

# Sources femtoseconde pompées par diode

---

Frédéric Druon

Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique -  
École Supérieure d'Optique, Orsay, France

UMR 8051 du CNRS

- Introduction
- Lasers fs à base de verres dopés
- Lasers fs à base de cristaux dopés
  - aux ions  $\text{Cr}^{3+}$
  - aux ions  $\text{Yb}^{3+}$
- Lasers fs à base de fibres dopées
- Conclusion

- Introduction
- Lasers fs à base de verres dopés
- Lasers fs à base de cristaux dopés
  - aux ions  $\text{Cr}^{3+}$
  - aux ions  $\text{Yb}^{3+}$
- Lasers fs à base de fibres dopées
- Conclusion

## Types de dopants

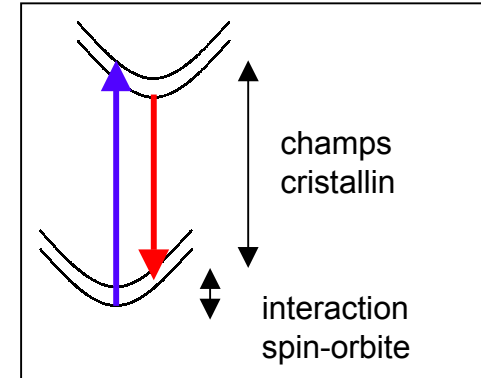
- Ions métalliques dans les cristaux



$Ti^{3+}$   $\Rightarrow$  **Ti:saphir**

$Cr^{3+}$   $\Rightarrow$  Cr:LiSAF, Cr:LiSGaF, Cr:LiCAF (colquirites)

$Cr^{4+}$   $\Rightarrow$  Cr:forsterite, Cr:YAG

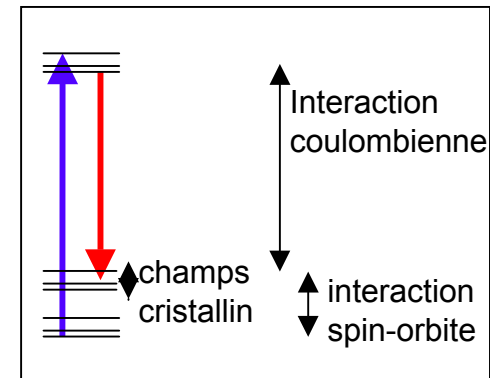


- Ions terres rares dans les cristaux les verres et les fibres

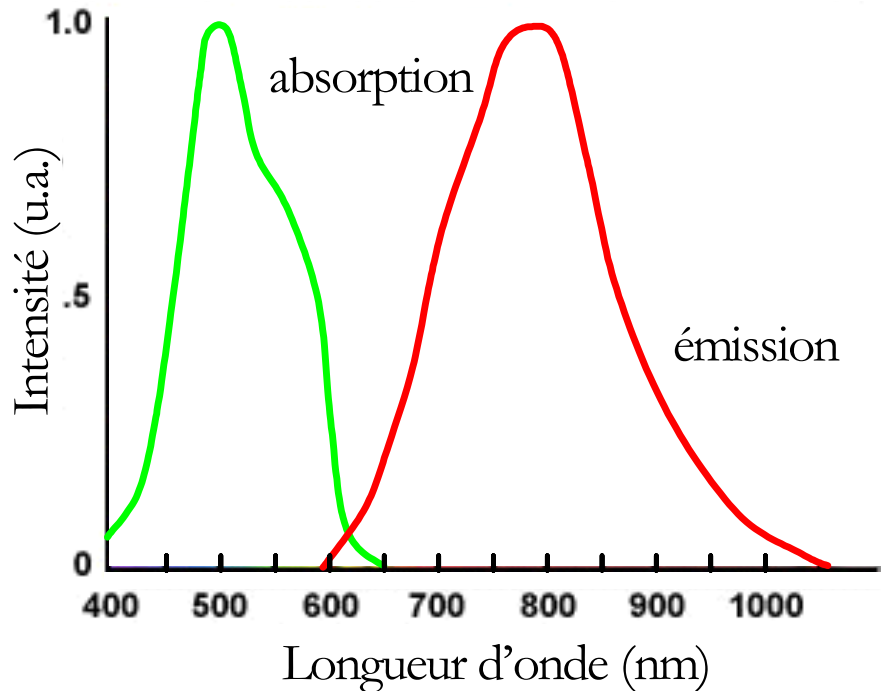
$Nd^{3+}$   $\Rightarrow$  Nd:verre, Nd:fibres

$Yb^{3+}$   $\Rightarrow$  Yb:verre, Yb:cristaux, Yb:fibres

$Er^{3+}$   $\Rightarrow$  Er:fibres



# Caractéristiques du Ti:saphir



Spectre large

Durée ultra-brève 5 fs



Pompé dans le vert

- Mais aussi...



Conductivité thermique  
exceptionnelle :  $\kappa=35\text{W/m/K}$

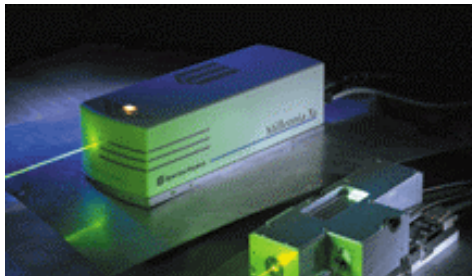
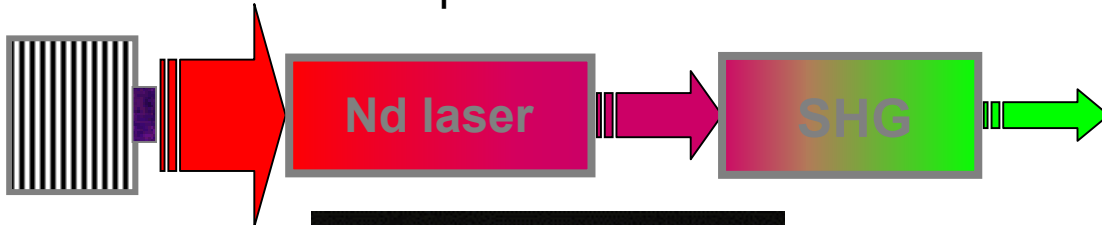
# Le revers de la médaille du Ti:saphir



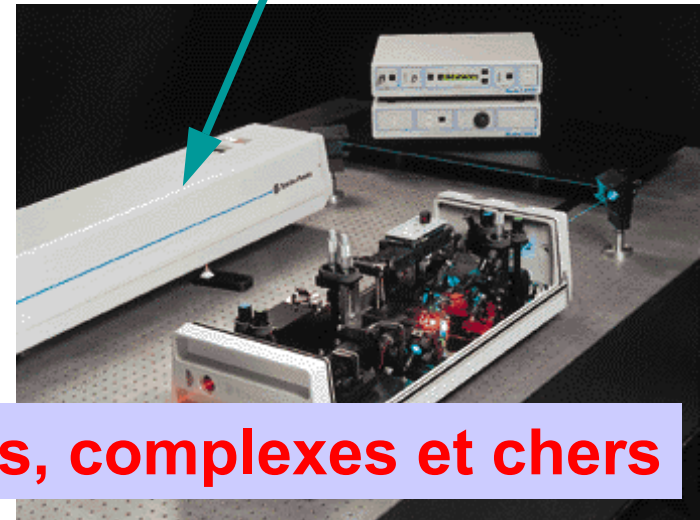
Pompé dans le vert

- Laser Nd:YVO4 pompé par diode puis doublé en fréquence

Diode de très forte puissance

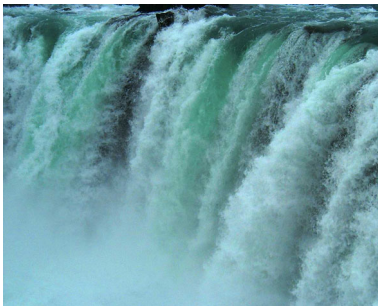


- Le laser Argon



**Systemes peu compacts, peu efficaces, complexes et chers**

# Concrètement



- Consommation électrique
  - ~ 1kW électrique donne 1W optique (**efficacité= 0,1%**)
- Refroidissement
- Coût
  - fabrication, utilisation, entretiens, etc.

# Nouvelle génération de sources

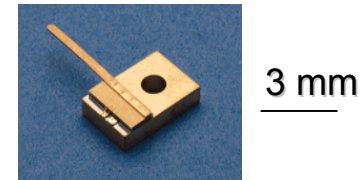
---

- Le but visé (ce que les utilisateurs demandent):  
Lasers à impulsions **ultra-brèves**:  
Efficaces, simples, compacts, robustes,  
fiables et pas chers
- Intérêt :
  - Chaînes laser de forte énergie et à haute cadence
  - Applications industrielles: micro-usinage athermique, chirurgie...

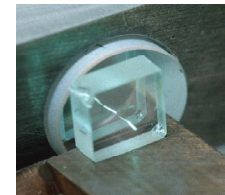


# La solution du pompage par diode

- Efficacité
  - 20 à 50%
- Compacité
- Fiabilité (10 000 heures)
- Sans maintenance
- Forte puissance disponible: 1W to kW



 Mais il faut les BONS matériaux.



# Les matériaux pour la femto et « pompables » par diode

---

Dans l'état de l'art actuel les principaux matériaux sont:

- Les verres dopés  $\text{Nd}^{3+}$  et  $\text{Yb}^{3+}$
- Les cristaux dopés  $\text{Cr}^{3+}$  et  $\text{Yb}^{3+}$
- Les fibres dopées  $\text{Yb}^{3+}$  et  $\text{Er}^{3+}$

- Introduction
- Lasers fs à base de verres dopés
- Lasers fs à base de cristaux dopés
  - aux ions  $\text{Cr}^{3+}$
  - aux ions  $\text{Yb}^{3+}$
- Lasers fs à base de fibres dopées
- Conclusion

# Les verres dopés pour la femto



Connus et étudiés depuis longtemps  
– Les premiers TW



Faciles à élaborer en grande taille



Matériaux amorphes => spectres larges



Matériaux amorphes => faibles gains

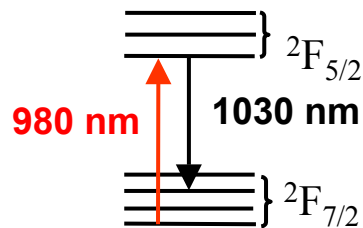


Matériaux amorphes => Mauvaise conductivité thermique :  $\kappa < 1$  W/m/K

# Les ions dopants pour les verres

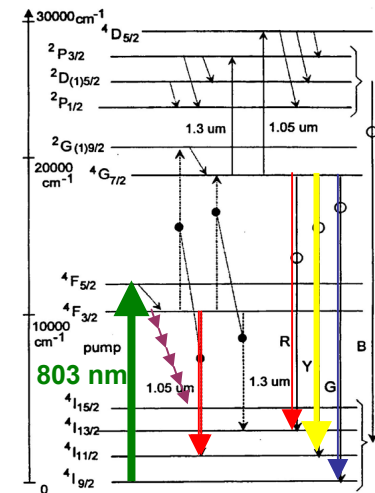
- Deux acteurs principaux :  $\text{Yb}^{3+}$  et  $\text{Nd}^{3+}$

- $\text{Yb}^{3+}$



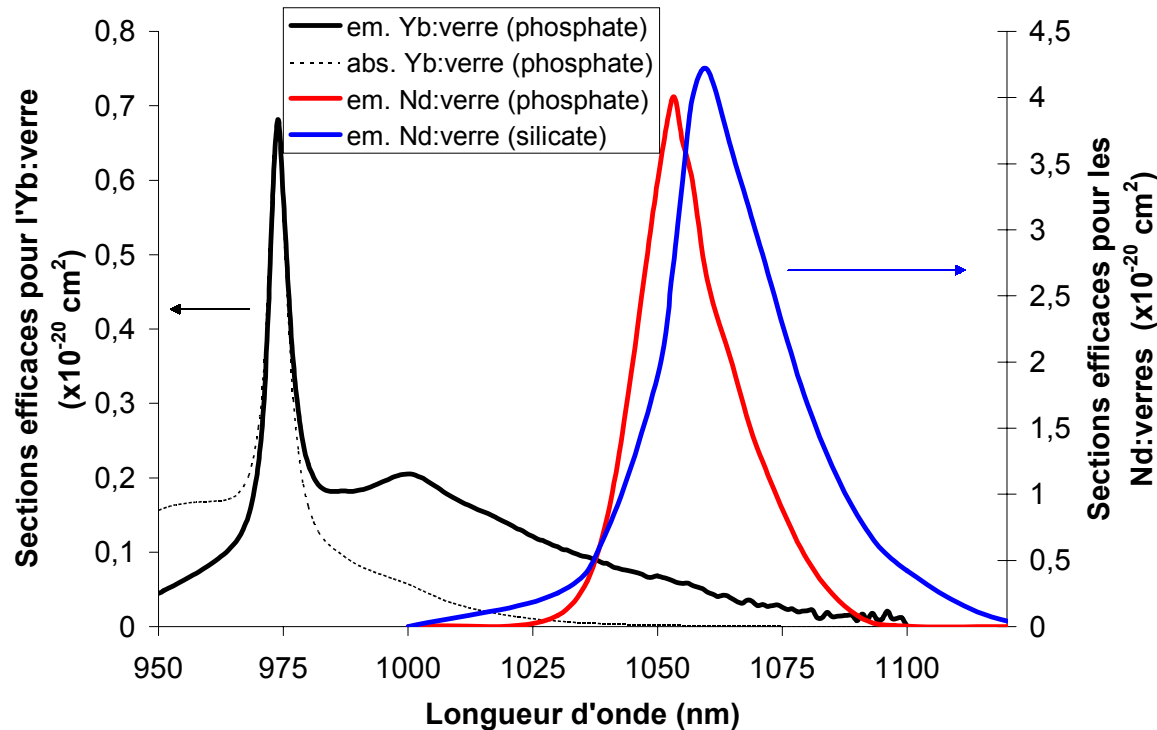
- Structure électronique simple  
=> pas d'effet parasite
- Faible défaut quantique
- Quasi trois niveaux

- $\text{Nd}^{3+}$



- Structure électronique complexe  
=> effets parasites

# Spectroscopie des verres Nd<sup>3+</sup> et Yb<sup>3+</sup>



• Yb<sup>3+</sup>

• Nd<sup>3+</sup>

- Faibles sections efficaces => **Gain faible**
- Largeur spectrale  $\approx 35 \text{ nm}$  => **durée théorique minimum: 30 fs**

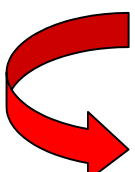

- Fortes sections efficaces => **Gain plus important**
- Largeur spectrale  $\approx 20 \text{ nm}$  => **durée théorique minimum: 50 fs**

# Résultats expérimentaux

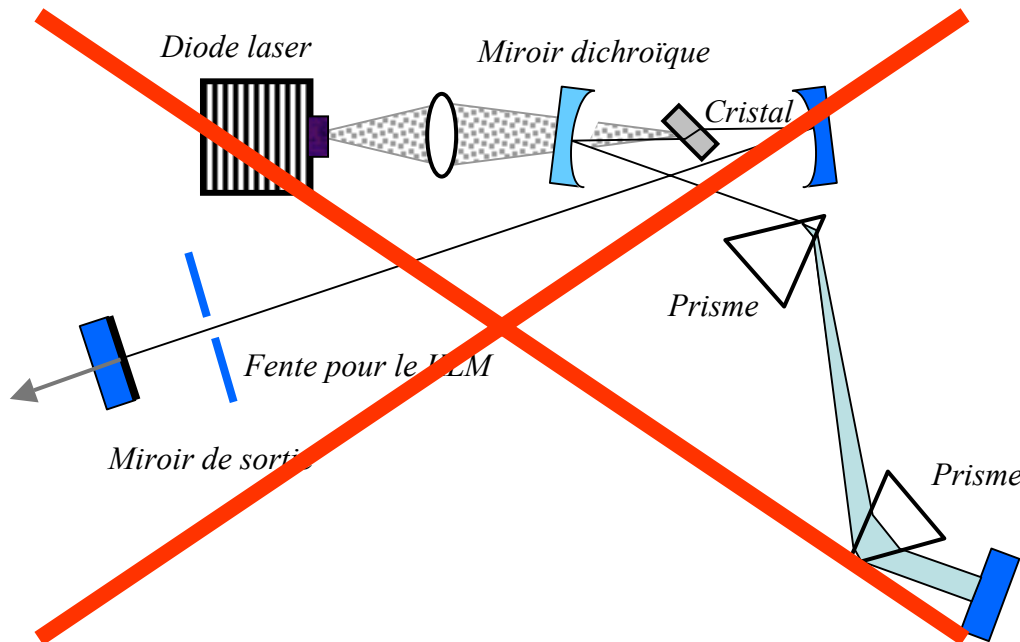
---

- Les oscillateurs femtoseconde

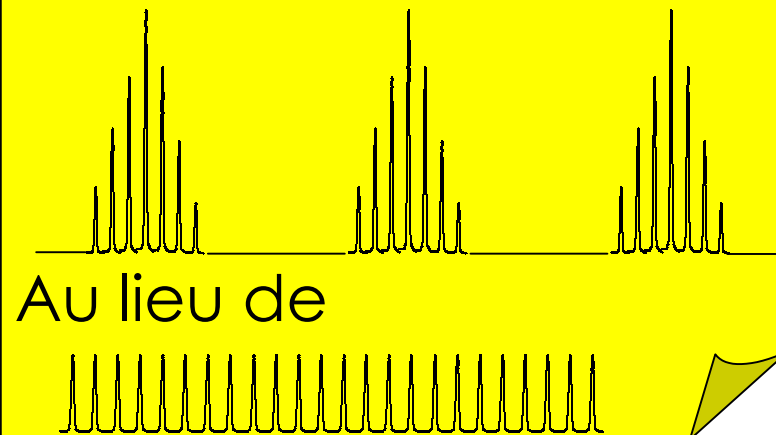
# Les oscillateurs à base de matériaux dopés $\text{Yb}^{3+}$ ou $\text{Nd}^{3+}$



 Durée de vie longue : Nd:  $360 \mu\text{s}$   
 Yb:  $1300 \mu\text{s}$

Verrouillage des modes en phase par lentille Kerr (KLM) difficile

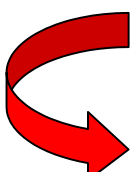



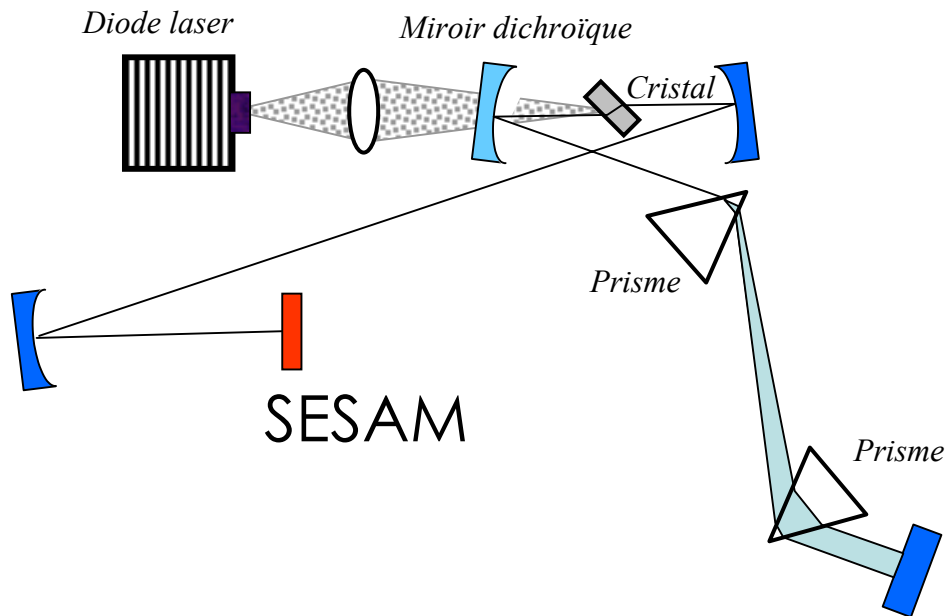
- *Durée de vie longue*  
 $\Rightarrow$  Forte tendance au « Q-switch Modelock »





# Les oscillateurs à base de matériaux dopés $\text{Yb}^{3+}$ ou $\text{Nd}^{3+}$

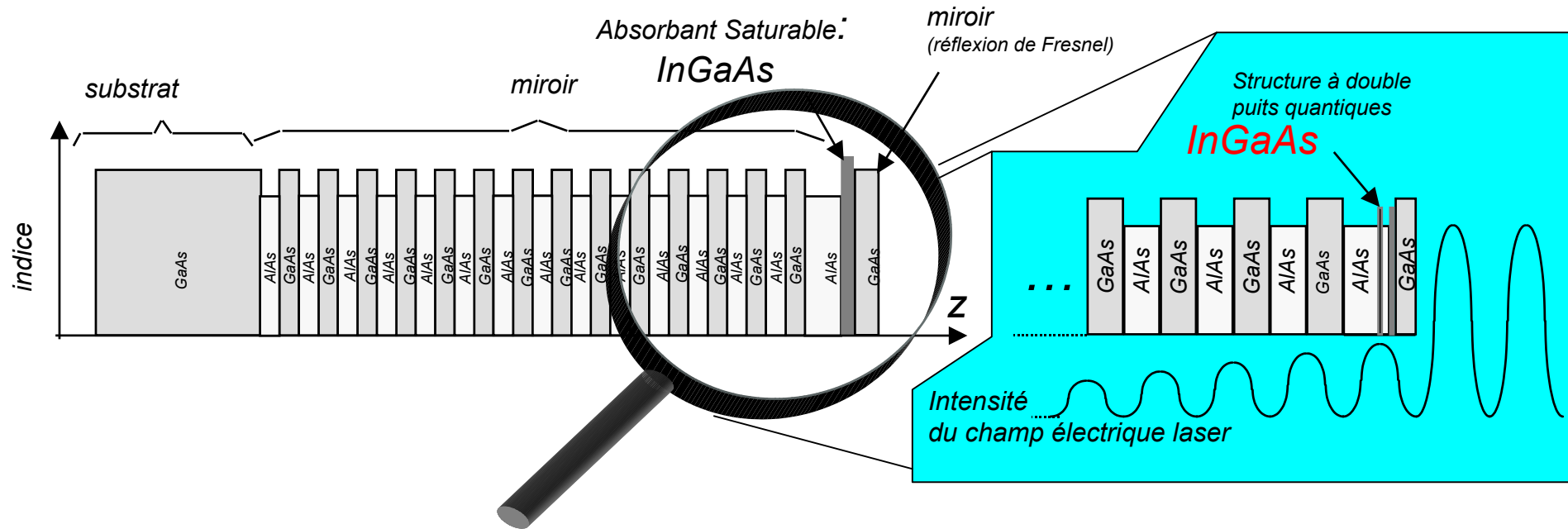
  Durée de vie longue :  
Verrouillage des modes en phase  
par lentille Kerr (KLM) difficile



⇒ Utilisation d'un absorbant saturable de type SESAM (SEmiconductor Saturable Absorber Mirror)

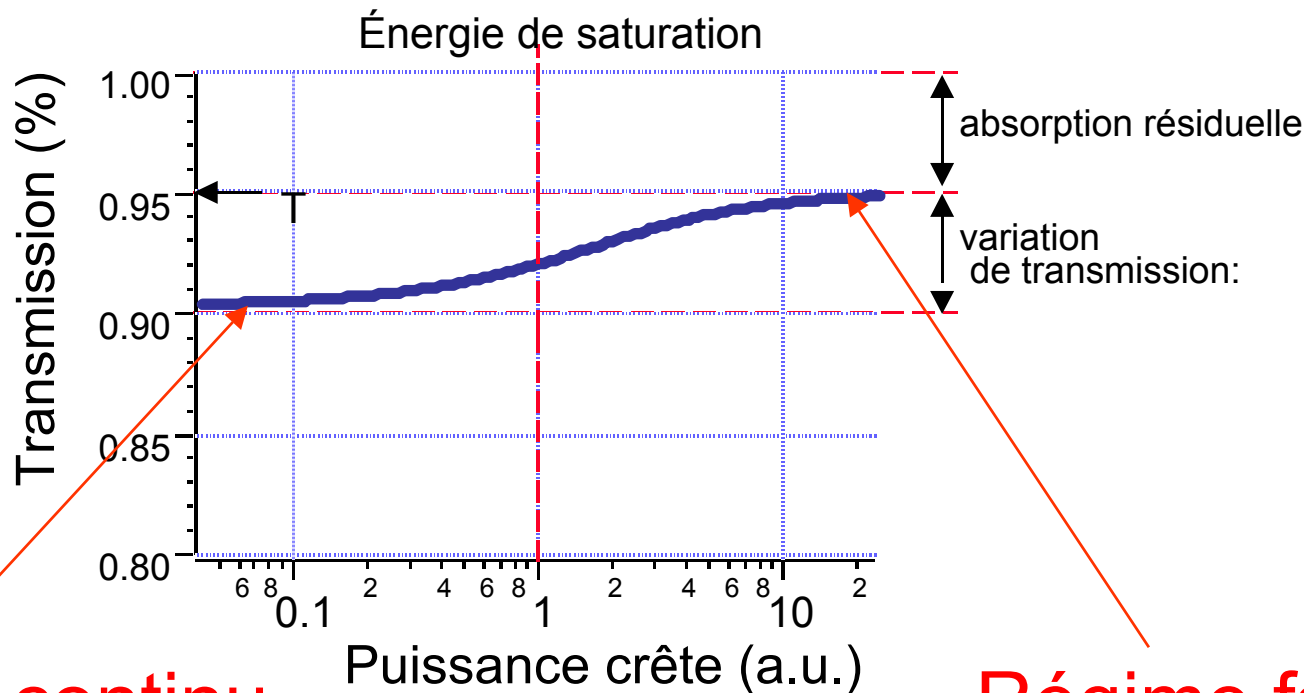
# Qu'est ce qu'un SESAM ?

## Miroir à absorbant saturable semi-conducteur (rapide)



- Indispensable pour des oscillateurs fs stables

# Comment fonctionne un SESAM ?



## Régime continu

Puissance crête faible  
Absorbant non-saturé  
Fortes pertes

Régime défavorisé

## Régime fs

Puissance crête élevée  
Absorbant saturé  
Faibles pertes

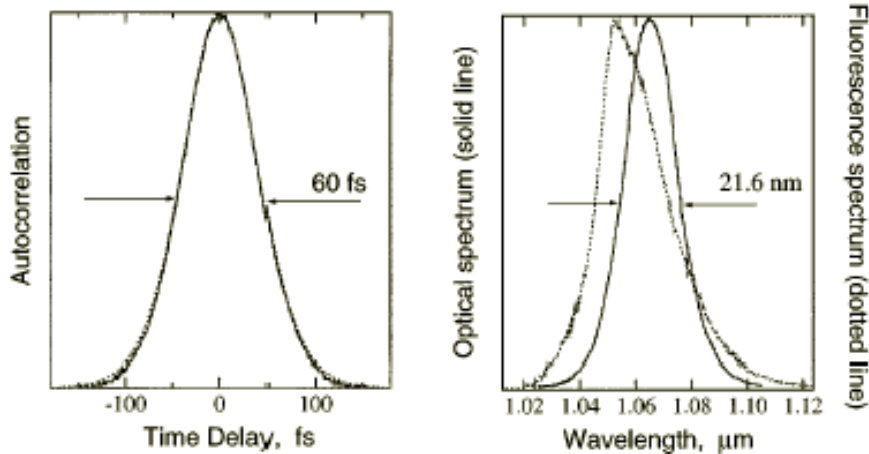
Régime favorisé

# Résultats expérimentaux: les oscillateurs

- Nd

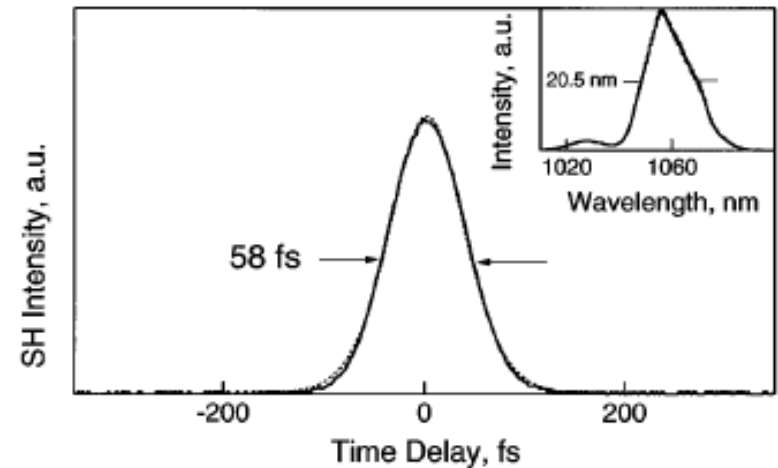
**60 fs** 80 mW  $114 \text{ MHz}$   
 $\lambda = 1.06 \text{ } \mu\text{m}$   
(1,3W de pompe)

Nd:fluorophosphate glass (LG 810)



- Yb

**58 fs** 65 mW  $112 \text{ MHz}$   
 $\lambda = 1.06 \text{ } \mu\text{m}$   
(1,2W de pompe)



J. Aus der Au, al. Opt. Lett., 307 (1997)

C. Honninger, al., Opt. Lett., 126 (1998).



**Efficacité  $\approx 1\%$**



**Faibles puissances**

- Exemple:  
à base de Nd:verre

## UC Series – Ultra compact

Model UC-100 fs OSC  
100 mW / <200 fs / 1.06  $\mu\text{m}$



Patent pending

High Q Laser  
Production GmbH

Kästle Park, 2nd Floor  
Kaiser-Franz-Josef-Strasse 61  
A-6845 Hohenems/Austria  
T ++43 (0) 55 76 / 43 0 - 40  
F ++43 (0) 55 76 / 43 0 - 50  
E [sales@highqlaser.com](mailto:sales@highqlaser.com)  
[www.highqlaser.com](http://www.highqlaser.com)

New: USA - East Coast Office, Newton Massachusetts  
Phone: 617-332-1962, Email: [sales@HighQ-US.com](mailto:sales@HighQ-US.com), [www.highqlaser.com](http://www.highqlaser.com)



# Résultats expérimentaux

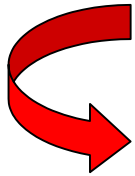
---

- Les amplificateurs femtoseconde

# Résultats expérimentaux: les amplificateurs



Matériaux amorphes => faibles gains



## Amplificateurs de type régénératif

- **Nd**

**400 fs, 150mW** 5kHz, 30μJ  
(4 W de pompe)

C. Horvath, al. Opt. Lett., 1790 (1997)

- **Yb**

**250 fs, 300 mW** 100kHz, 3μJ  
(5 W de pompe)

M.J. Lederer, al. CLEO CThFF6, (2004)



Faibles puissances

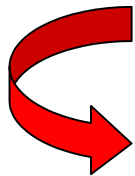


Efficacité  $\approx 1,4 \%$

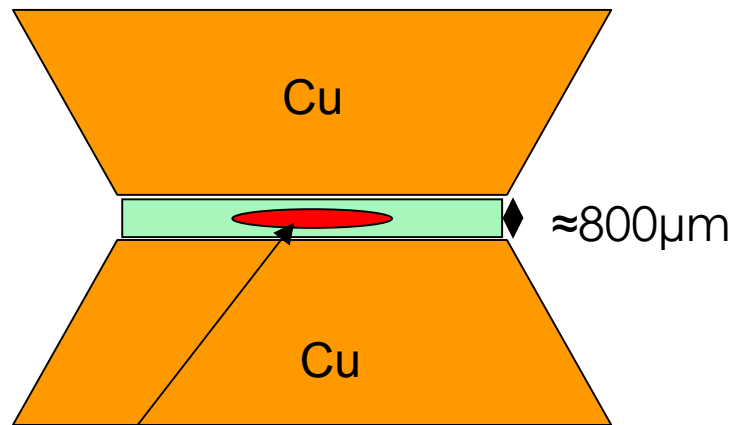
# Les verres et la puissance



Matériaux amorphes => Mauvaise conductivité thermique



Comment gérer les problèmes thermiques lorsque la puissance de pompe augmente ?



Faisceau laser

⇒ Utilisation de tranches fines  
⇒ cavités très astigmatiques  
⇒ **Grande complexité**

## Oscillateur Nd

**175 fs** 1 W (20 W de pompe) 117MHz  
J. Aus der Au, al. Opt. Lett., 271 (1998)

## Amplificateur Yb

**200 fs** 150mW (30 W de pompe) 150Hz, 1mJ  
H. Liu, al. Opt. Lett., 917 (1999)



# Solutions alternatives

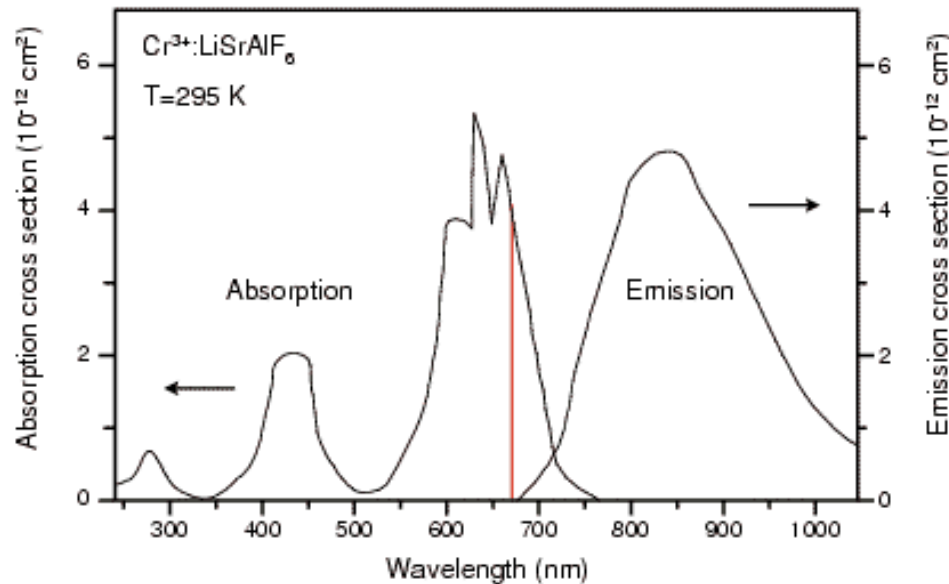
---

- Utilisations de cristaux
  - Matériaux **plus ordonnés** avec donc de meilleures **conductivités thermiques**
- Utilisation de fibres dopées (verres)
  - **Chaleur répartie** sur de plus grandes longueurs

- Introduction
- Lasers fs à base de verres dopés
- Lasers fs à base de cristaux dopés
  - aux ions  $\text{Cr}^{3+}$
  - aux ions  $\text{Yb}^{3+}$
- Lasers fs à base de fibres dopées
- Conclusion

# Les cristaux dopés aux ions métalliques

- Les principaux : les colquiriites dopés aux  $\text{Cr}^{3+}$ 
  - $\text{LiSrAlF}_6$  ou LiSAF,  $\text{LiCaAlF}_6$  ou LiCAF,  $\text{LiSrGaF}_6$  ou LiSGaF



- 😊 Spectres presque aussi larges que le Ti:Saphir
- 😊 Conductivité thermique :  $\kappa \approx 4\text{ W/m/K}$

# Oscillateurs ultra-courts

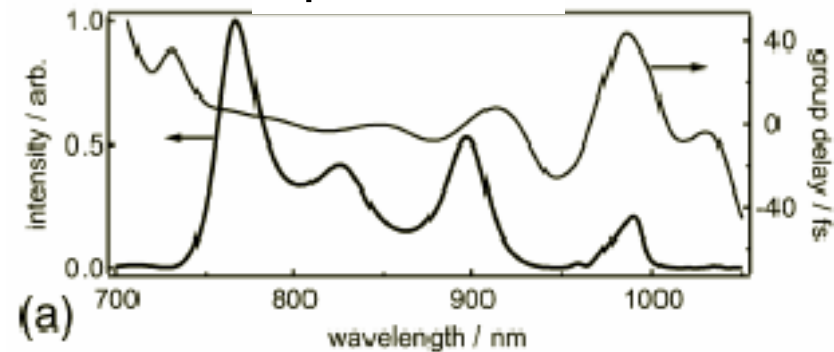
- **Cr:LiCAF** (KLM)



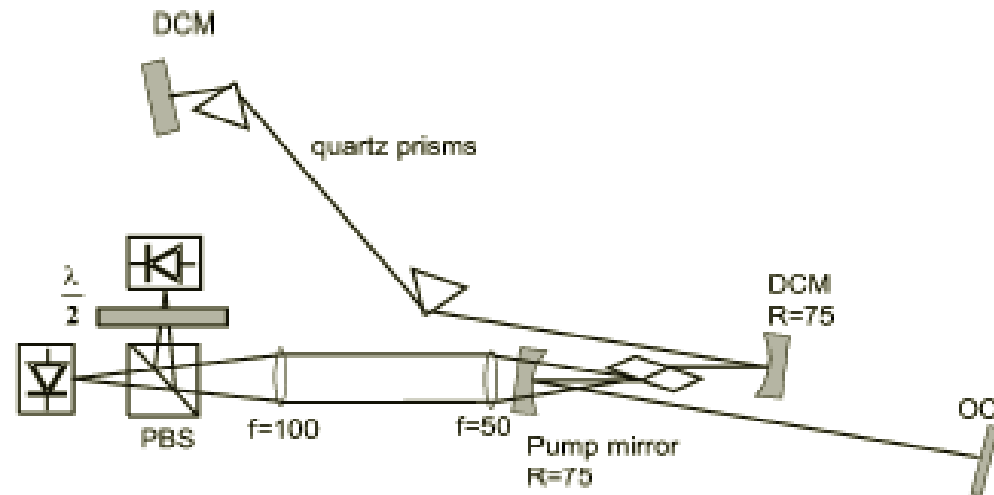
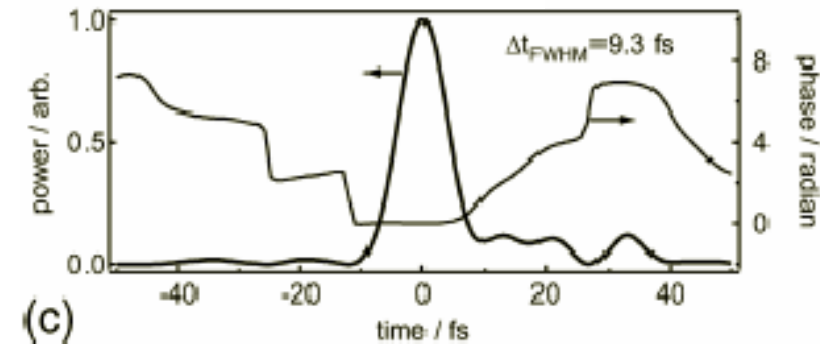
**10 fs** 40 mW

(1W de pompe)

spectre

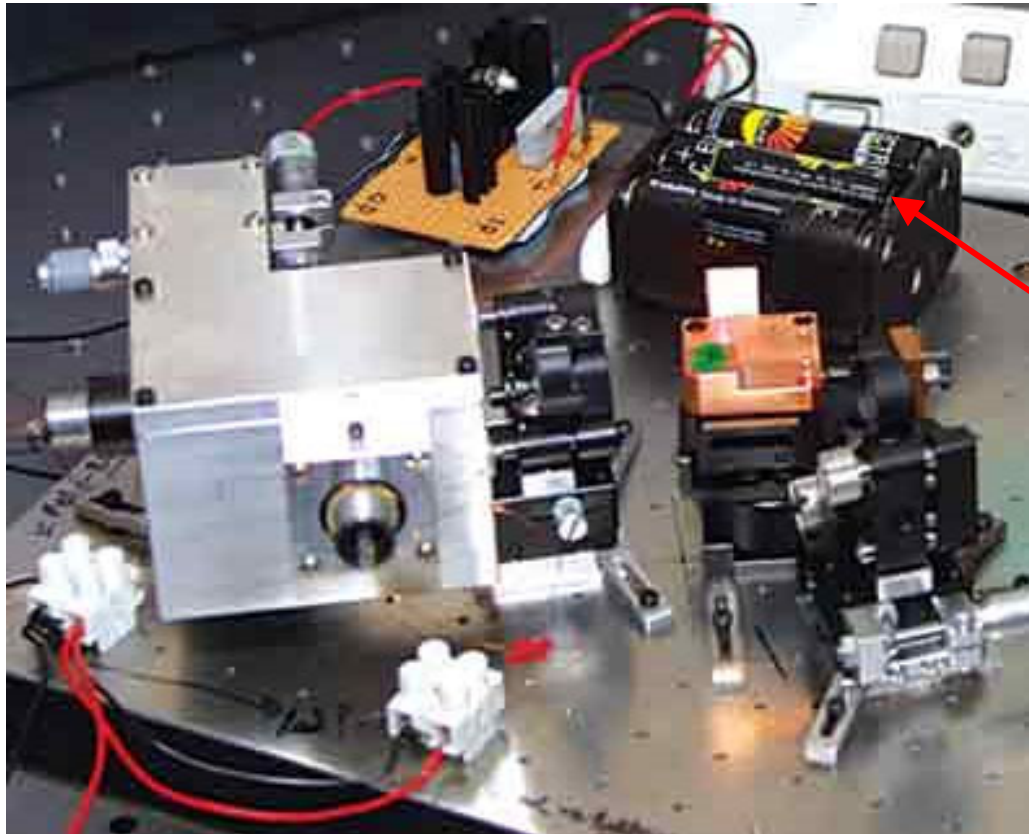


durée



Diode (670 nm) de faibles puissances

# Femtos sur piles



122 fs  
35 mW

6 piles AAA

University of St Andrews

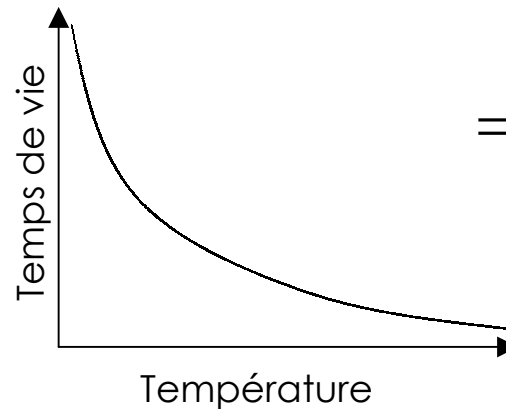
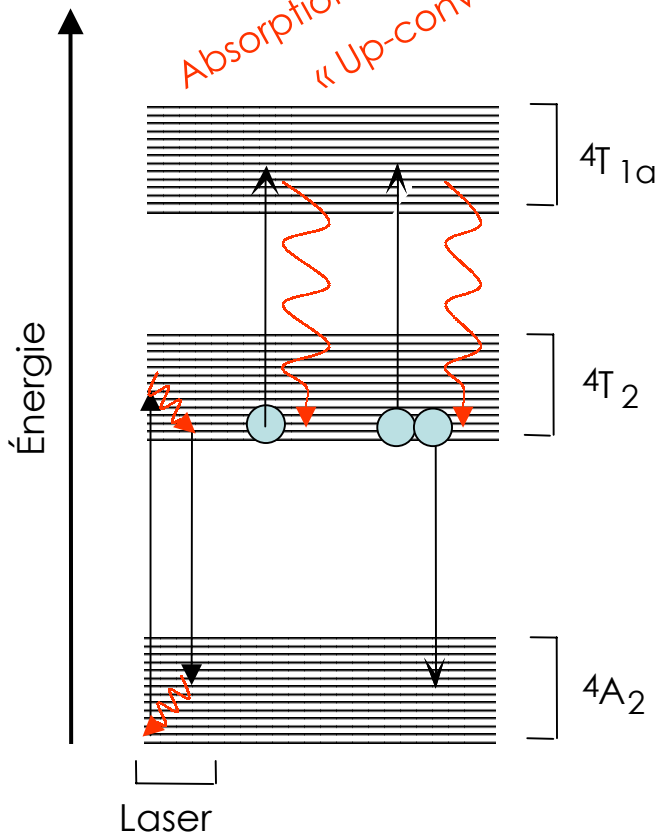


**Efficacité= 4%**

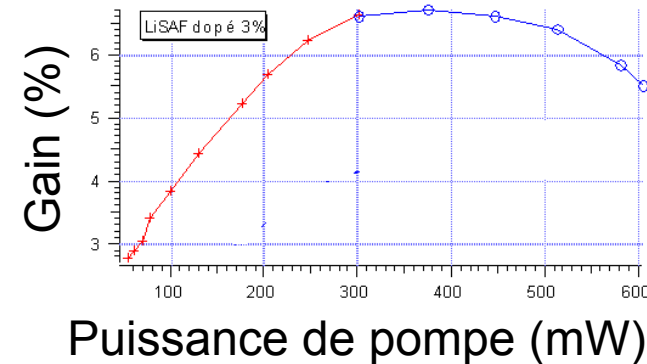
# La grande désillusion

Effets parasites => augmentation de la température

« Quenching » de température  
augmente la température



=> Diminution des performances lasers



**Puissance limitée**

- Introduction
- Lasers fs à base de verres dopés
- Lasers fs à base de cristaux dopés
  - aux ions  $\text{Cr}^{3+}$
  - aux ions  $\text{Yb}^{3+}$
- Lasers fs à base de fibres dopées
- Conclusion

# $\text{Yb}^{3+}$ : un spectre sous influence

## Le choix dans un panel de cristaux

- Ordre



Verres  
(matériaux amorphes)

Cristaux de structure complexe  
(beaucoup d'atomes par maille)

Cristaux de structure simple  
(peu d'atomes par maille)

- Largeur spectrale



- Conductivité thermique



- Sections efficaces (gain)



N.B.: Les cristaux dopés aux Nd sont hors-jeu car ils ont des spectres trop étroits

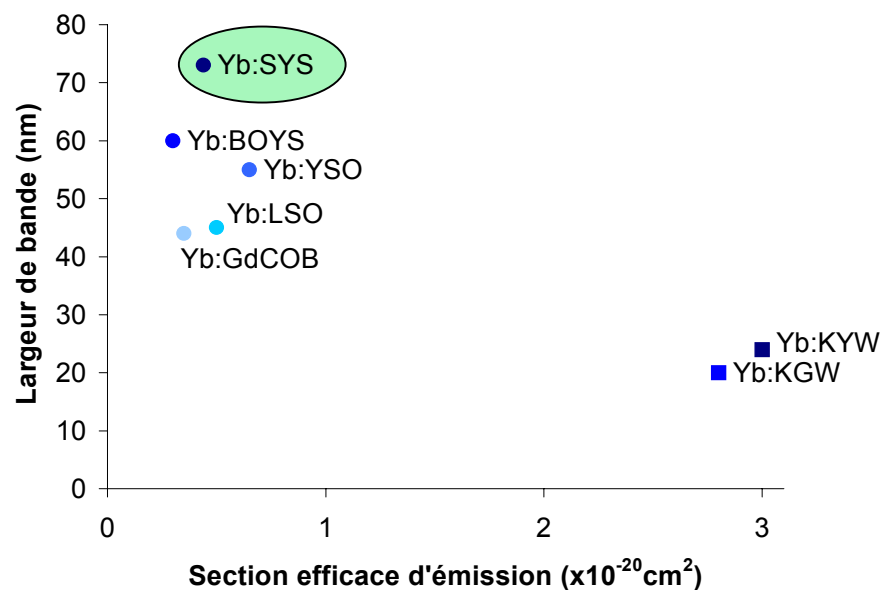


# Yb<sup>3+</sup> : un spectre sous influence

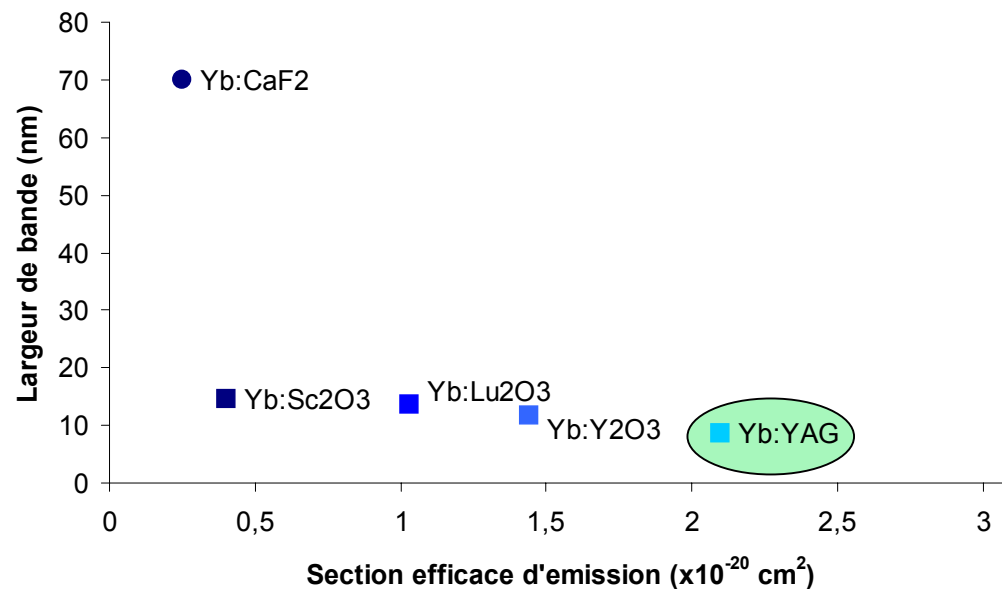
- Stratégies :

**Faible conductivité thermique / Forte conductivité thermique**

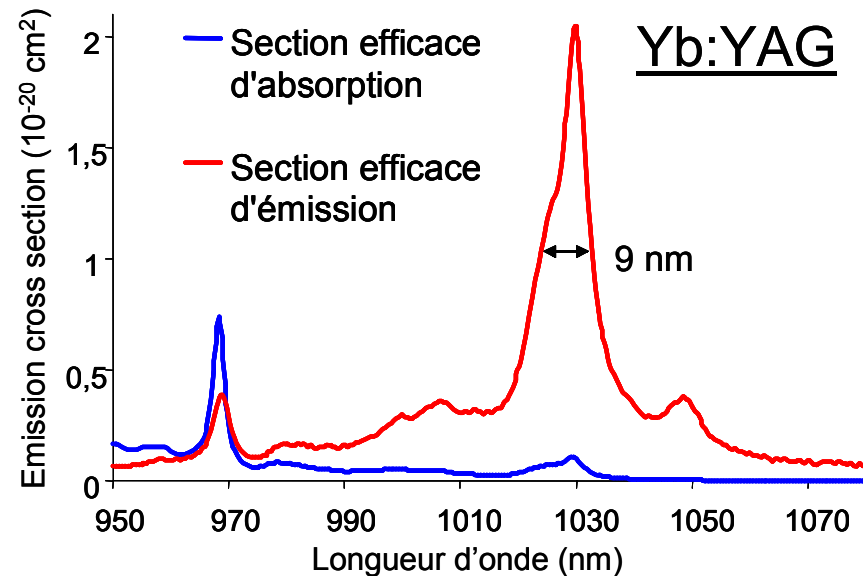
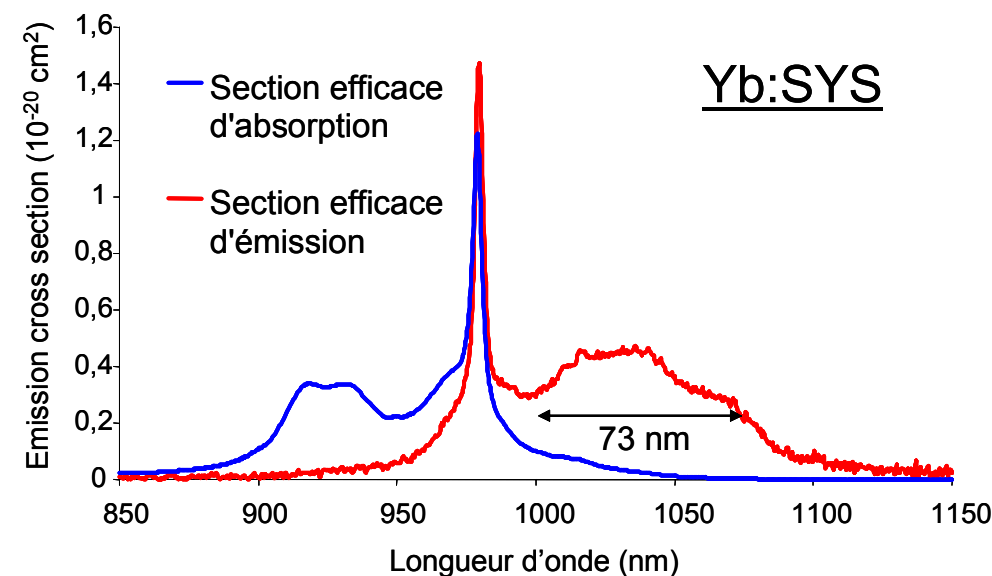
$\kappa = 2 \text{ à } 5 \text{ W/m/K}$



$\kappa = 5-15 \text{ W/m/K}$



# Yb<sup>3+</sup> : un spectre sous influence



Cristal	Largeur d'émission $N_{\text{exc}}/N_{\text{tot}}=0,5$	Durée théorique des impulsions	Section efficace d'émission ( $10^{-20} \text{ cm}^2$ )	Longueur d'onde optimale d'émission	Temps de fluorescence	Conductivité thermique (W/m/K) (non-dopé)
Yb:SYS	73 nm	16 fs	0,4	1070 nm	1,1 ms	2
Yb:YAG	9 nm	120 fs	2,2	1030 nm	0,95 ms	11

# Résultats expérimentaux

---

- Les oscillateurs femtoseconde

# Résultats oscillateurs

## • Yb:SYS

70 fs

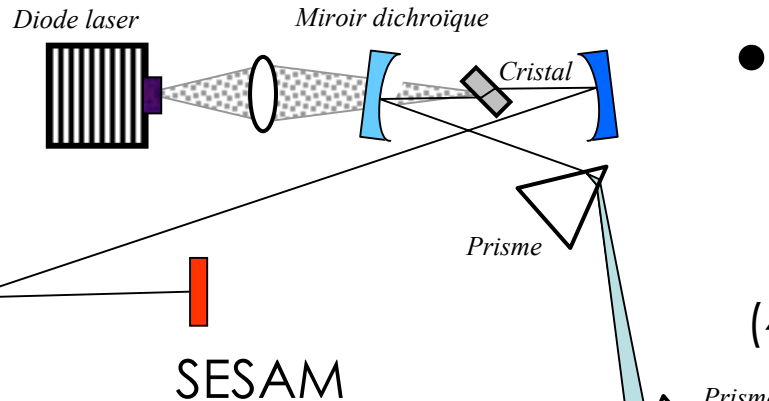
156 mW

100 MHz

(4W de pompe)

110 fs

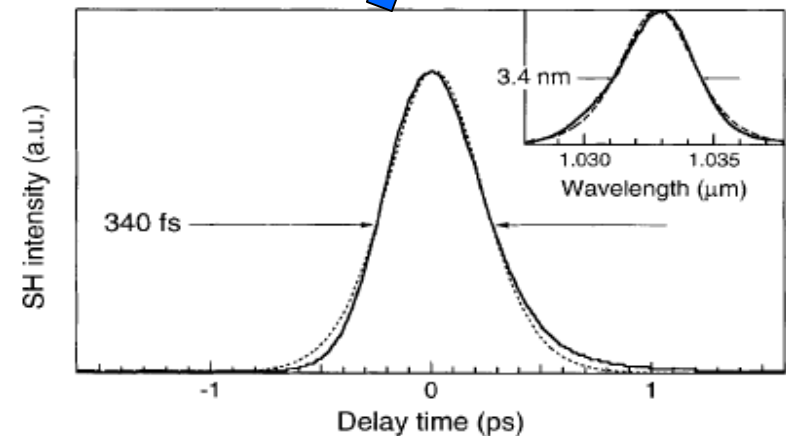
420 mW



## • Yb:YAG

340 fs

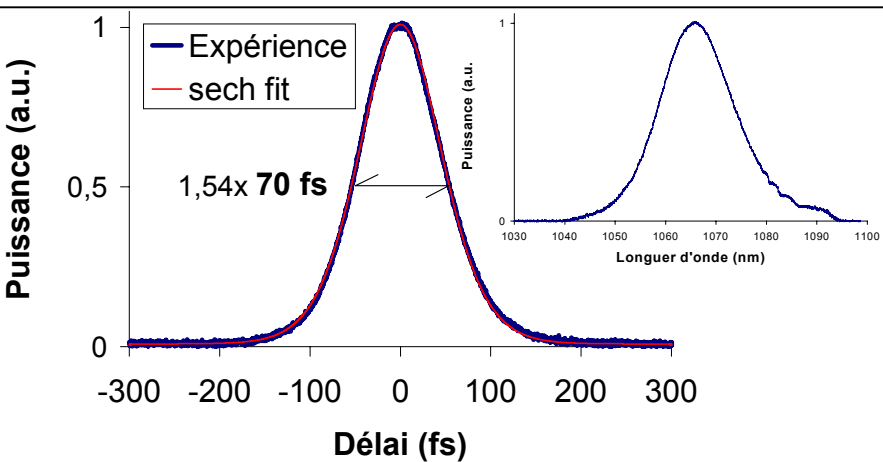
110 mW  
(4W de pompe)  
100 MHz



C. Honninger & al. Appl. Phys. B, 69, 3, (1999)



Efficacité  $\approx 1 \%$



F. Druon & al., Opt. Lett., Vol. 27 1914 (2002)

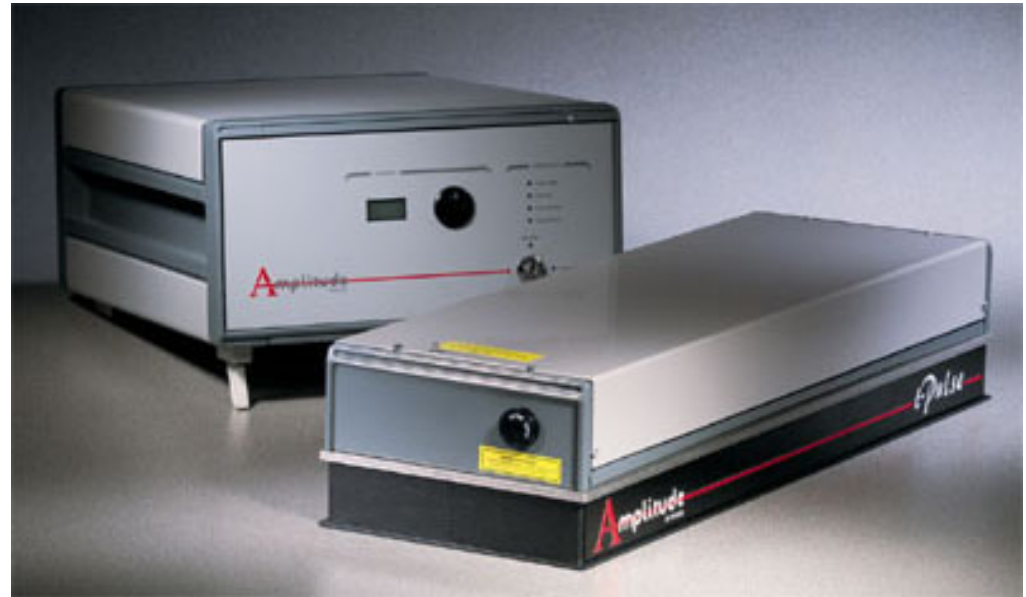


Efficacité  $\approx 2,5 \%$

# Produit commercial

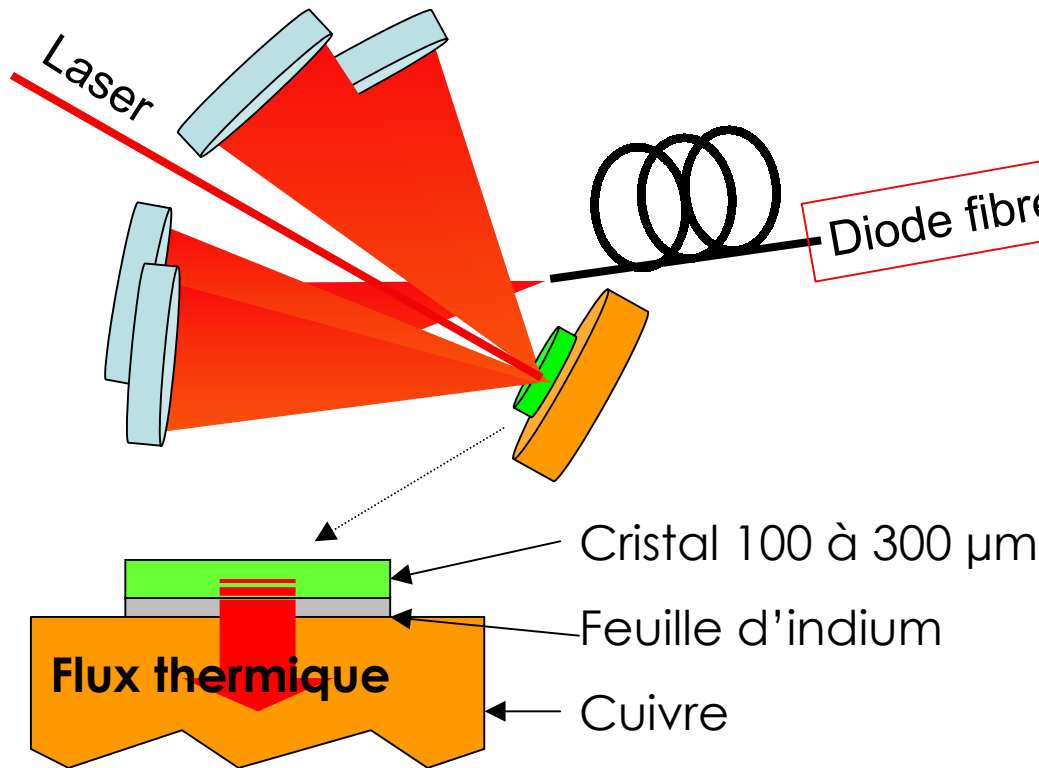
- Yb:YAG durée trop longue
- Yb:SYS pas encore mature
- Pour l'industrie : le **Yb:KGW**

200 fs @ 1030 nm,  
10 MHz, 200nJ/impulsion



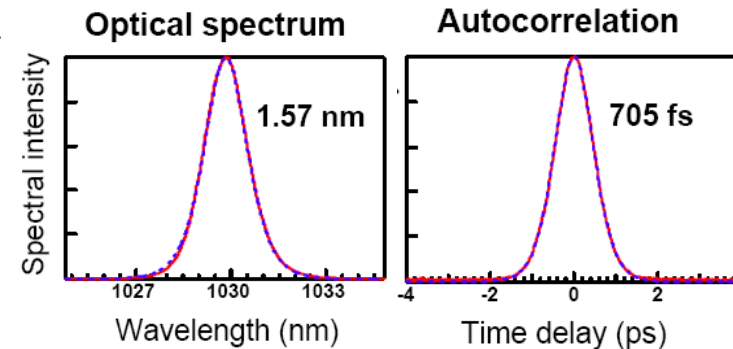
# Les oscillateurs de puissance

## • La technologie « thin disk »



Contact: technologie complexe

## • Yb:YAG



**Puissance 80 W**  
(370 W de pompe)

57 MHz, 1,4 μJ

E. Innerhofer et al. Opt. Lett. 2003, 2004

**Efficacité ≈ 2 %**

## • Yb:KGW

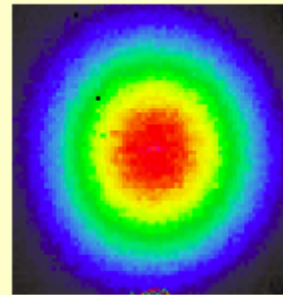
240 fs 22 W (100 W de pompe)

25 MHz 0,9 μJ

F. Brunner et al. Opt. Lett. 11 62 (2002)

# Produit commercial

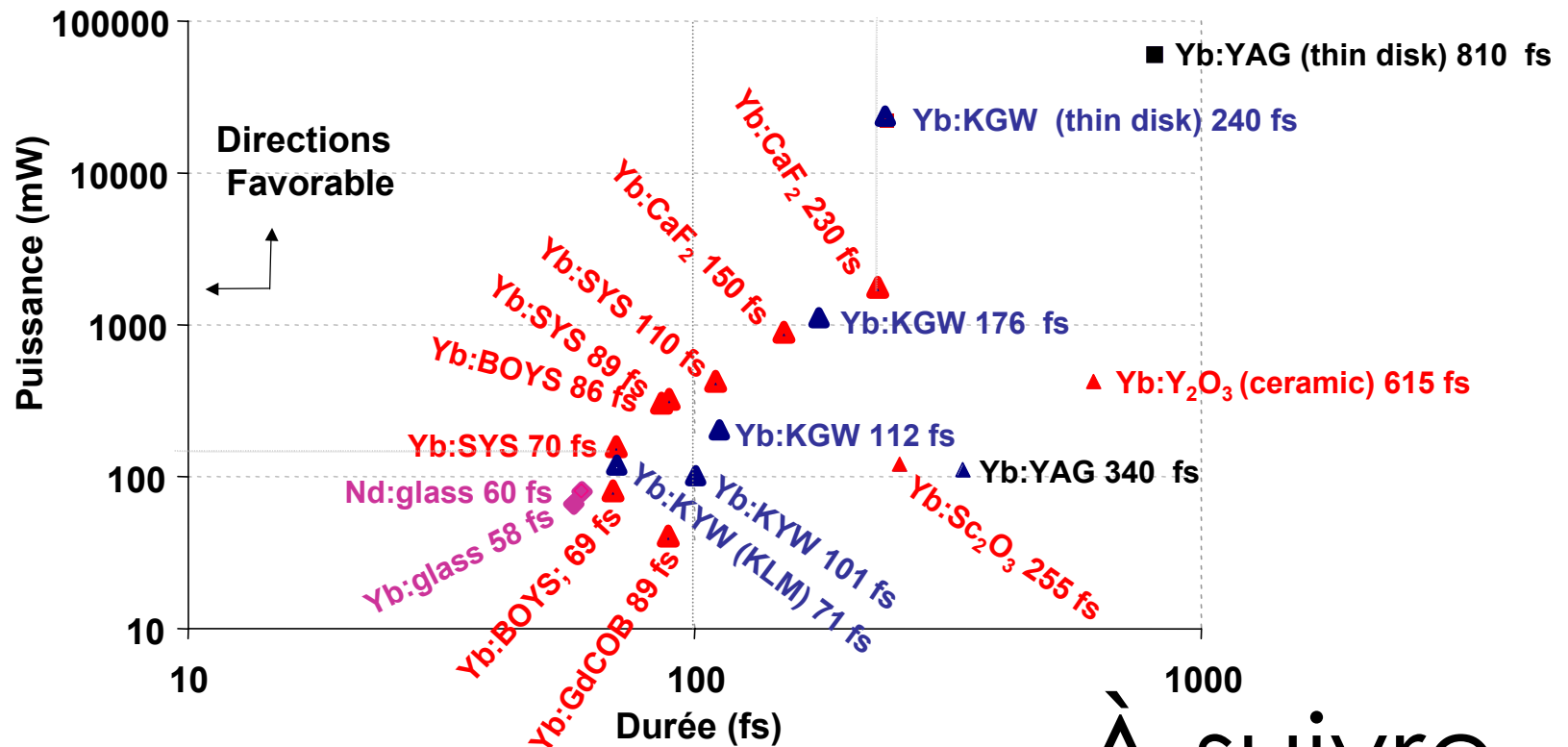
- Yb:YAG  
Thin disk



50 W	average power
50 MHz	repetition rate
1 $\mu$ J per pulse	
1 ps	pulse width
1 MW	peak power
1030 nm	wavelength
$M^2 < 1.2$	TEM <sub>00</sub> mode

- Time-Bandwidth Products, Inc.

# Les oscillateurs à base de cristaux dopés à l'ytterbium



À suivre...



# Résultats expérimentaux

---

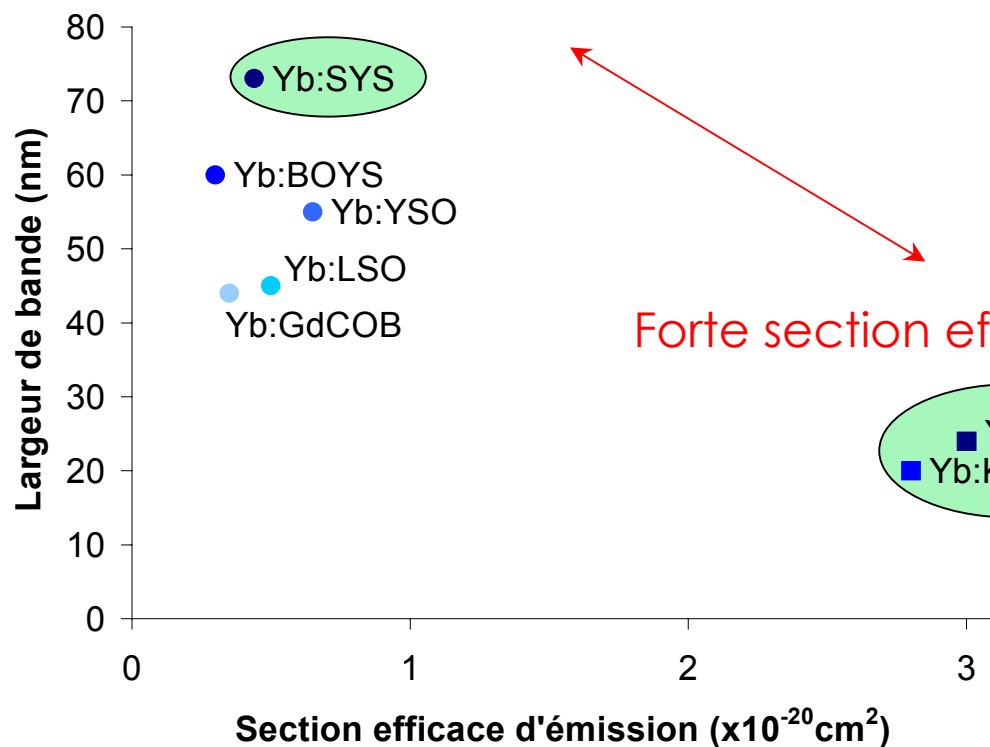
- Les amplificateurs femtoseconde

# Les amplificateurs à base de cristaux dopés à l'ytterbium

- Gain dans l'ytterbium faible
- Nombreux passages dans l'amplificateur
- Rétrécissement par le gain 😞
  - Soit on limite le nombre de passages ; on favorise le gain.
  - Soit on limite l'effet de rétrécissement par le gain ; on favorise le spectre.

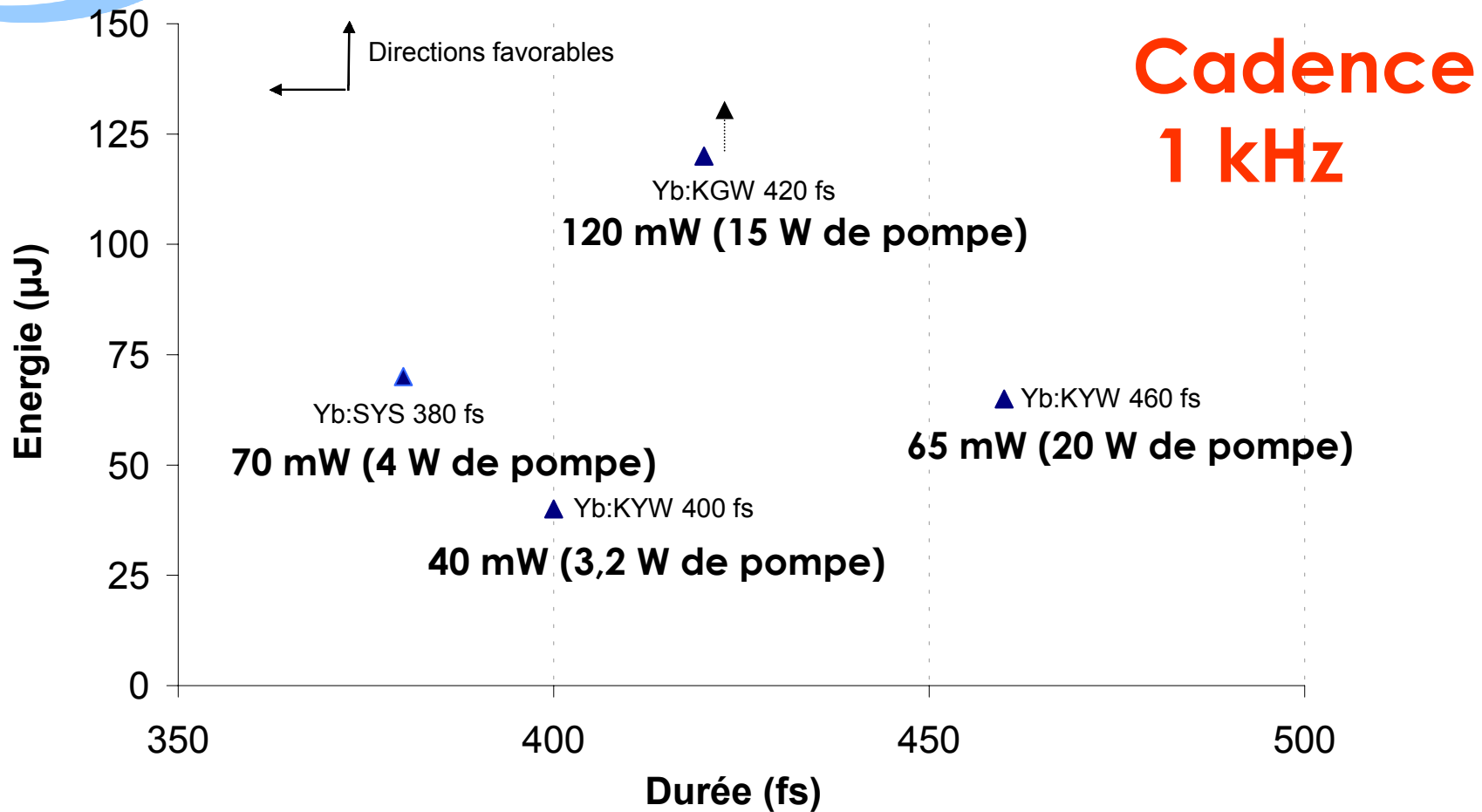
# Les amplificateurs à base de cristaux dopés à l'ytterbium

Faible section efficaces / grande largeur spectrale



Forte section efficaces / petite largeur spectrale

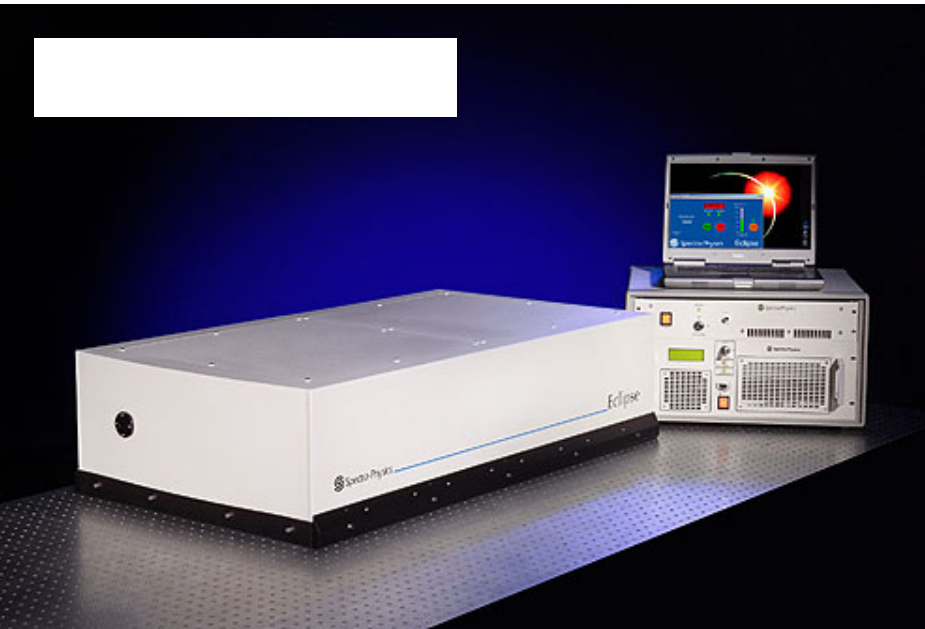
# Résultats sur les amplificateurs



😊 Efficacité  $\approx 0.5 \%$

# Produits commerciaux

- Pour l'industrie : le **Yb:KGW**



**Eclipse :**  
500 fs, 7kHz, 4 W  
(400  $\mu$ J / impulsions)



**S Pulse :**  
400 fs, 1-10 kHz, 100  $\mu$ J

- Introduction
- Lasers fs à base de verres dopés
- Lasers fs à base de cristaux dopés
  - aux ions  $\text{Cr}^{3+}$
  - aux ions  $\text{Yb}^{3+}$
- Lasers fs à base de fibres dopées
- Conclusion

# Caractéristiques des fibres



Grande longueur d'interaction

- Effets thermiques répartis
- Fort gain



Qualité spatiale du faisceau  
(confinement)



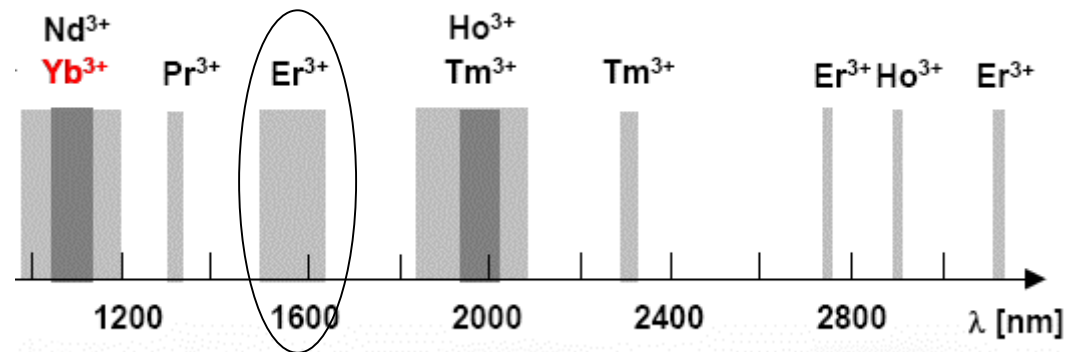
Systèmes sans propagation en  
espace libre



Systèmes en régime continu de  
plusieurs kW

# Les ions dopants

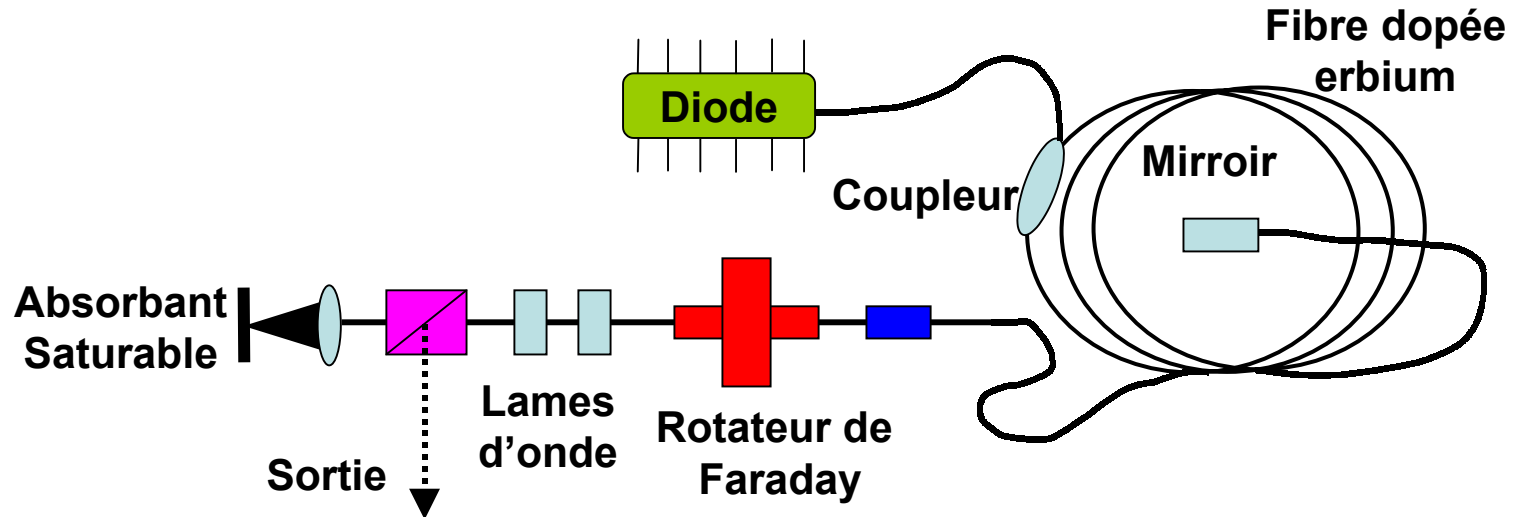
- Historiquement :



- 😊 Issu des composant « télécom' »
- 😊 Dispersion nulle à 1,5 $\mu$ m dans le verre



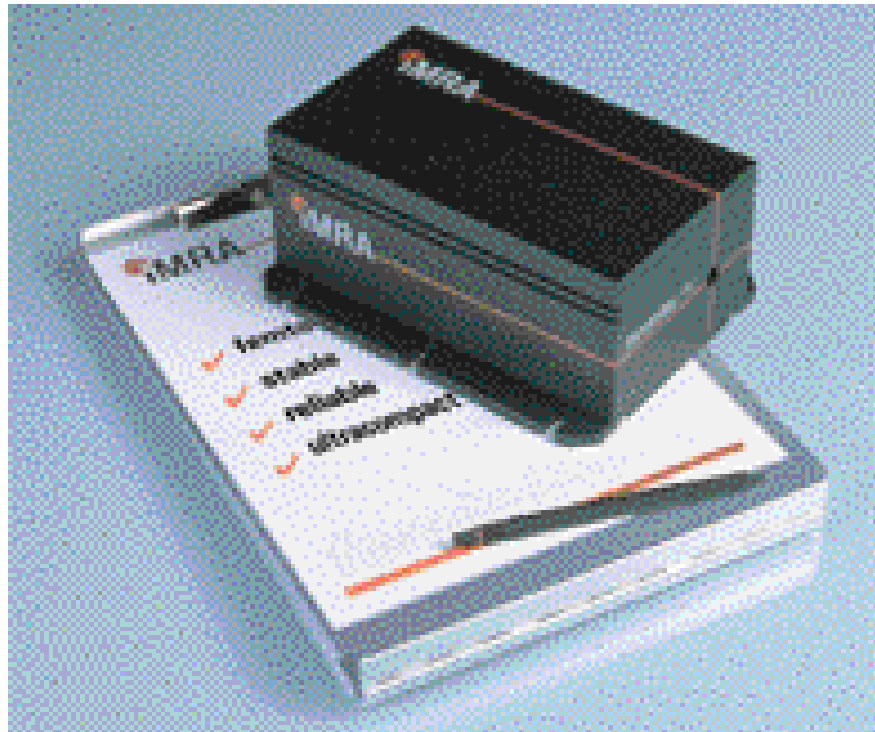
# Oscillateur à base d'Er<sup>3+</sup>



**300 fs,  $\approx 10$  mW à 50 MHz à 1560 nm**

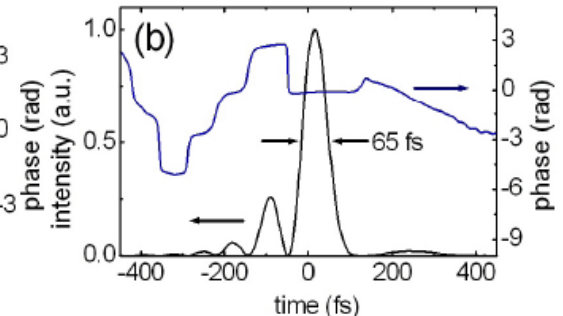
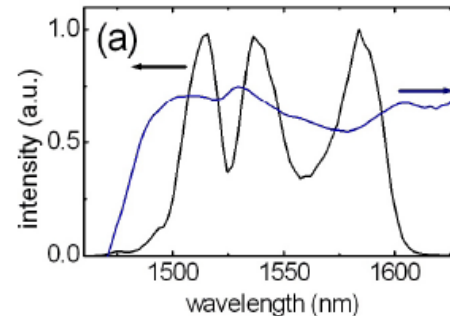
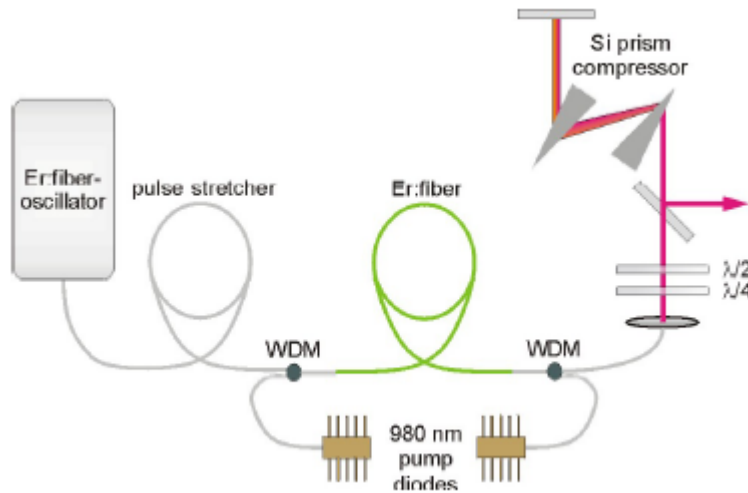
# Produit commercial

- Femtolite d'IMRA Inc  
dimension (193 x 109 x 82 mm)



**300 fs,  $\approx$  10 mW**

# L'Erbium limité en puissance



**110 mW 65 fs 67 MHz**

F. Tauser, et al. Opt. exp. 594-600 (2003)



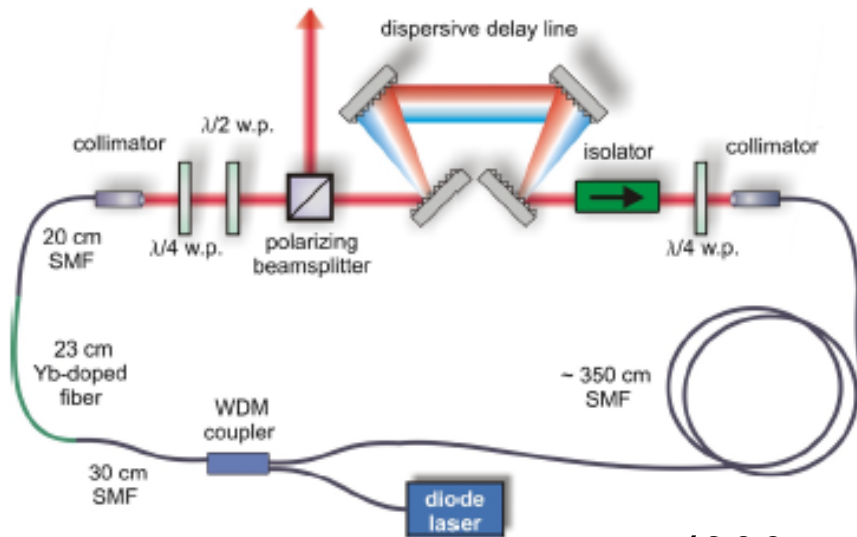
**Efficacité  $\approx 3 \%$**



Systemes amplifiés limité à qq 100 mW

à cause des propriétés spectroscopiques de l' $\text{Er}^{3+}$

# Le retour de l'Yb : les oscillateurs

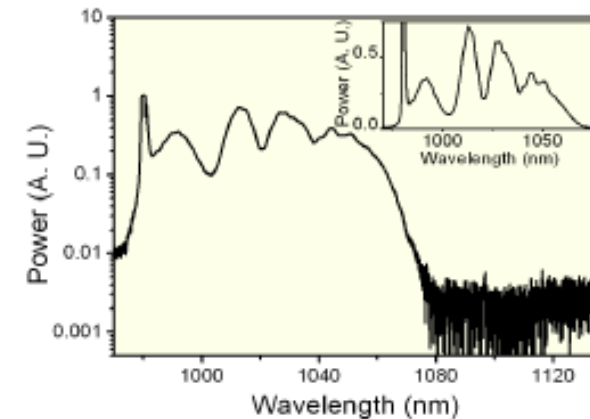
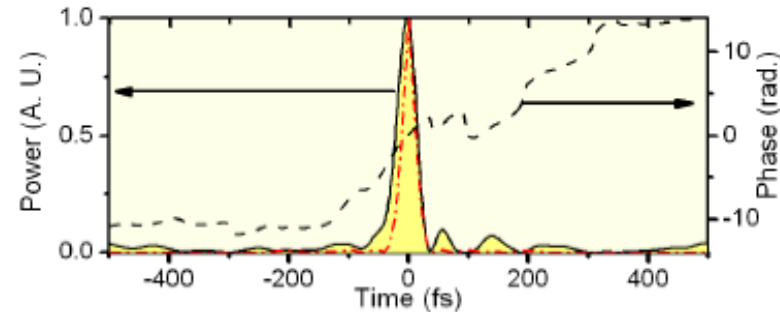


36 fs

75 mW

(300 mW de pompe)

50 MHz



F.O. Ilday et al. Opt. Exp. (2003)



Grande longueur d'interaction

– Forte dispersion



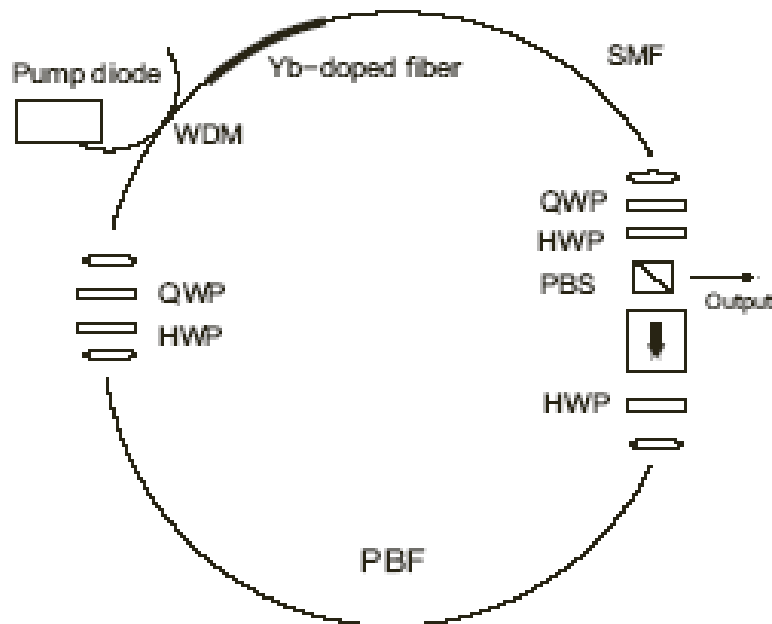
Systèmes complexes



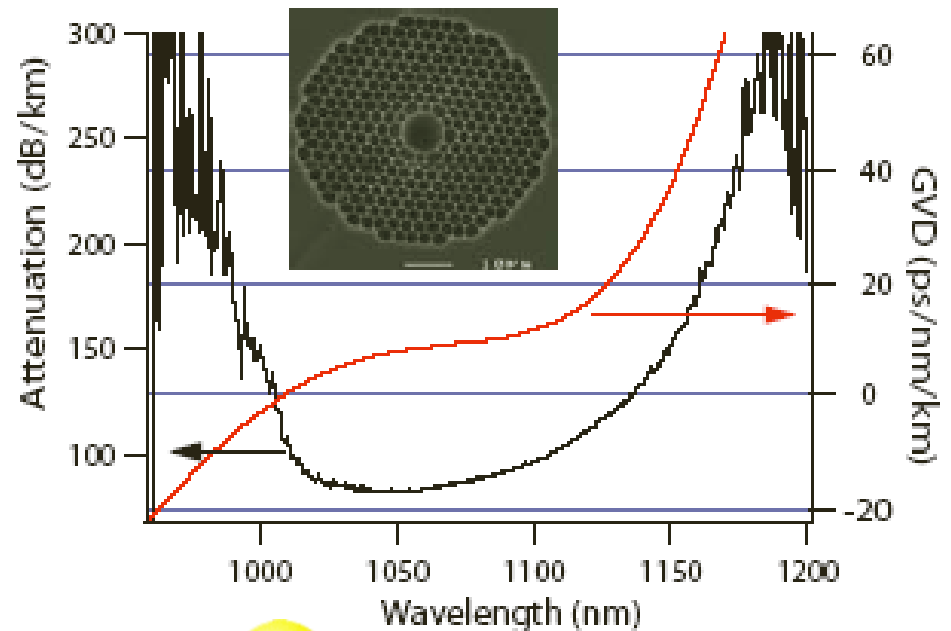
Efficacité  $\approx 3 \%$

# Les oscillateurs à fibres à cristaux photoniques et dopées à l'Yb

- Solution pour résoudre les problèmes de dispersion à  $1 \mu\text{m}$



**160 fs, 30 mW**



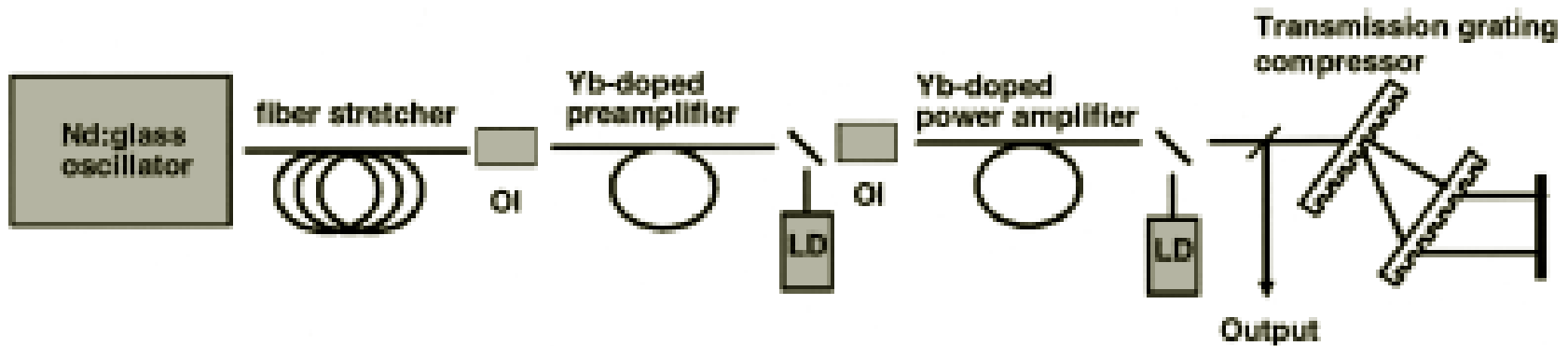
**Efficacité  $\approx 2 \%$**

H. Lim, et al. Opt. exp. 2231-2235 (2004)

# Les amplificateurs femtoseconde à fibres dopées $\text{Yb}^{3+}$

☹ confinement

– Effets non-linéaires importants



- Il faut utiliser des fibres avec des cœurs de plus en plus larges

☹ Systèmes complexes

☹ Attention aux faisceaux multimodes

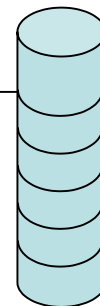
# Les amplificateurs femtoseconde à fibres



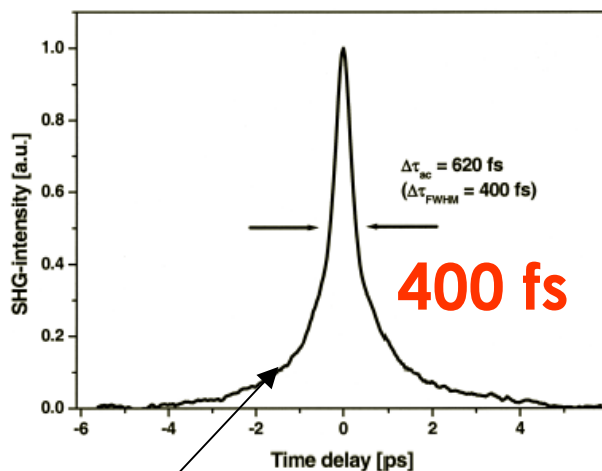
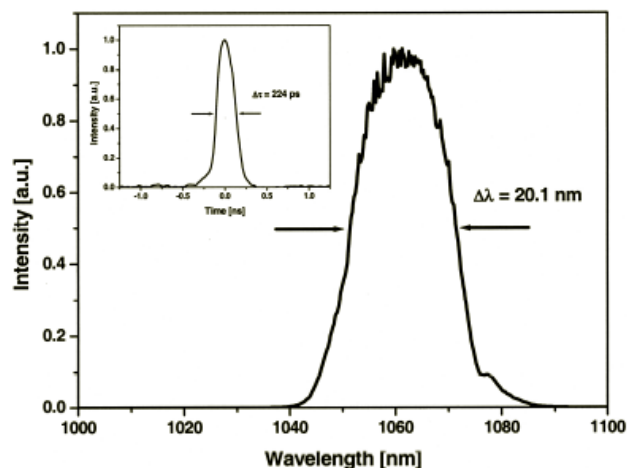
## Fibres à larges cœurs multimodes

### • Solution 1

$L=13,5 \text{ m}$ ,  $\varnothing=23 \mu\text{m}$



- Imposer des pertes différentielles par des faibles rayons de courbures



**76 W**

(180W de pompe)  
75 MHz, 1  $\mu\text{J}$



Qualité temporelle



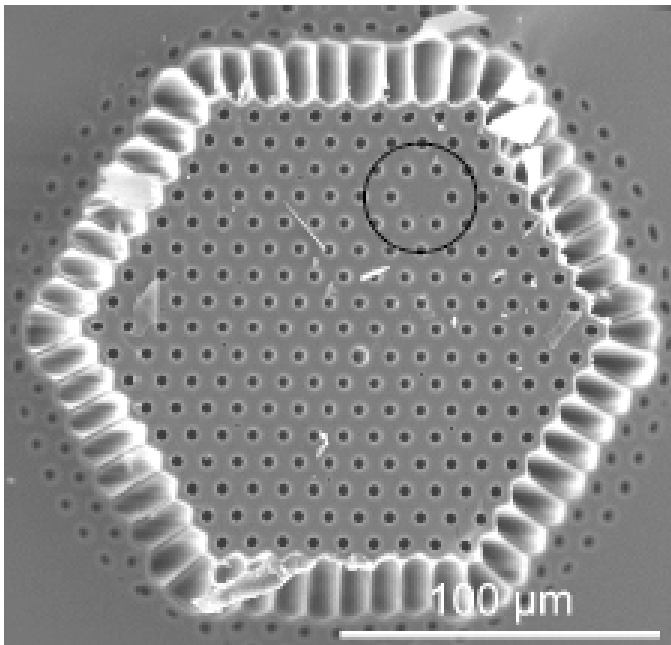
**Efficacité  $\approx 3 \%$**

H. Limpert, et al. Opt. Lett. 1984 (2003)

☹ Fibres à larges cœurs multimodes

- Solution 2

- Fibres à cristaux photoniques à larges modes






































- Tests en continu uniquement  
4W pour 20 W de pompe

À suivre...



- Introduction
- Lasers fs à base de verres dopés
- Lasers fs à base de cristaux dopés
  - aux ions  $\text{Cr}^{3+}$
  - aux ions  $\text{Yb}^{3+}$
- Lasers fs à base de fibres dopées
- Conclusion

# Synthèse

Cristal	durée	thermique	efficacité	puissance	maturité	applications
Ti:saphir						
Yb:verre Nd:verre						- Oscillateurs de quelques 100 fs
Cr:cristal						- Systèmes pour la métrologie
Yb:cristal						- Micro-usinage athermique - Sources RVB - Sources pour la biologie
						
Yb:fibre						
Er:fibre						- Telecom'

- Choix de l'**ytterbium**
- Vers des systèmes mixtes
  - Oscillateurs à bases de cristaux
  - Amplificateurs à base de fibres
- Les cristaux
  - Étendre la méthode du « **thin-disk** » à des matériaux à plus larges bandes
- Les fibres
  - Utilisations des **fibres à cristaux photoniques**

# Le déclin de l'empire du Ti:saphir ?

---

- Pour les chaînes laser ultra-brèves
  - Touche pas au Ti:Saphir !
- Pour les Watts
  - Good bye Ti:Saphir !
- Extension des performances
  - L'Yb contre attaque
    - OPA
    - Élargissement spectrale
    - Compression d'impulsions

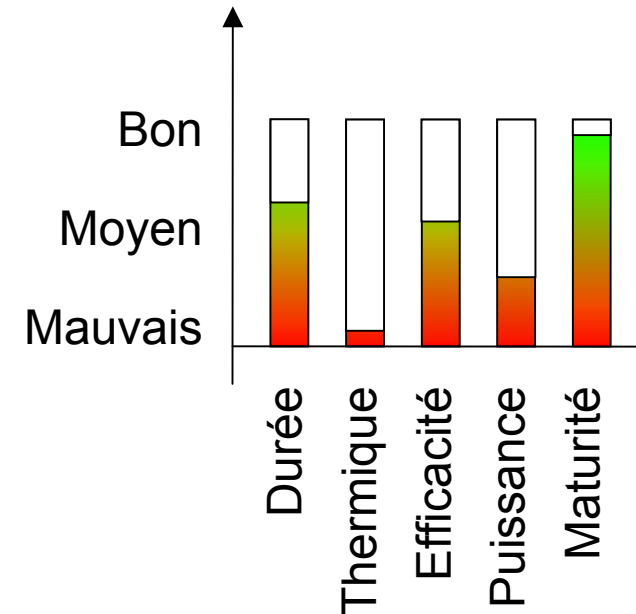
# LE MONDE DE LA **FEMTO**

## L'aventure continue



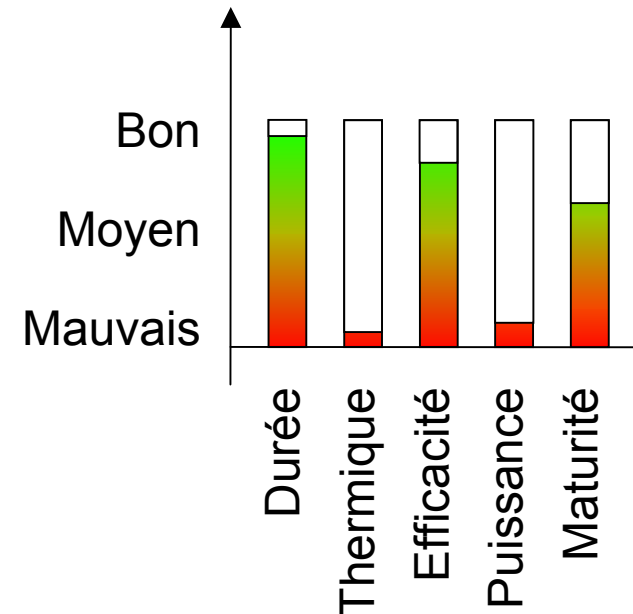
# Points forts et points faibles des différents matériaux

- Les verres dopés
  - Points forts
    - Maturité
  - Points faibles
    - Problèmes thermiques
    - Limitation aux puissances : quelques 100 mW
  - Applications
    - Oscillateurs de quelques 100 fs
    - Systèmes industriels



# Points forts et points faibles des différents matériaux

- Les colquiriites dopés  $\text{Cr}^{3+}$ 
  - Points forts
    - Durée très courtes
    - Efficacité
  - Points faibles
    - Problèmes thermiques
    - Limitation aux puissances : quelques 100 mW
  - Applications
    - systèmes à très faible consommation
    - Systèmes embarqués
    - Systèmes pour la métrologie





# Points forts et points faibles des différents matériaux

- Les cristaux dopés  $\text{Yb}^{3+}$

- Points forts

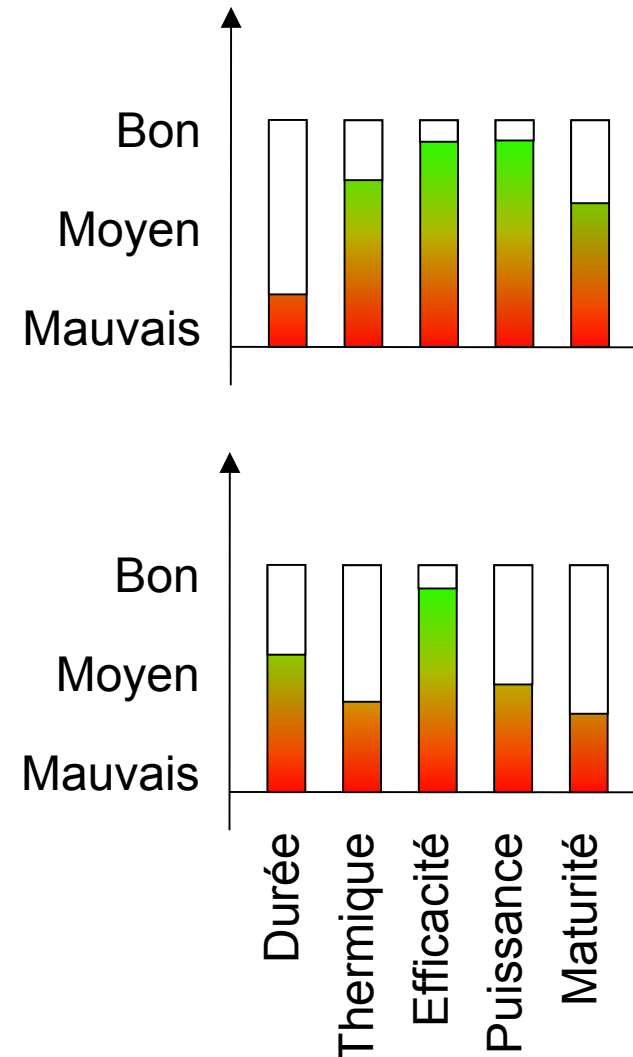
- Oscillateurs de puissance
- Efficacité

- Points faibles

- choix du cristal :  
durée ou puissance
- Amplificateurs

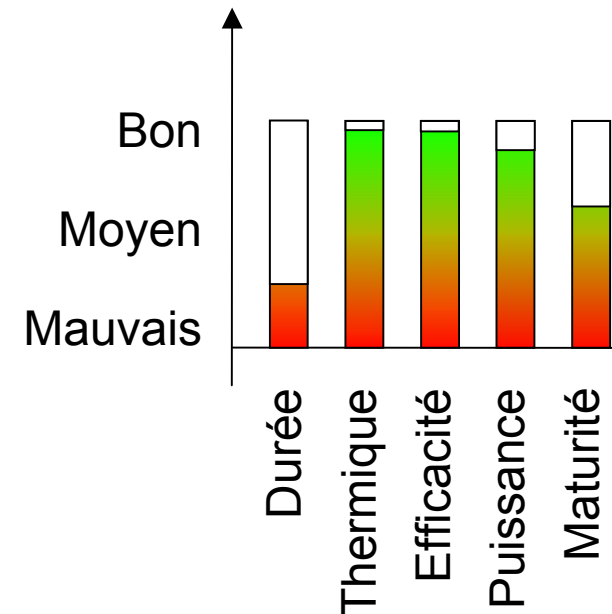
- Applications

- Micro-usinage
- Source RGB

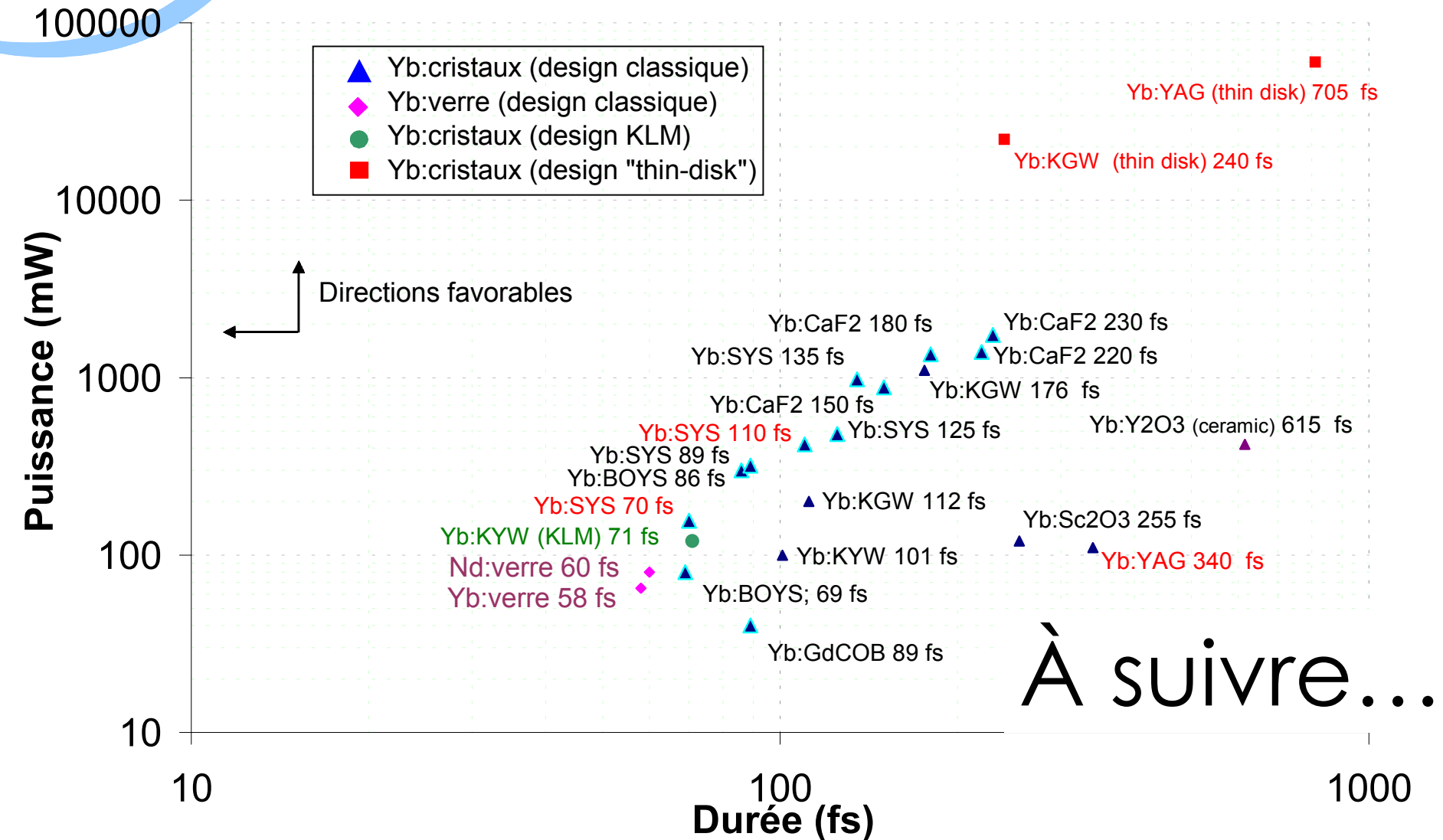


# Points forts et points faibles des différents matériaux

- Les fibres dopées  $\text{Yb}^{3+}$ 
  - Points forts
    - Amplificateurs de puissance
    - Efficacité
  - Points faibles
    - Qualité temporelle
    - Oscillateurs
  - Applications
    - Micro-usinage
    - Source RGB

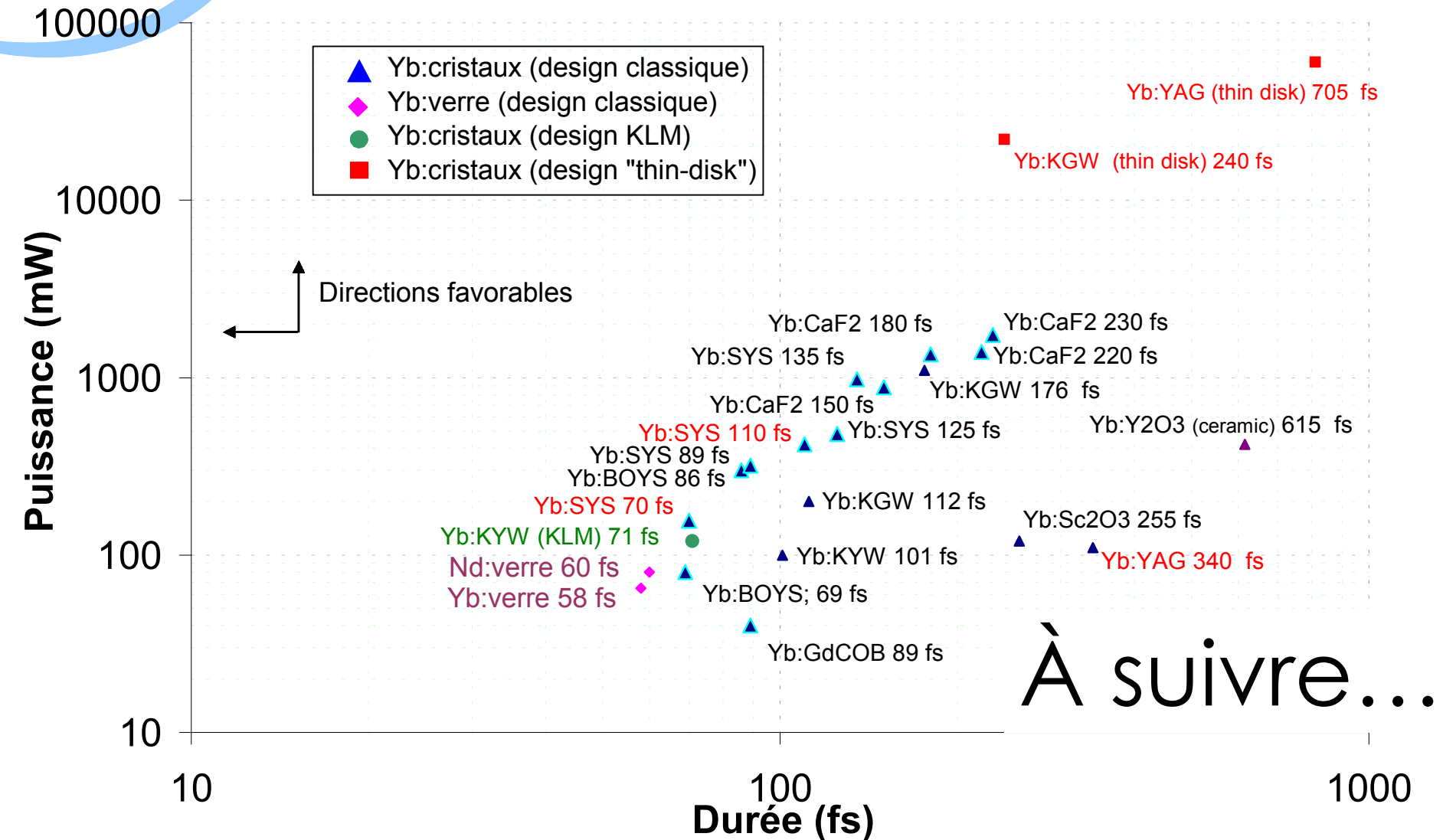


# Les oscillateurs à base de cristaux dopés à l'ytterbium



À suivre...

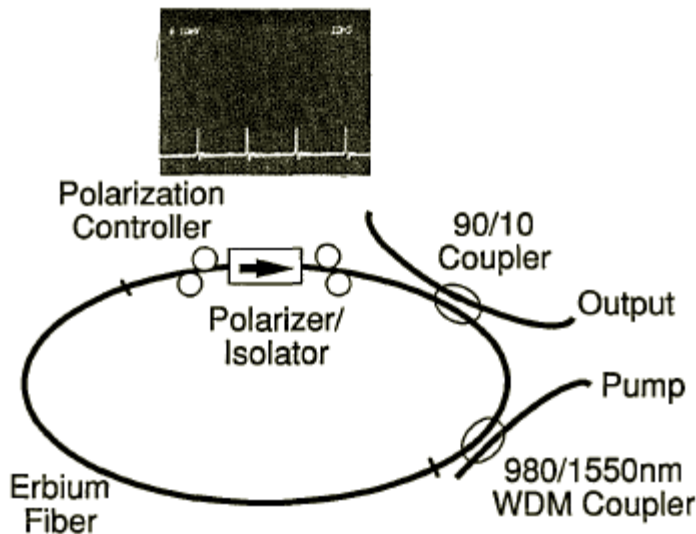
# Les oscillateurs à base de cristaux dopés à l'ytterbium



# Les oscillateurs femtoseconde à fibres dopées à l'erbium

- Solution 1
  - Changer de longueur d'onde

😊 Systèmes monolithiques



450fs, 400μW

Efficacité ≈ 0,4 %

- Il faut amplifier

# Synthèse

Cristal	durée	thermique	efficacité	puissance	maturité	applications
Ti:saphir	+++	+++	-	+	+++	
Yb:verre Nd:verre	++	-	++	+	+++	
Cr:cristal	+++	-	+++	+	++	
Yb:cristal	+	+++	+++	+++	++	
	++	++	+++	++	+	
Yb:fibre	+	+++	+++	+++	+	

# LE MONDE DE LA FEMTO



## L'aventure continue