel femtoseconde
5. Vergence normalisée H : lentille thermique

Lasers intenses

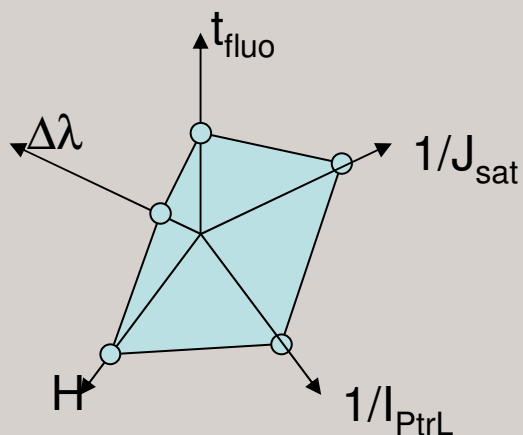




Amplitude

SYSTEMES

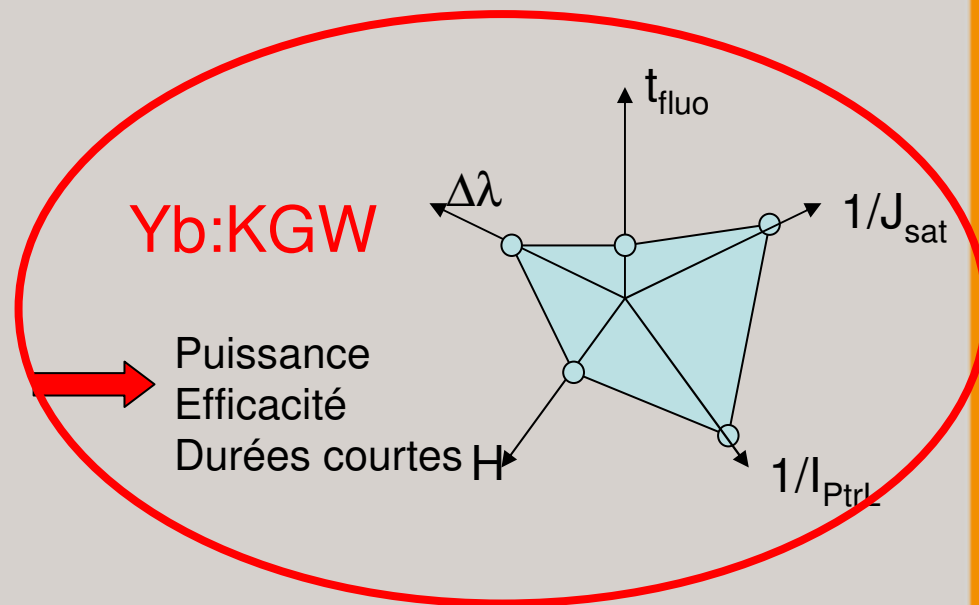
Quelques matériaux...



Yb:YAG



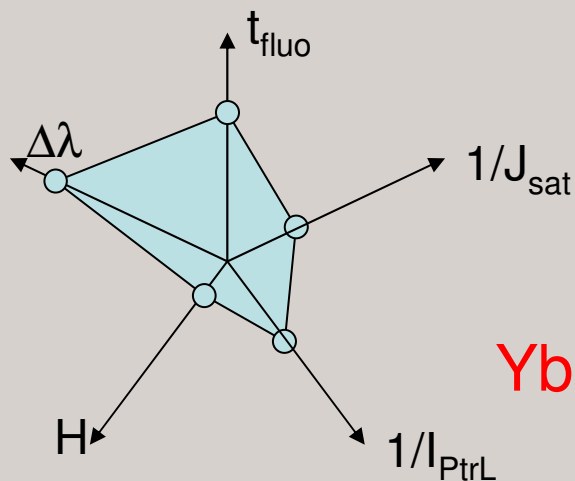
Puissance
Efficacité
Durées longues



Yb:KGW



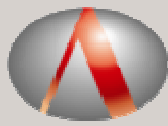
Puissance
Efficacité
Durées courtes



Yb:verre



Durées courtes
Faible puissance
Faible efficacité



Amplitude

SYSTEMES

Et pourtant...

IPG Photonics YLR-HP Series: 1-10kWatt Ytterbium Fiber Lasers^{wer}

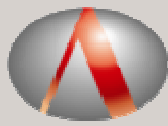


- Over 20% Wall-Plug Efficiency
- Excellent Beam Parameter Product
- >50,000 Hours Pump Diode Lifetime
- Air or Water Cooled Versions
- Maintenance Free Operation
- Up to 200 m Fiber Delivery
- 2 Year Warranty

*Latest performance, May 2004
5.5 kW, 4.3 mm-mrad, 100-um
fiber delivery*

Paradoxe :

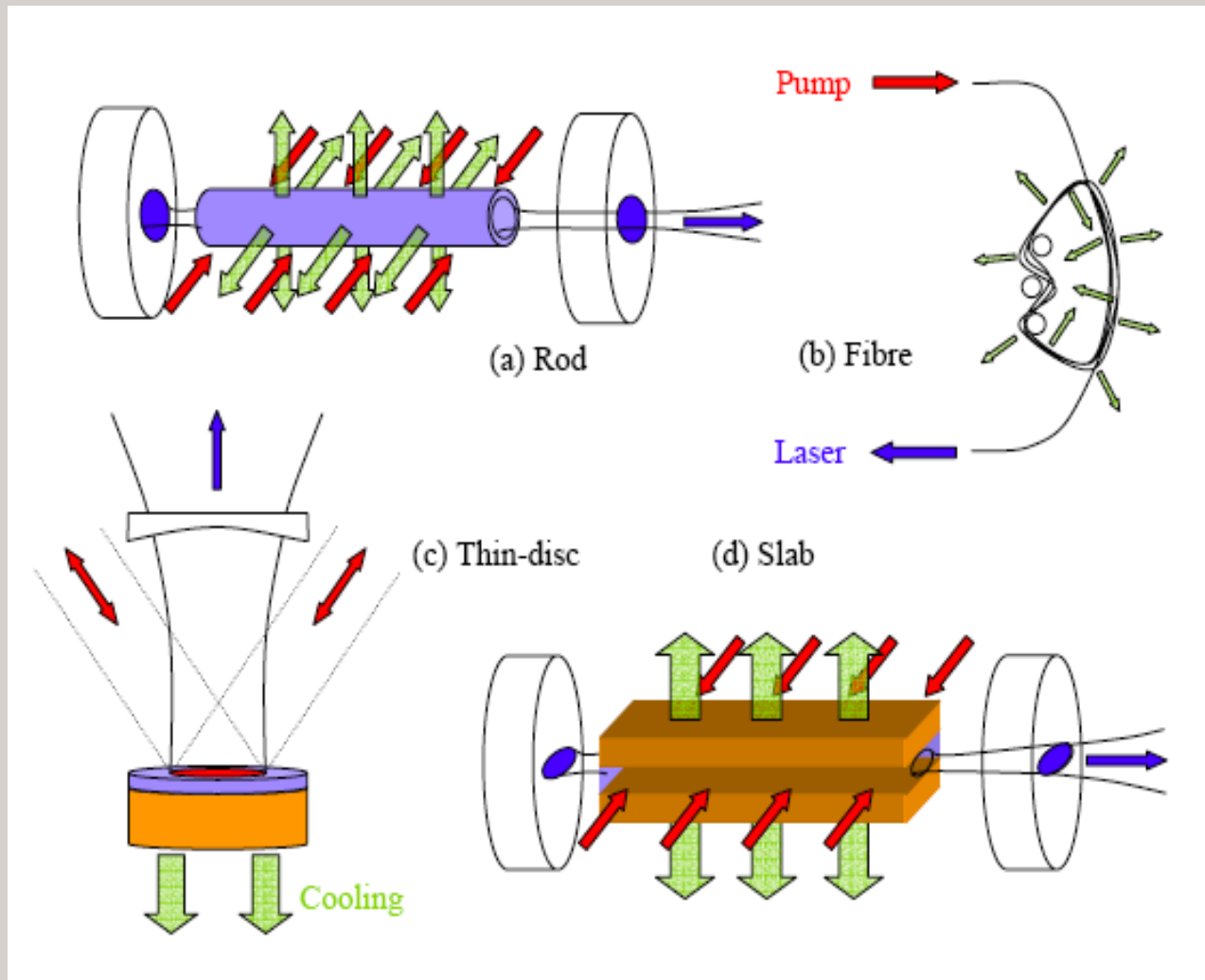
Le **plus mauvais** matériau permet d'atteindre les **plus fortes puissances** moyennes!

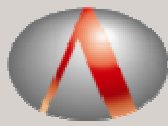


Amplitude

SYSTEMES

Importance architecture laser

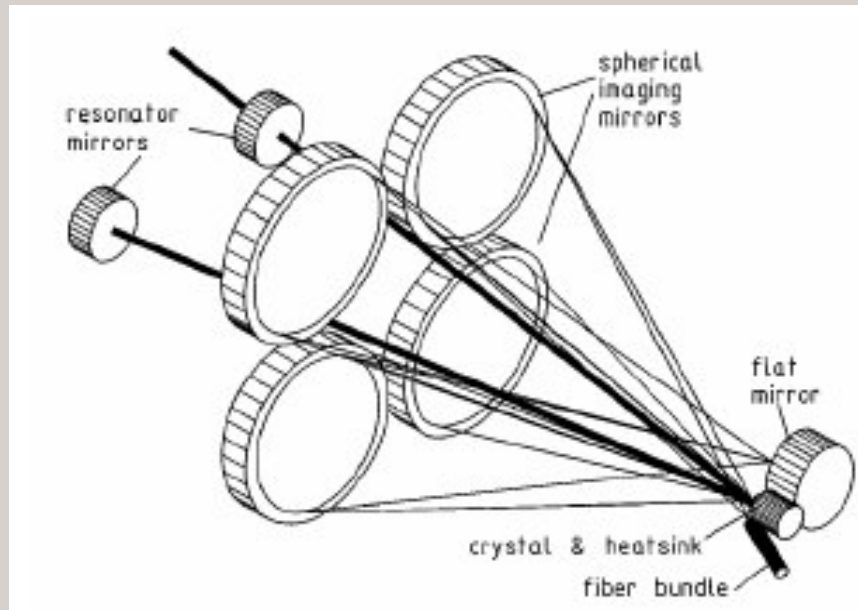




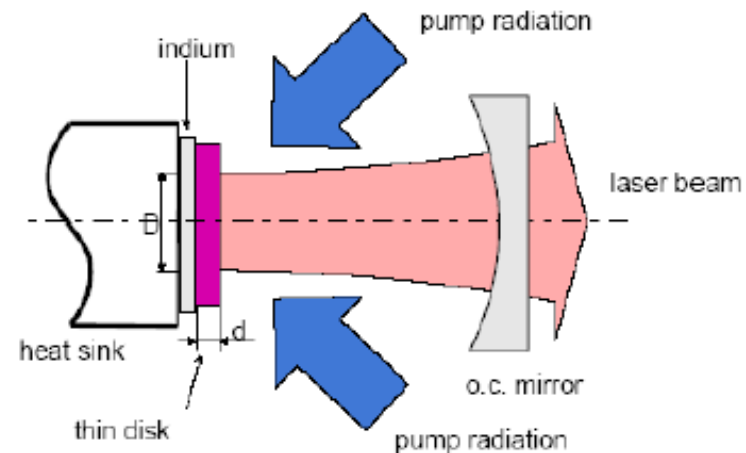
Amplitude

SYSTEMES

Concept du thin disk



Matériau : Yb:YAG pompé @940 nm
Epaisseur : ~200μm

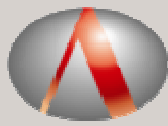


Intérêts :

- refroidissement longitudinal et non radial = lentille thermique réduite
- inversion plus homogène
- faibles nonlinéarités

Inconvénients :

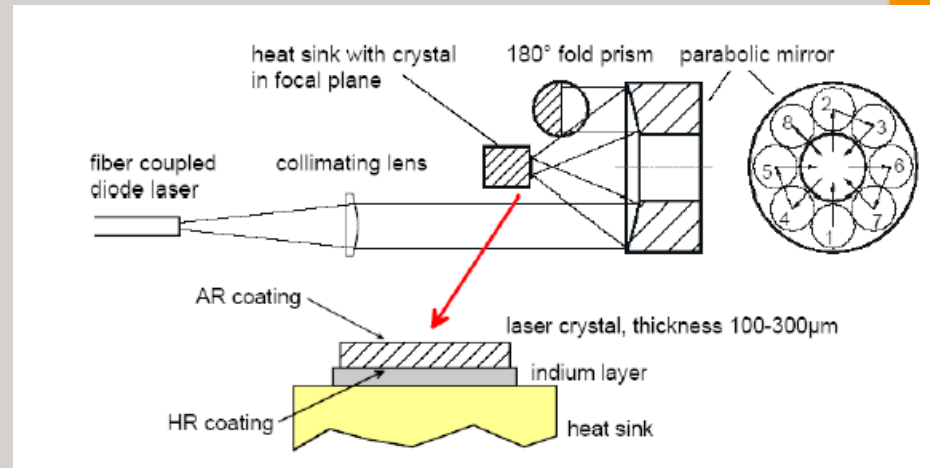
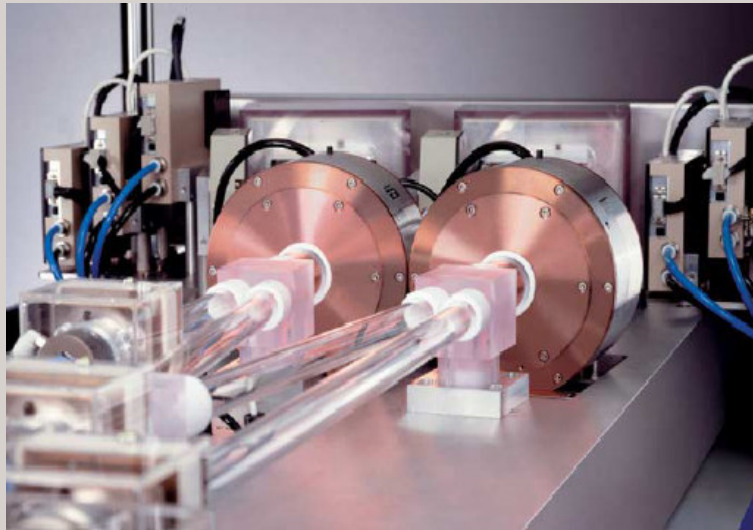
- gain longitudinal par passage faible
- gain radial augmente avec taille de pompe = ASE transverse



Amplitude

SYSTEMES

“Thin Disk” Laser



Thin-disk commerciaux : Yb:YAG (limité à picoseconde)

Thin-disk femto en labo :

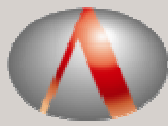
- Yb:YCOB
- Yb:KYW
- Yb:Y₂O₃
- Yb:CALGO à venir...

Performances :

Plusieurs kW en fonctionnement multimode, efficacité >40%

Plusieurs 100W en fonctionnement monomode

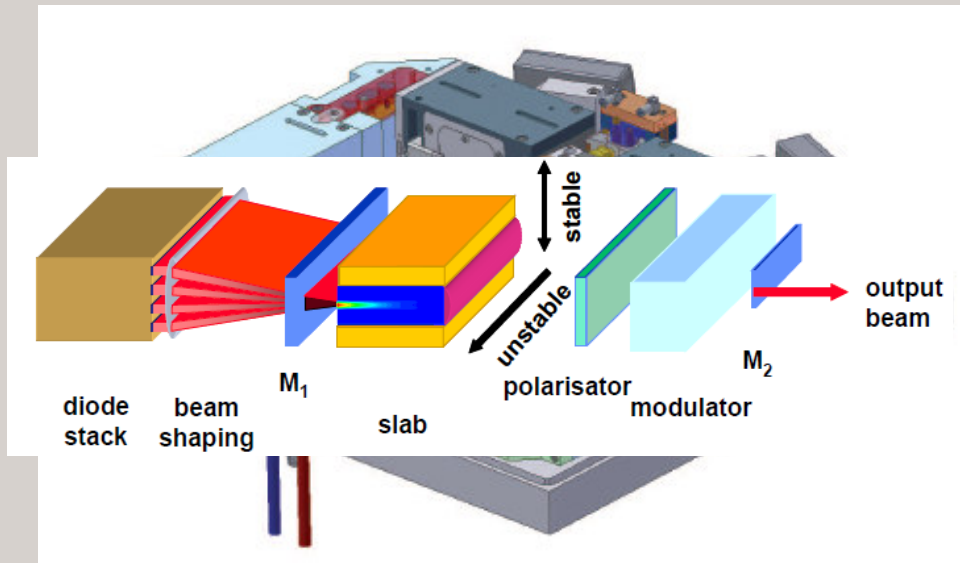
Possibilité de l'utiliser en régime régénératif à 50W 1 ps



Amplitude

SYSTEMES

Innoslab



Yb:YAG

Pompe 2x480W remis en forme

Performances

400W 5,3 μ J 680fs @76MHz

350W 3,5mJ 720fs @100kHz

420W 420 μ J 720fs @1MHz

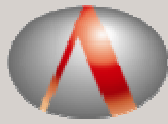
Injecteur ~3W

Intérêts :

- refroidissement transverse efficace = lentille thermique cylindrique
- gain élevé (x100) : ampli CW, pas besoin de cellule de Pockels
- bon recouvrement = bonne efficacité

Inconvénients :

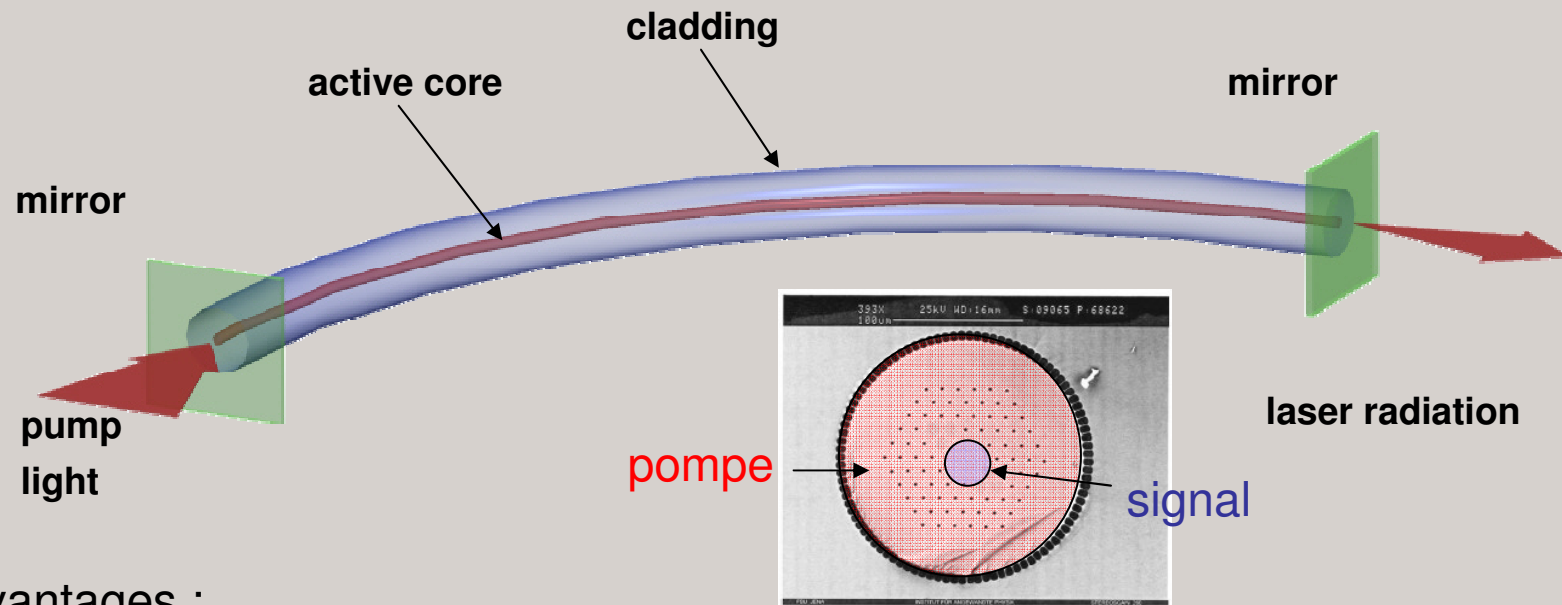
- mise en forme pompe complexe
- architecture peu flexible (compensation lentille)



Amplitude

SYSTEMES

Amplificateur à fibre



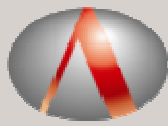
Avantages :

- Recouvrement pompe-signal optimal
- Fort gain (malgré faible gain linéique!)
- Répartition du dépôt thermique sur grand volume
- Guidage : annule effet lentille thermique
- Large spectre de gain

Inconvénients :

- Petit mode laser : limité par nonlinéarités ou dommage

Lasers efficaces (>50%) et forte puissance moyenne (kW)



Amplitude

SYSTEMES

Des technologies prometteuses

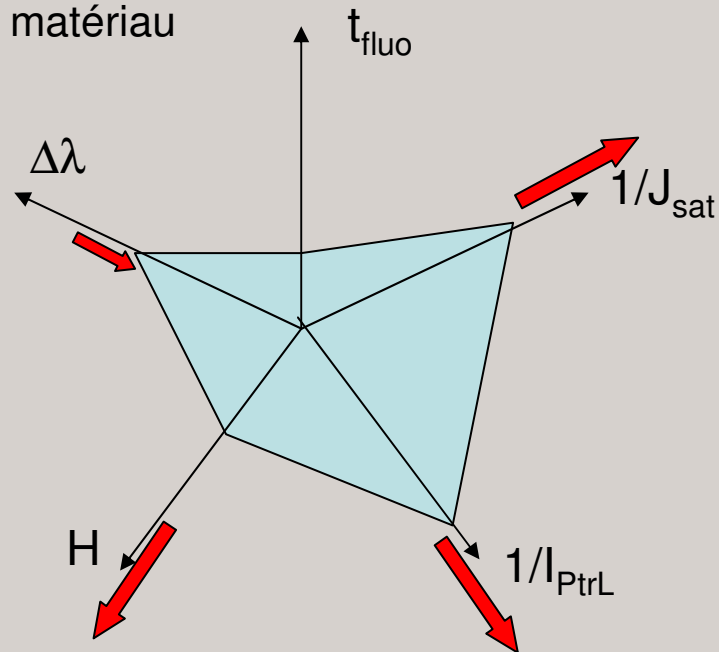
Nouvelles matrices : Yb:CaF₂ (cf P. Camy)

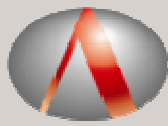
Structure microscopique : céramiques (cf M. Mortier, V. Cardinali)

Structure macroscopique : fibres cristallines (cf F. Balembois)

Température d'utilisation : cryogénie (cf P. Camy, V. Cardinali)

Cryogénie = nouveau matériau





Amplitude

SYSTEMES

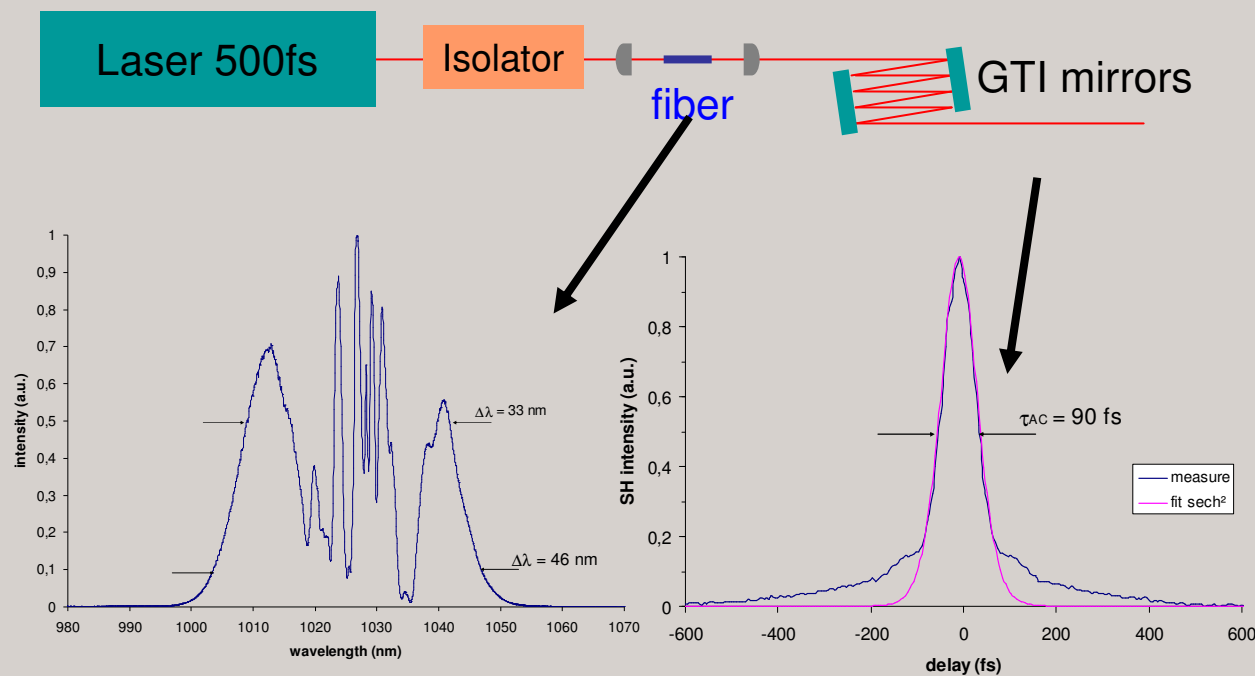
Optique nonlinéaire : postcompression

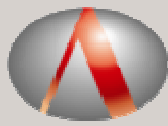
Exploitation des tenseurs χ^3 : effet Kerr

Automodulation de phase pour enrichir le spectre de l'impulsion initiale (ici 500fs 5nm)

Module dispersif pour comprimer l'impulsion <100fs

- dans une fibre (limite 1 μ J)
- dans un capillaire rempli de gaz (limite mJ)





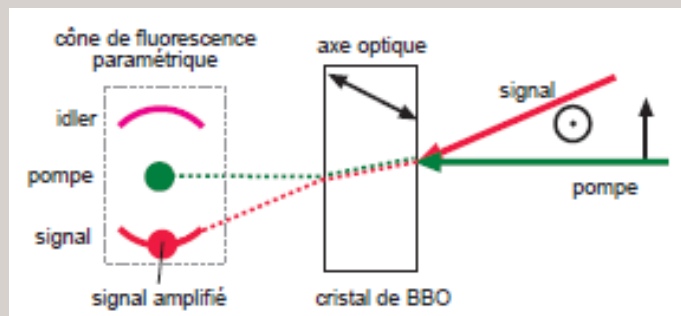
Amplitude

SYSTEMES

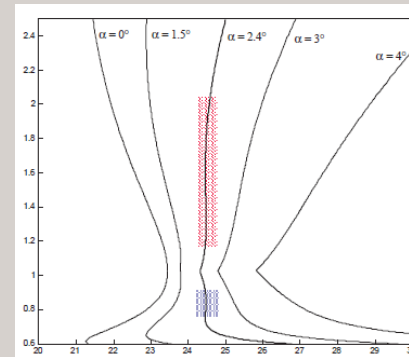
Optique nonlinéaire : OPA

Exploitation des tenseurs χ^2 : amplification paramétrique

En configuration non-colinéaire, accès à une bande spectrale >100nm !



Source : thèse A Courjaud



large spectre de gain

Le matériau à gain est le cristal nonlinéaire

Le laser devient la pompe

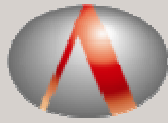
Phénomène instantané : besoin synchronisation parfaite avec le signal

Absence d'effets thermiques : intérêt pour lasers de puissance

OPCPA : Schéma envisagé sur la plupart des front-end de chaînes PW

PETAL, PHELIX, ILE, ELI... intérêt contraste et largeur spectrale

→ Un laser de pompe picoseconde permet de générer des impulsions 5fs



Amplitude

SYSTEMES

Catalogue des idées reçues

Idée reçue

Pour la forte puissance moyenne :
Besoin de cristaux bons thermiquement

Pour l'efficacité laser :
Besoin matériaux à forte section efficace
...pour modules à fort gain

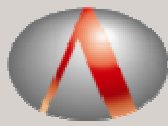
Pour les impulsions courtes :
Besoin de cristaux large bande

Contre-exemple

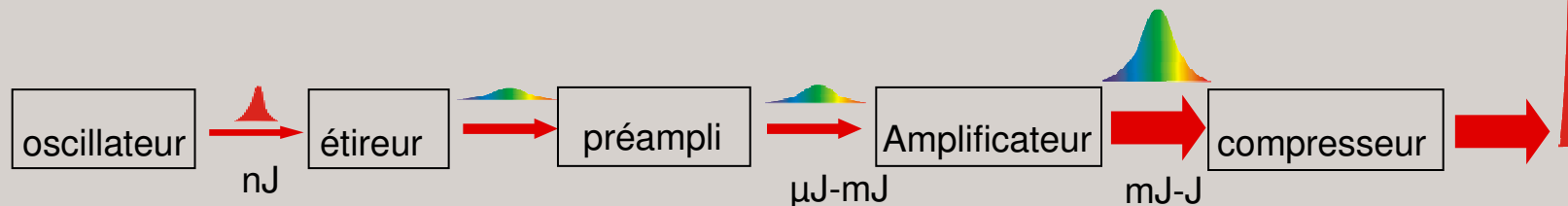
lasers à fibre

lasers à fibre
thin disk

optique nonlinéaire



Lasers intenses : gestion spectrale vs nonlinéarités (CPA)



Oscillateur :

- Cristaux laser : impulsions purement soliton, énergie 10-100nJ
- Fibres : compact, énergie modérée

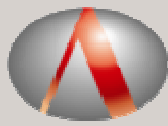
Amplificateurs :

- Cristaux laser : amplificateurs régénératifs & multipassages (limitations thermiques)
- Fibres : Amplificateurs simple passage (limitations par les nonlinéarités)

Exploitation OPA :

- Injecteur large bande, contraste élevé
- Amplificateur large bande

➡ Architectures hybrides pour tirer profit de l'intérêt des diverses technologies

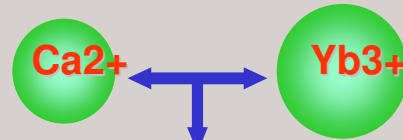
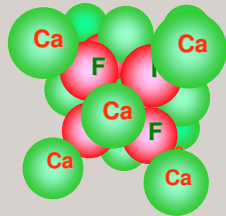


Amplitude

SYSTEMES

Evaluation de cristaux : Yb:CaF₂

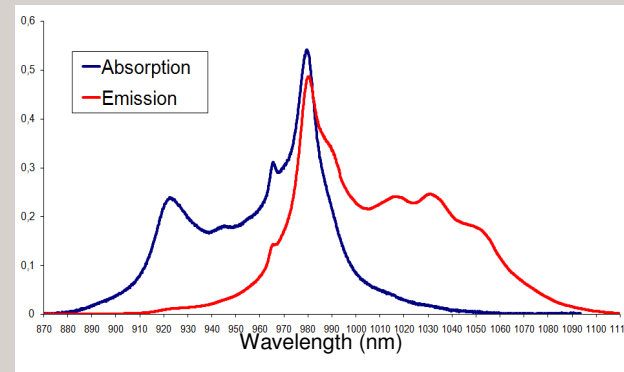
Multisite



Charge compensation

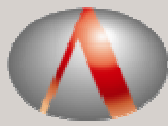
Crystalline reorganization
Clusters

Broad bands



Experimental demonstrations :

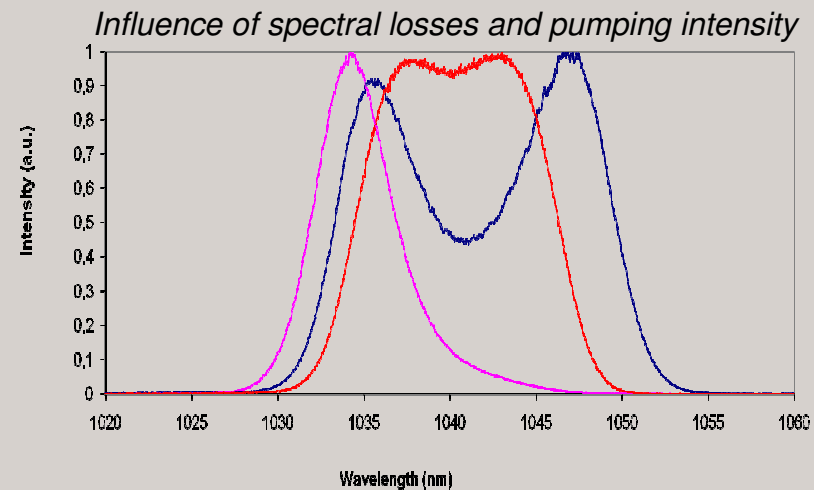
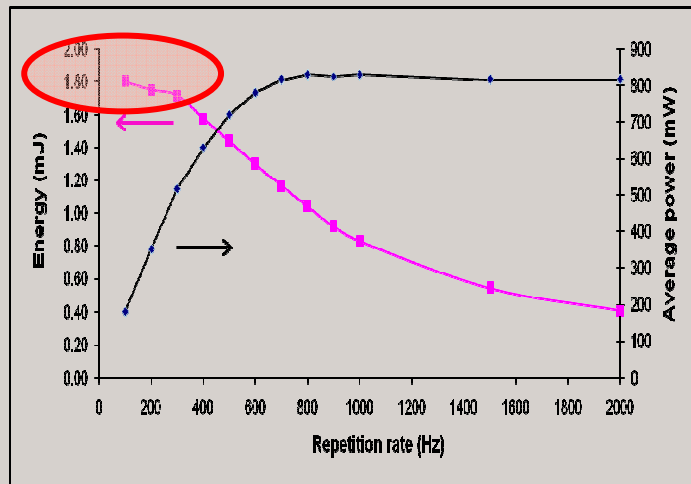
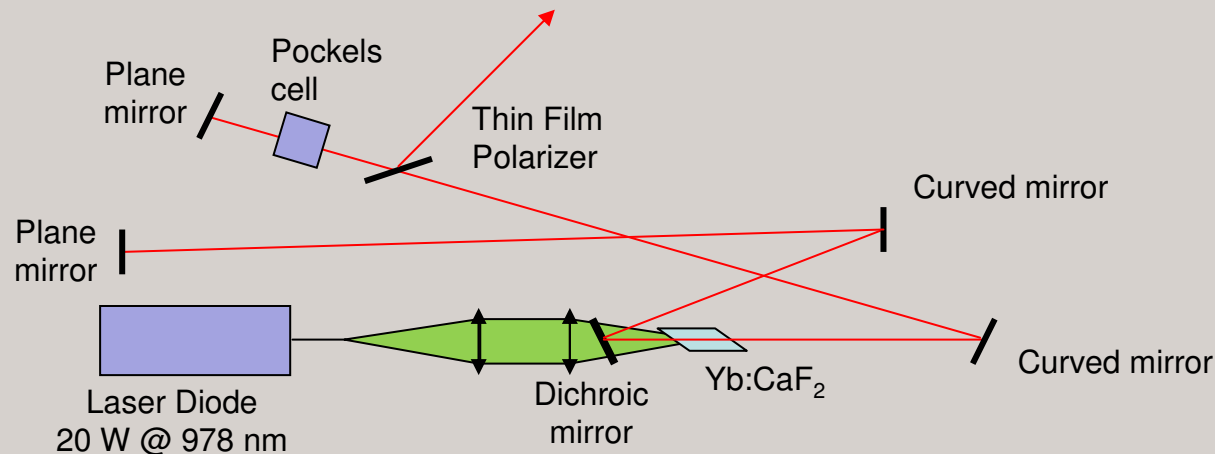
- Tunability : 1018 – 1072 nm
Lucca et al, Opt Lett, 29, 1879 (2004)
- Femtosecond oscillator : 150 fs @ 1043 nm
Lucca et al, Opt Lett, 29, 2767 (2004)
- High energy amplification : 190 mJ 190 fs @1Hz
Siebold et al, Opt Lett, 33, 2770 (2008)



Amplitude

SYSTEMES

Regenerative amplifier results

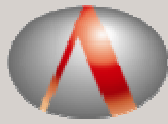


Output energy : up to 6,5 mJ at 10Hz and 1,8mJ at 200Hz

Central wavelength : from 1030 to 1050 nm

CPA chain : 180 fs from 100Hz to 10kHz

Ricaud et al, Opt.Lett **35**, 2314 (2010)

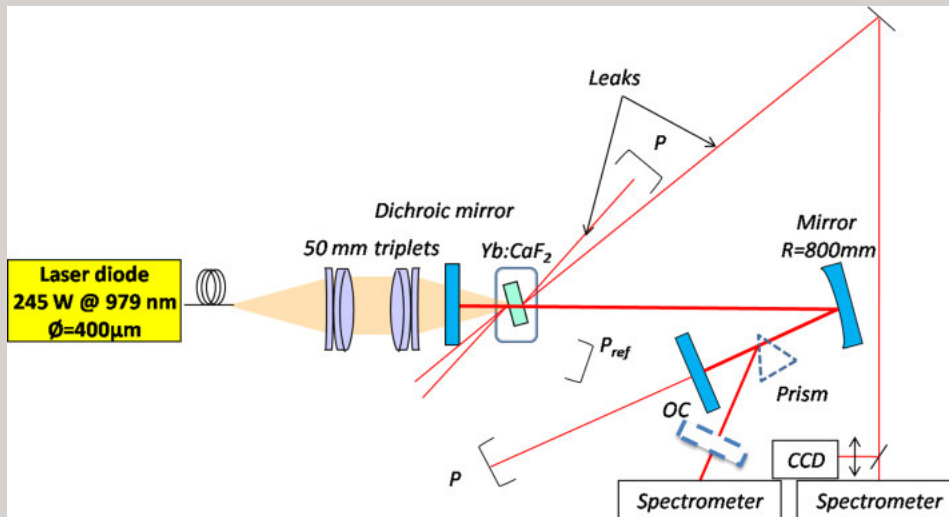


Amplitude

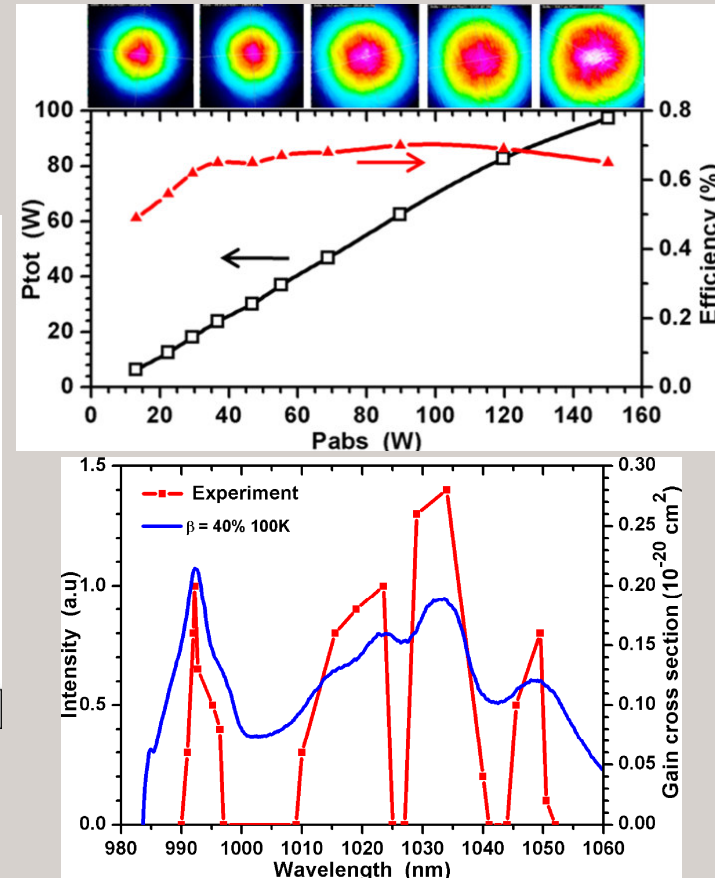
SYSTEMES

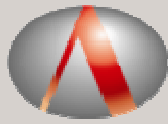
Exploring cryogenic temperature

LCFIO collaboration :
97W achieved pumped with 245W !
Submitted to Optics Letters



Very efficient system with high gain
Several spectral operations : 992 to 1050nm!
Strong potential for short pulse generation, high energy and high average power





Amplitude

SYSTEMES

Solutions hybrides

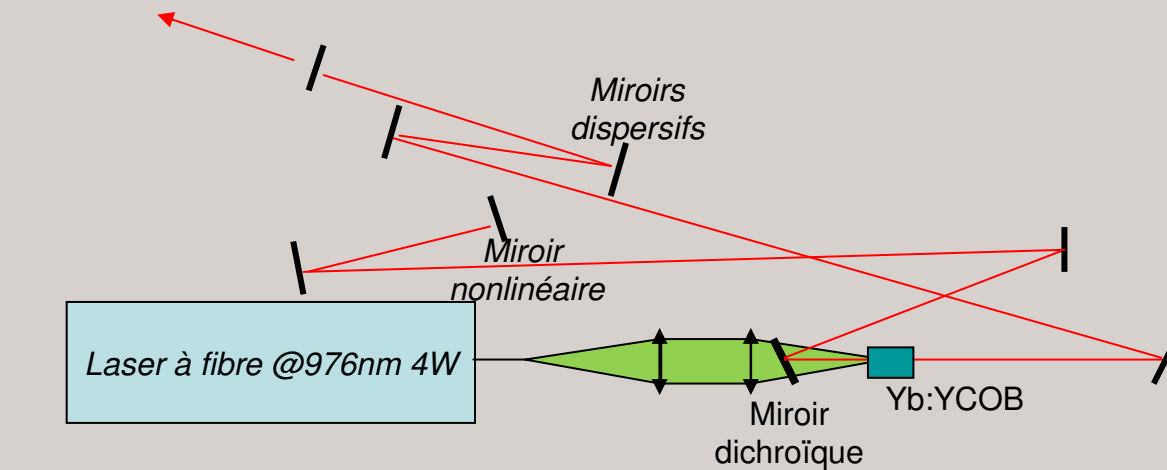
Nouvelles sources développées à Bordeaux : laser à fibre monomode @976nm (cf E. Cormier)

Potentiel pour le pompage de matériaux laser, intérêt :

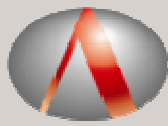
Cristaux longs sur faible section pour gain et effets nonlinéaires en oscillateur

Possibilité d'exploiter des cristaux peu absorbants

Test avec cristal Yb:YCOB en oscillateur



* Collaboration Azur Light Systems

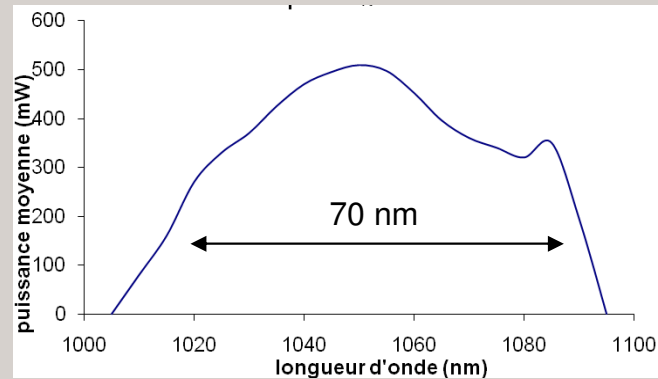


Amplitude

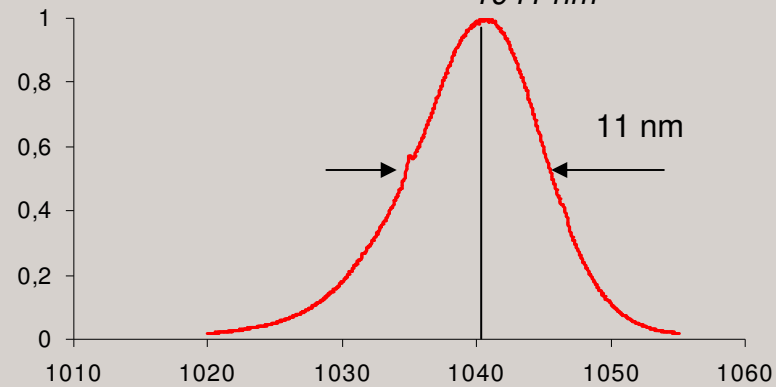
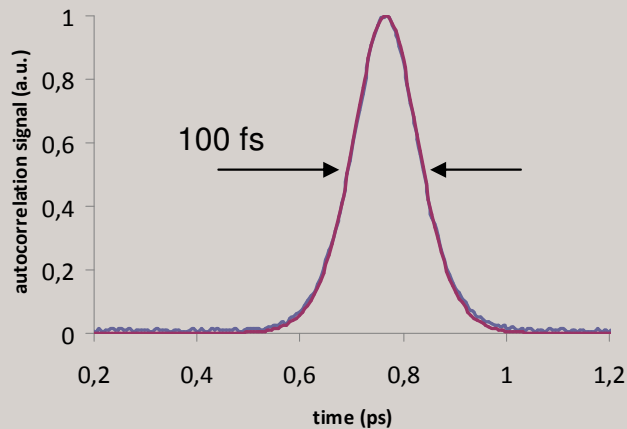
SYSTEMES

Solutions hybrides

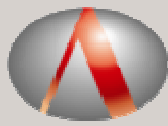
Accordabilité en CW :



Régime impulsionnel : **500 mW, 100 fs, 100 MHz @1040-1045nm**



➔ Intérêt pour l'injection d'amplificateurs large bande centrés @1040nm



Conclusion & perspectives

Développement nouveaux cristaux utile, mais selon quels critères?

La gestion gain & thermique doit être incluse dans le développement

La cryogénie ouvre une nouvelle dimension d'optimisation

Perspectives :

Intérêt des lasers Ytterbium pour les lasers intenses :

- nanoseconde : pompage Ti:Sa
- picoseconde : pompage OPCPA
- femtoseconde : CPA direct

Envisager solutions hybrides cristaux/fibres