

Lasers solides pompés par diode pour la réalisation d'une horloge optique à atomes d'argent

Yann Louyer



Introduction

A) Horloge optique à base d'atomes d'argent

B) Choix du cristal laser

C) Laser solide multimode

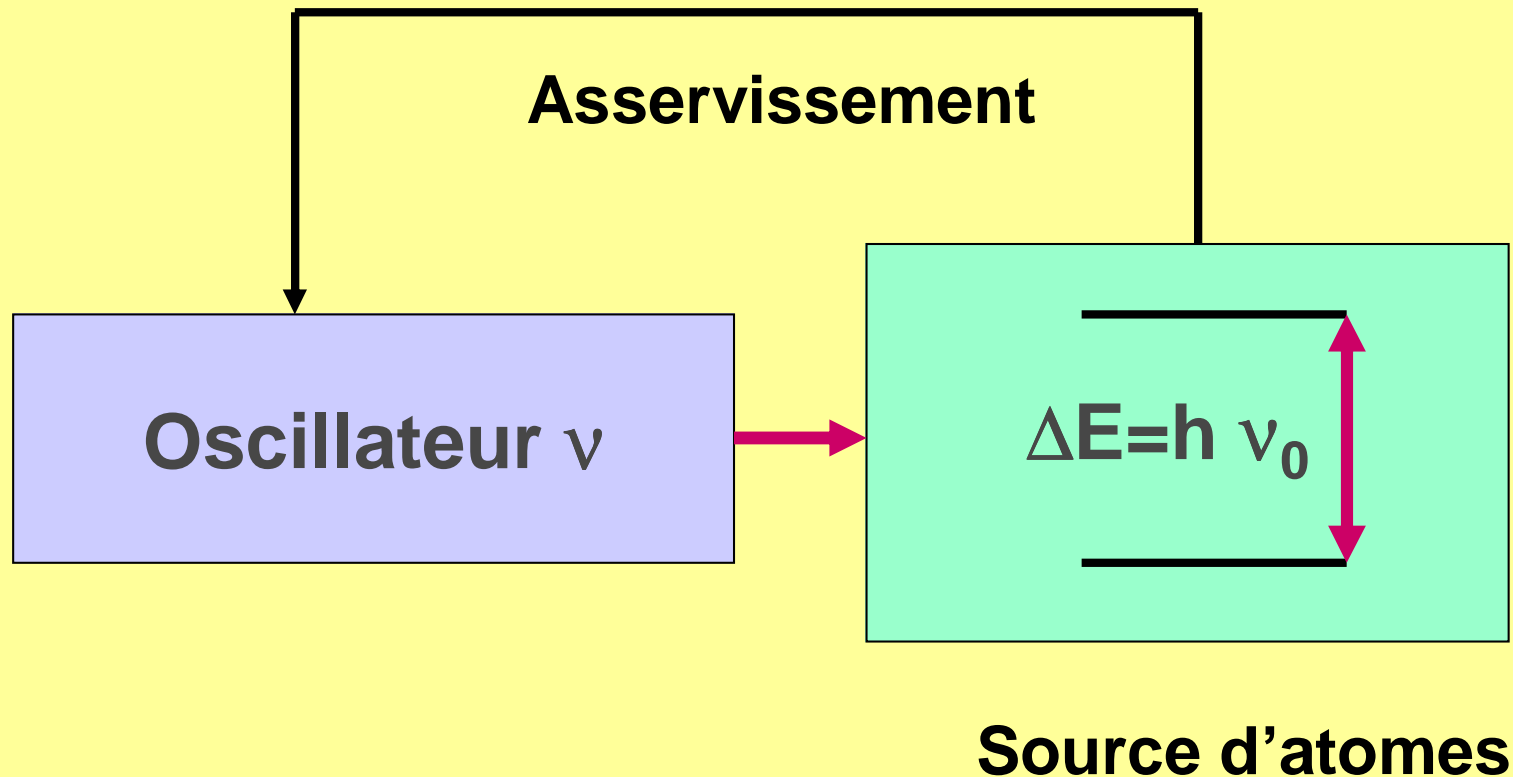
- Définition du laser
- Problèmes thermiques
- Puissance laser

D) Laser monomode

- Cavités linéaires
- Cavités en anneau et doublage intra-cavité

Conclusion et perspectives

T3 Qu'est-ce qu'une horloge atomique ?



Définition de la seconde

Dans le Cs $\nu \equiv 9\,192\,631\,770$ Hz

T4 Pourquoi développer une meilleure horloge ?

- Horloge à Cs (fontaine du BNM-SYRTE)

Exactitude $7 \cdot 10^{-16}$, stabilité $< 3 \cdot 10^{-16}$

- Une horloge plus *exacte* est requise pour améliorer la définition de la seconde et pour des applications en physique.

- Incertitude relative de la fréquence mesurée après asservissement

$$\Delta\nu_m/\nu_0 \propto \frac{1}{Q_{\text{at}} \tau^{1/2} N^{1/2}}$$

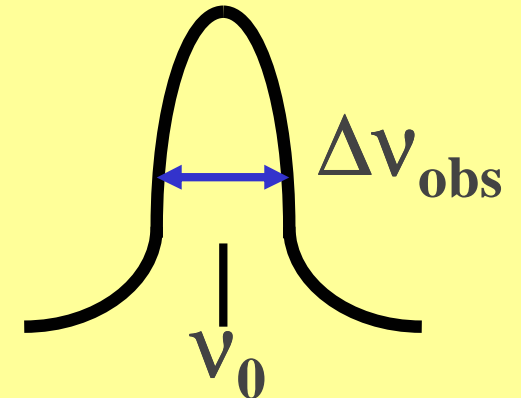
τ : temps de mesure

N : nombre d'atomes

T5 Pourquoi utiliser une horloge *optique* ?

- **Stabilité relative $\propto 1/\text{facteur de qualité}$**

$$Q_{\text{at}} = \nu_0 / \Delta\nu_{\text{obs}}$$



- **Fontaine à Cs:**

$$\nu = 9,2 \text{ GHz}, \Delta\nu_{\text{obs}} = 1 \text{ Hz} \quad \Rightarrow Q_{\text{at}} \approx 10^{10}$$

- **Transition optique étroite :**

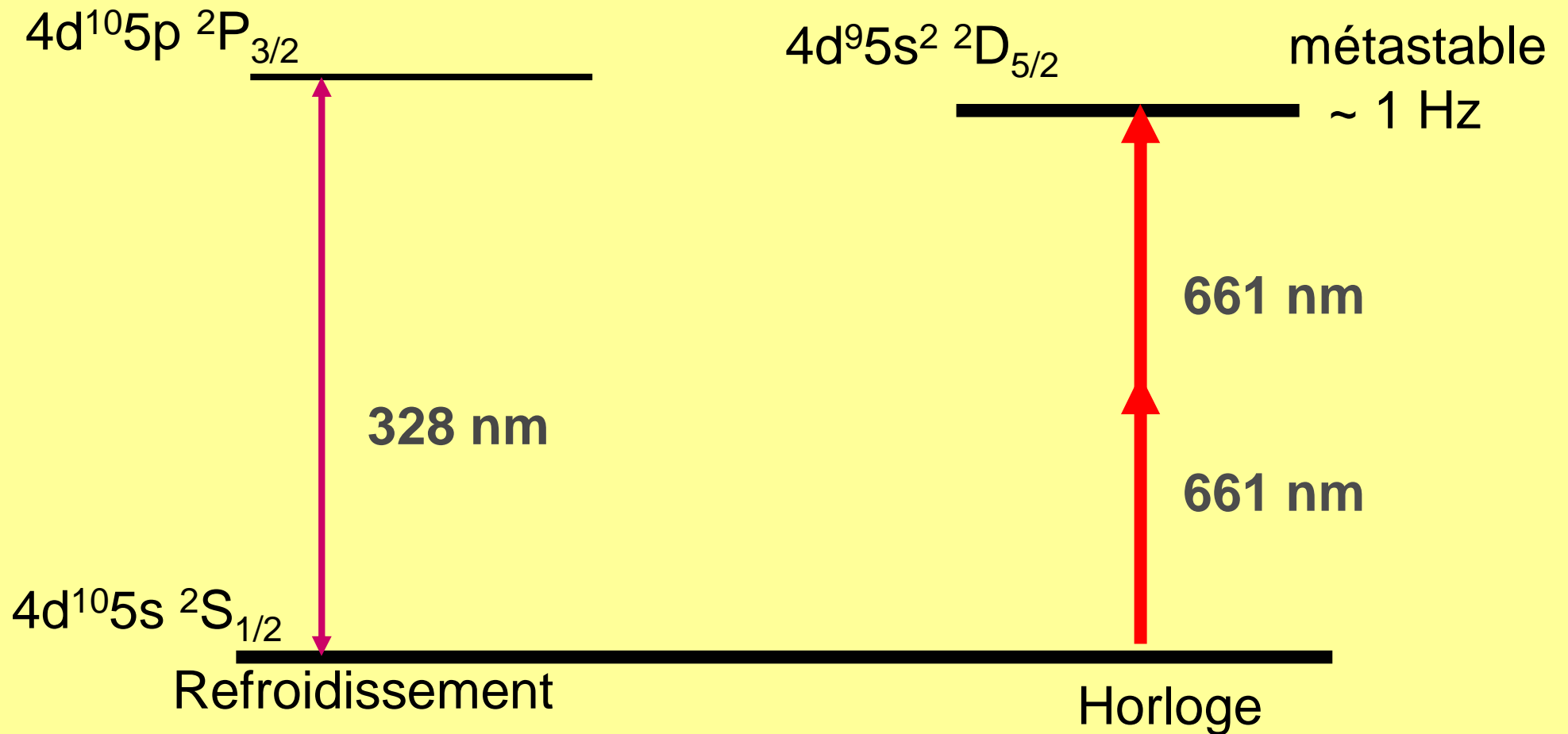
$$\nu = 500 \text{ THz}, \Delta\nu_{\text{obs}} = 1 \text{ Hz} \quad \Rightarrow Q_{\text{at}} \approx 5 \cdot 10^{14}$$

Chaînes de fréquence (lasers femto-secondes)

T6

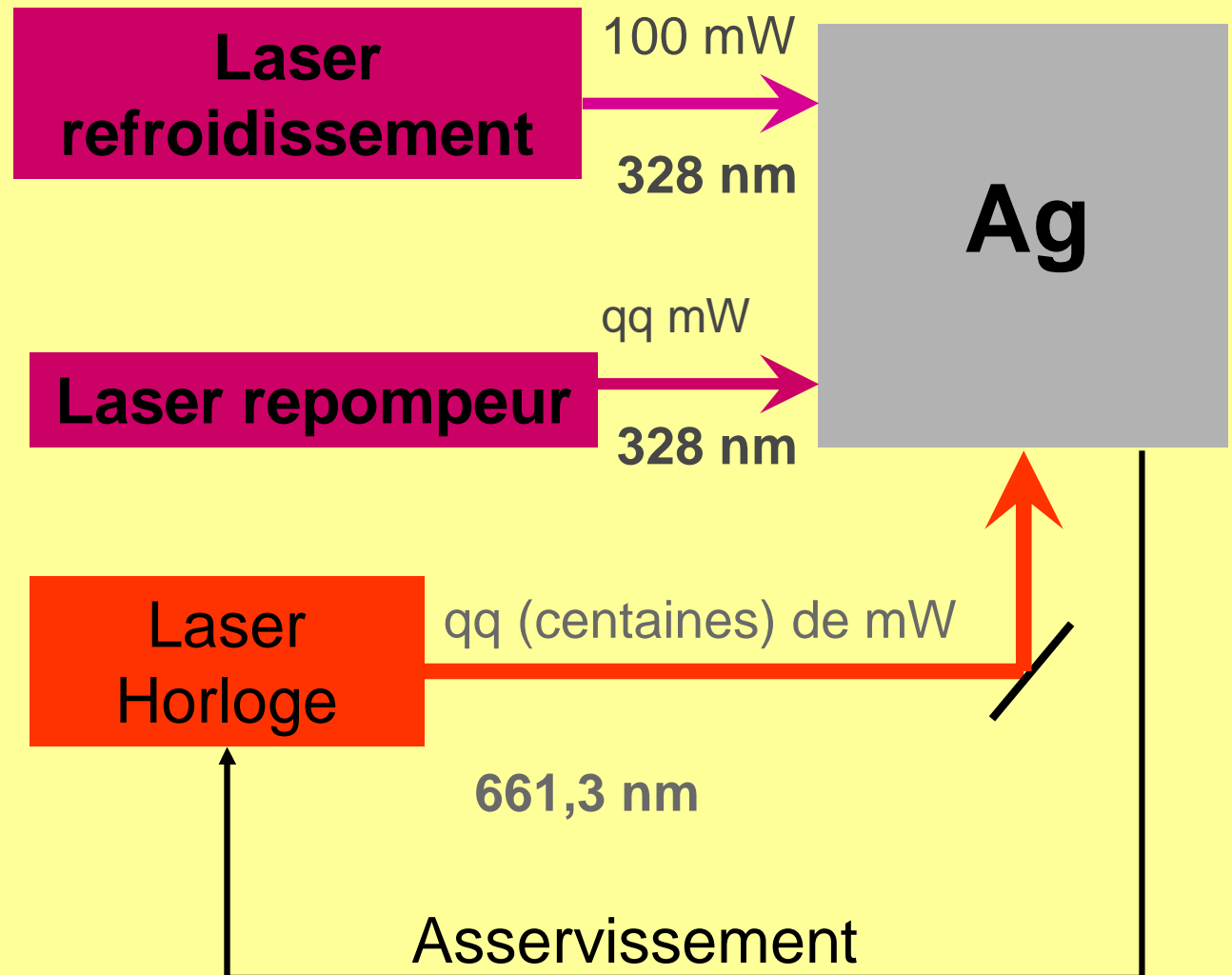
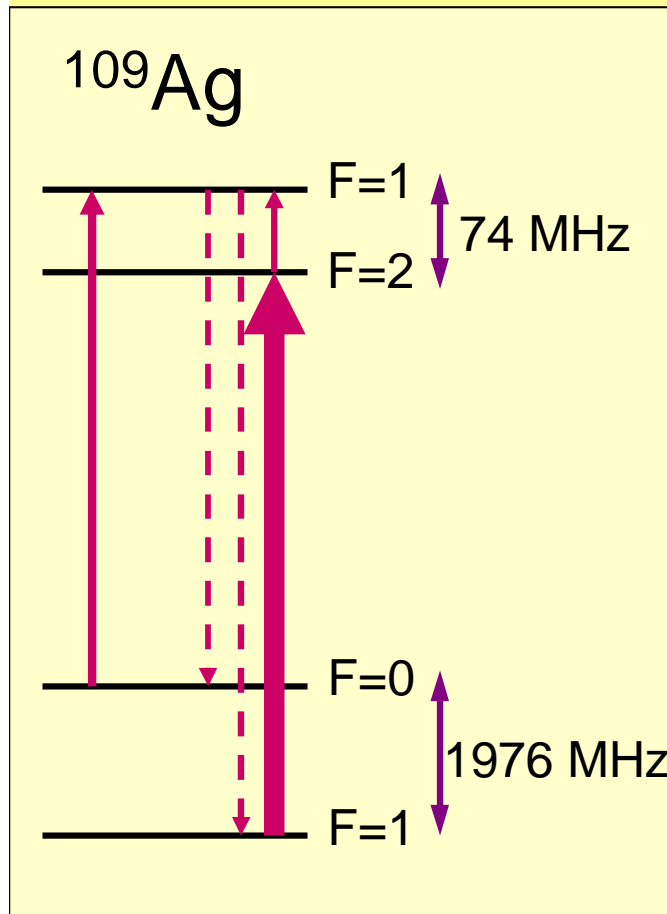
Atome d'argent

Transition à deux photons



T7

Schéma expérimental



T8

Laser de refroidissement 328 nm

- Max Planck Institut für Quantenoptik (Garching) groupe de H. Walther

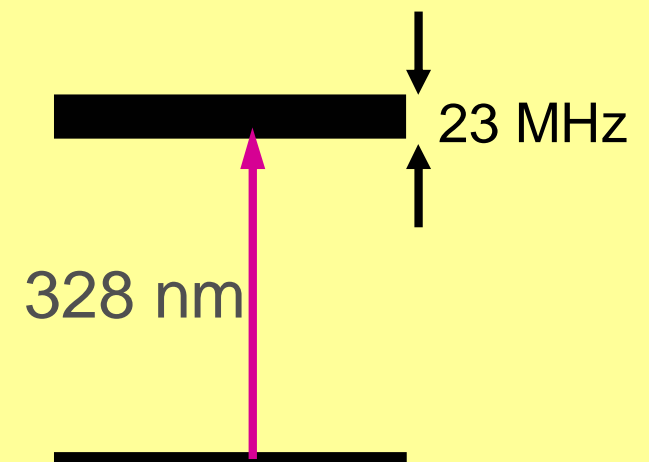
Refroidissement et piégeage laser de 10^6 atomes avec 40 mW à 328 nm (laser à colorant doublé en fréquence)

$I_{\text{sat}} > 85 \text{ mW/cm}^2$

- Université du Sussex 500 mW \rightarrow 100 mW

Nous visons $\sim 100 \text{ mW}$

$\Delta\lambda_{\text{laser}} \ll 23 \text{ MHz}$ (largeur naturelle)

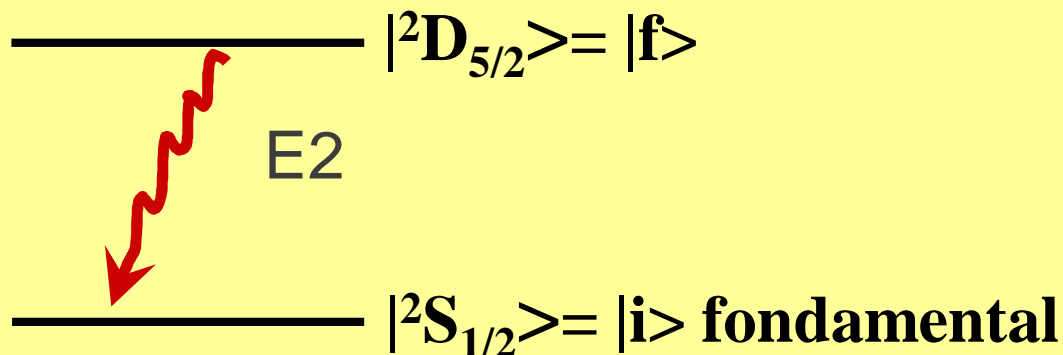


T9 Durée de vie du niveau métastable ${}^2D_{5/2}$

- Bender *et al.*, *Bull. Am. Phys. Soc.* **21** (1976) 599 → $\Delta\nu=0,8$ Hz par comparaison avec $\text{Hg}^+ 5d^96s^2 {}^2D_{5/2}$
- Calcul numérique des éléments de matrice $\langle i|\mathbf{Q}^2|f\rangle$ à l'aide des **codes de Cowan** $\mathbf{Q}^2=3z^2-x^2-y^2$
- Largeur naturelle de la transition quadropolaire :

$$\Gamma \propto \omega^5 |\langle i|\mathbf{Q}^2|f\rangle|^2$$

$$\Delta\nu({}^2D_{5/2}) = 1,0 (3) \text{ Hz}$$



T10

Taux de transition à deux photons

- Calcul numérique des éléments de matrice $\langle i|\mathbf{d}|r\rangle$ et $\langle r|\mathbf{d}|f\rangle$ à l'aide des **codes de Cowan**
- Taux de transition à deux photons :

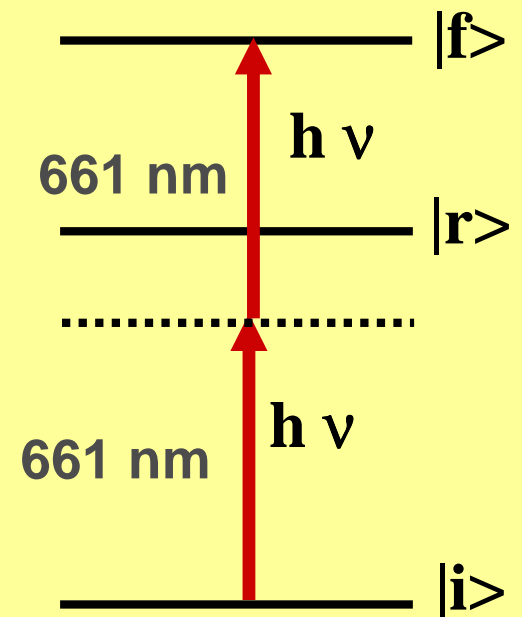
$$\Gamma \propto \left| \sum_r \frac{\langle i|\mathbf{d}|r\rangle \langle r|\mathbf{d}|f\rangle}{h\nu - E_r} \right|^2$$

- Pour ${}^2S_{1/2} F \rightarrow {}^2D_{5/2} F'$ le taux $\Gamma_{F=0F'=2}$ vaut

$$\Gamma_{02} = 7 \times 10^{-8} (P^2/S^2) / \Delta\nu_{\text{obs}} \text{ s}^{-1}$$

P = puissance laser, S = surface,

$\Delta\nu_{\text{obs}}$ = largeur de raie expérimentale



Laser d'horloge 661 nm

Probabilité d'excitation faible



Puissance élevée

Estimation



$$P_{\text{laser}} \approx 400 \text{ mW}$$

$$\Delta\lambda_{\text{laser}} \sim 1 \text{ kHz à terme} < 1 \text{ Hz}$$

Introduction

A) Horloge optique à base d'atomes d'argent

B) Choix du cristal

C) Laser solide multimode

- Définition du laser
- Problèmes thermiques
- Puissance laser

D) Laser monomode

- Cavités linéaires
- Cavités en anneau et doublage intra-cavité

Conclusion et perspectives

T13 Etat de l'art des lasers pour la métrologie des fréquences optiques

- **diodes rouges**

- ✓ compactes
- ✓ puissances peu élevées

- **lasers à colorants**

- ✓ puissants, accordables,
- ✓ encombrants, délicats à utiliser et peu fiables

- **lasers solides pompés par diode**

- ✓ puissants, compacts, stables intrinsèquement,
- ✓ doublage nécessaire

Généralités sur les lasers solides

La plupart des lasers solides sont dans le **proche IR**
(1 – 1,5 μm)

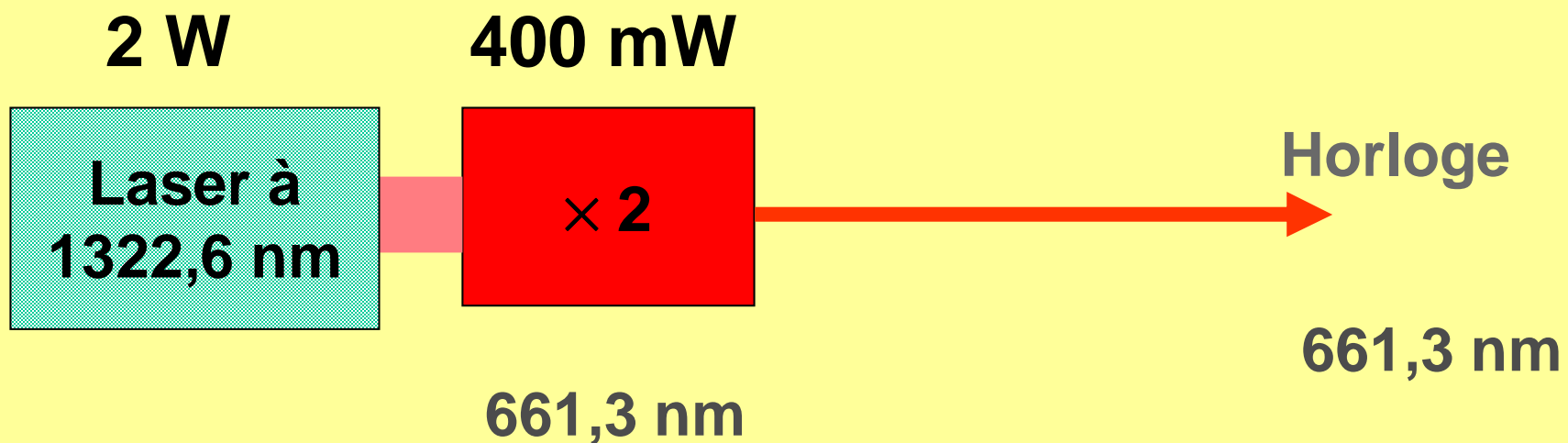
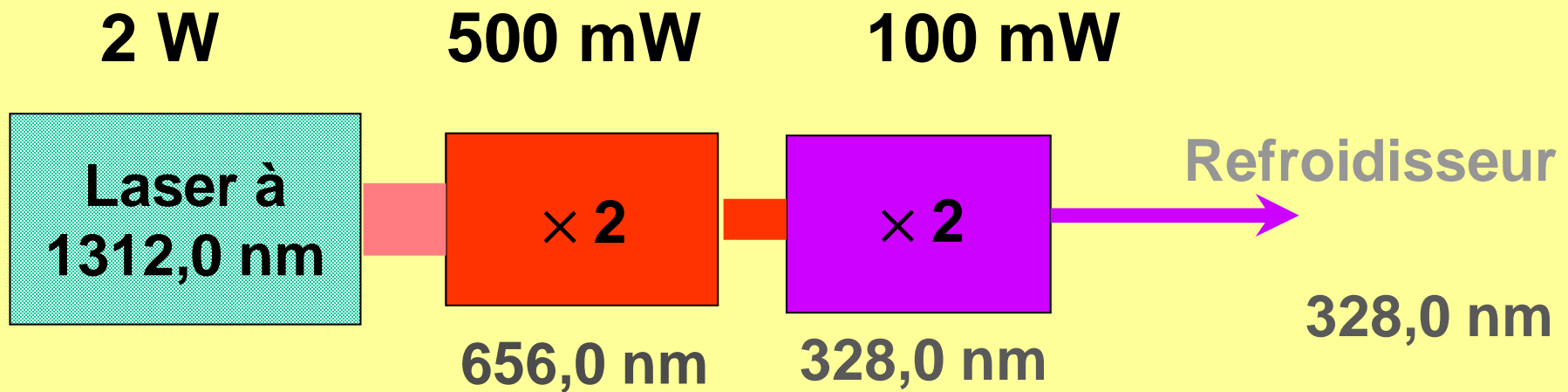
Typiquement **quelques watts**



Nécessité de **doubler la fréquence laser**

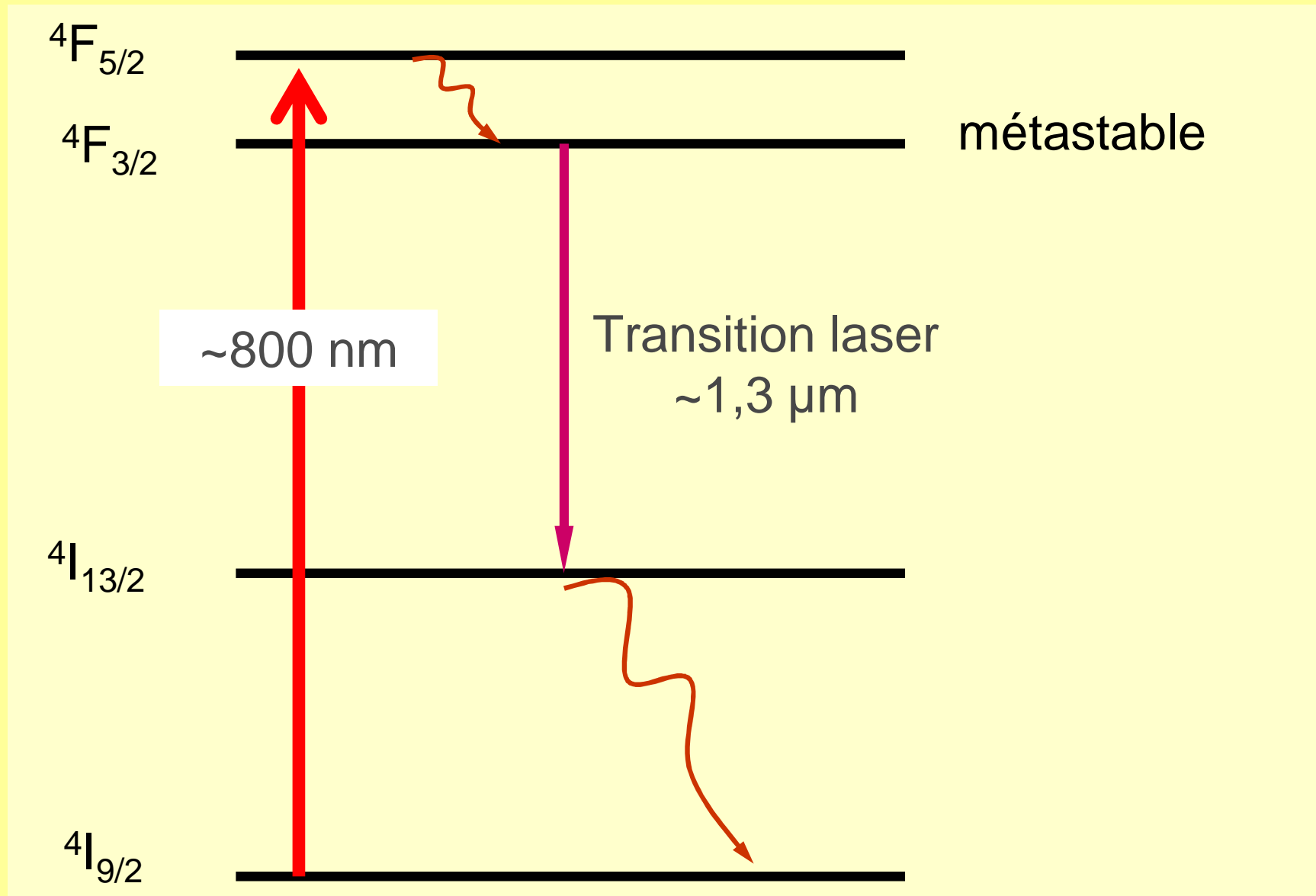
$$\lambda_{\text{laser}} \sim 1,3 \mu\text{m}$$

Objectifs à 1,3 μm



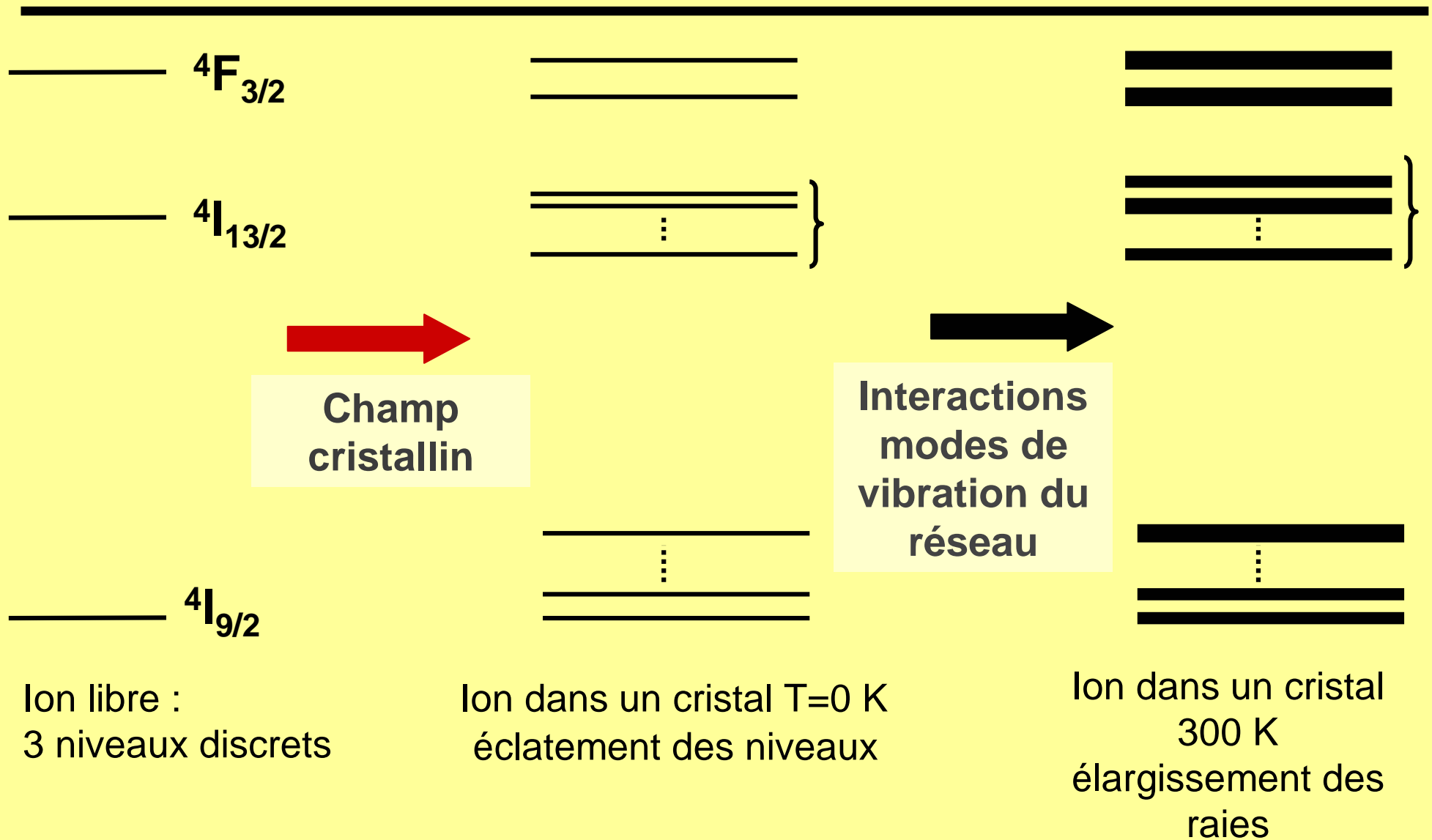
T16

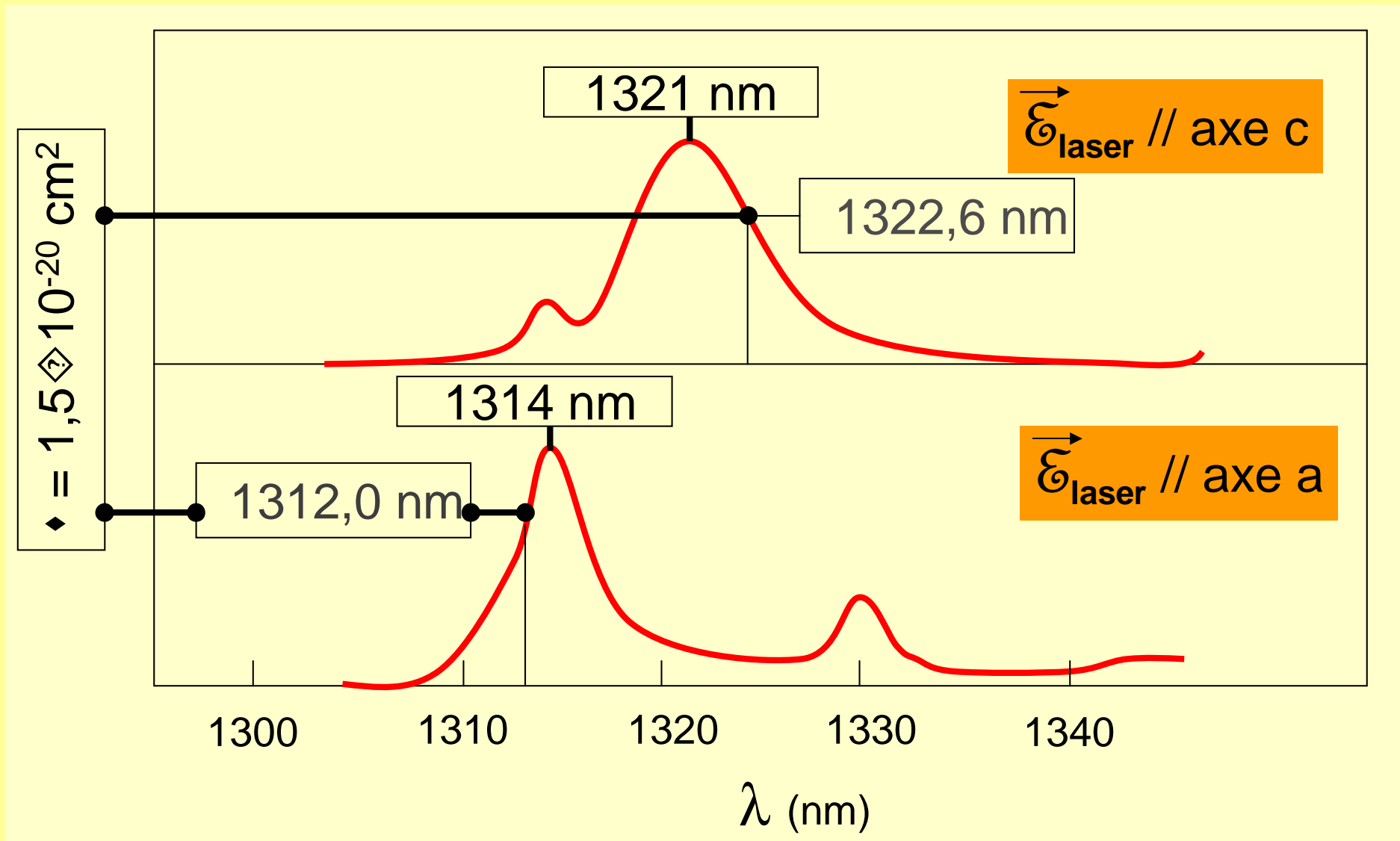
Ion dopant Nd³⁺



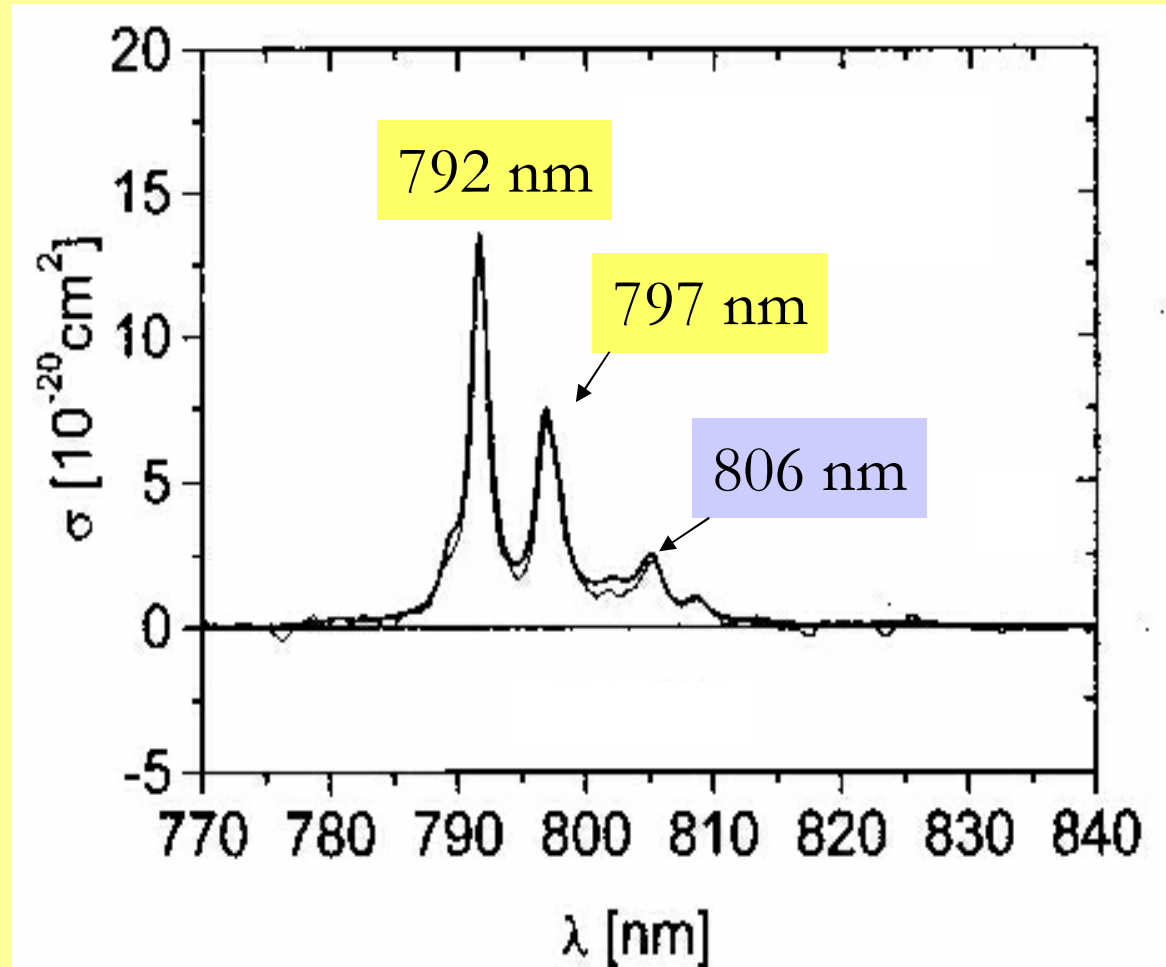
T17

Nd³⁺ dans un cristal



Emission du Nd:YLF *uni*axe

Absorption du Nd:YLF



L. Fornasiero, T. Kellner, S. Kück, J.P. Meyn, P.E.-A. Möbert, G. Hubert, Appl. Phys. B 68 (1999), 67-72

Introduction

A) Horloge optique à base d'atomes d'argent

B) Choix du cristal laser

C) Laser solide multimode

- Définition du laser
- Problèmes thermiques
- Puissance laser

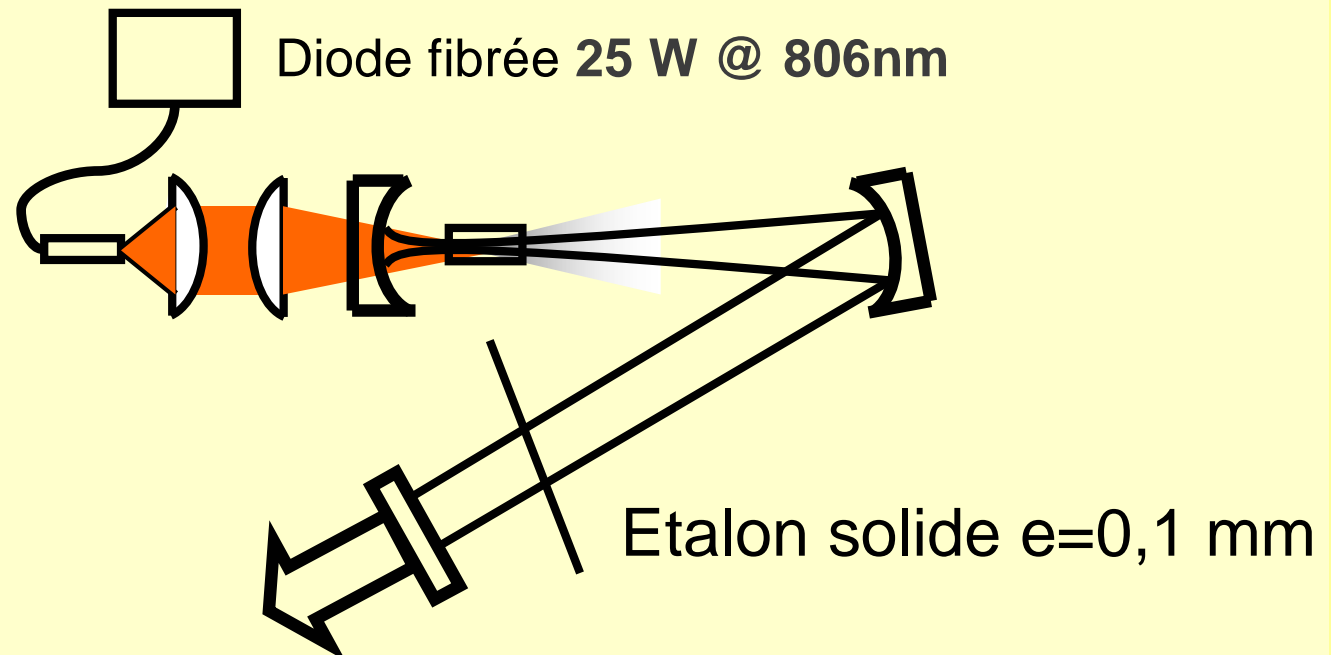
D) Laser monomode

- Cavités linéaires
- Cavités en anneau et doublage intra-cavité

Conclusion et perspectives

La diode laser fibrée de puissance

- **Pompage longitudinal est plus efficace**
- **Diode fibrée**
 - **Commodité d'utilisation**
 - **Forme circulaire → homogénéité de la densité de puissance**
 - **Forme circulaire → meilleur recouvrement avec le mode fondamental**



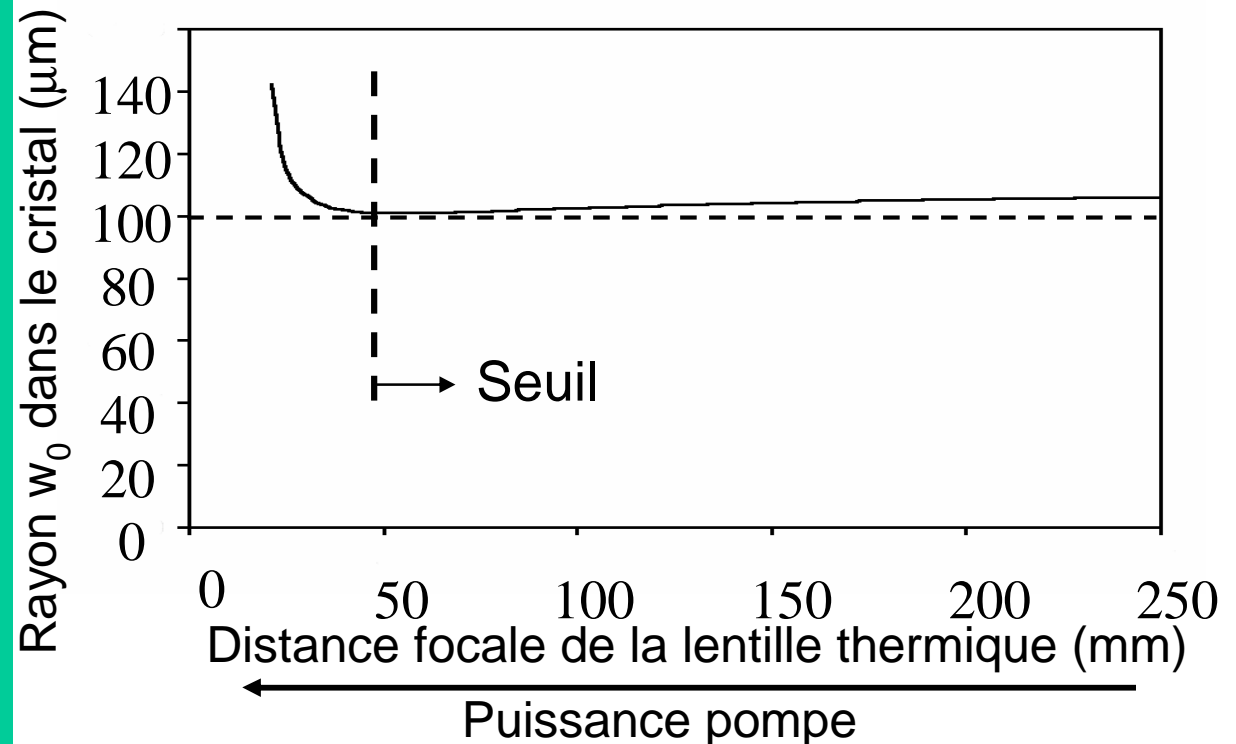
Laser à trois miroirs

- **Trois distances ajustables** → flexibilité taille du faisceau laser
- **Bras collimaté** → insertion éléments sans modification propriétés de la cavité
- **Lentille thermique forte** → modification des domaines de stabilité et la taille des faisceaux dans les cavités lasers

Cavité 3 miroirs



Insensibilité aux effets de lentille thermique



T23

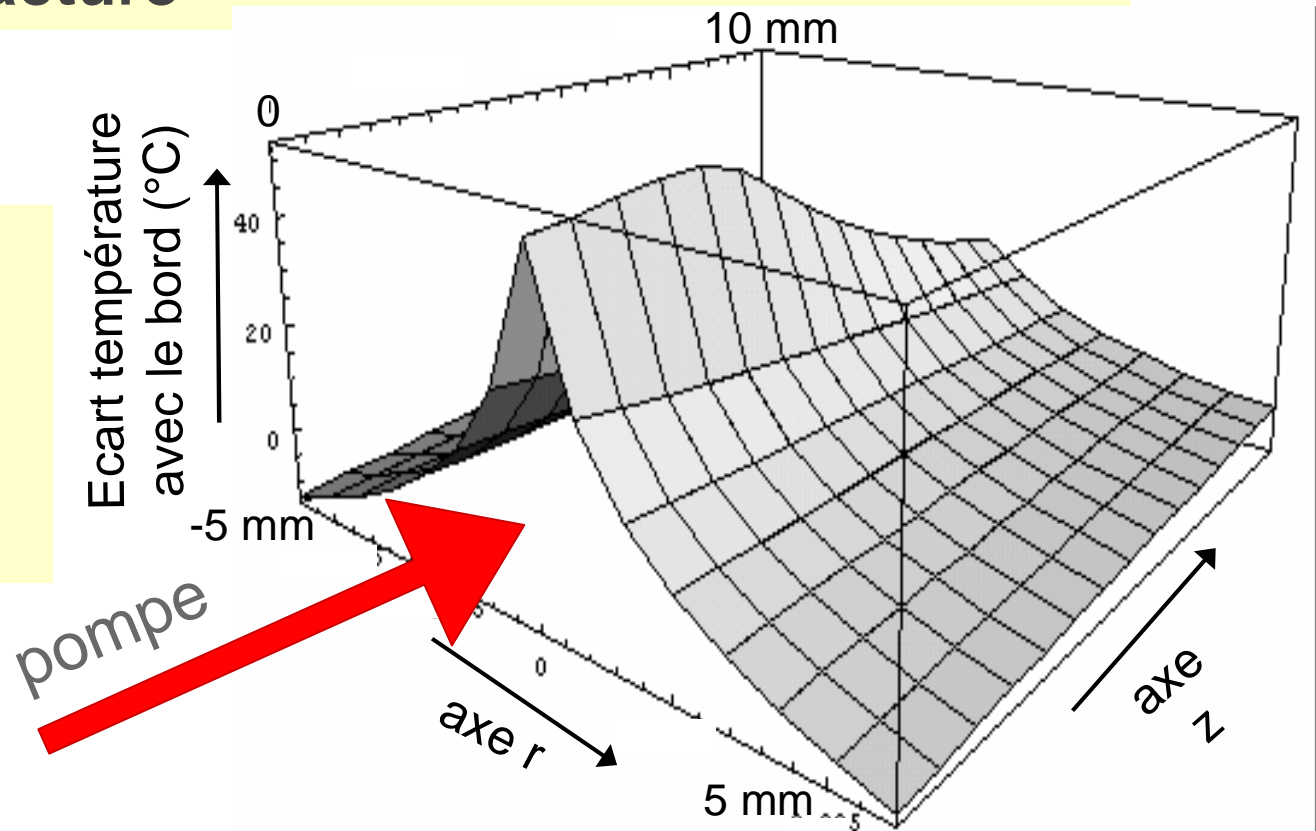
Effets thermiques dans le Nd:YLF

Gradient de température conduit à contraintes
⇒ **fracture thermique**

Sacrifice de cristaux Nd:YLF ⇒ puissance $P_{\text{abs,lim}}$
absorbée avant fracture

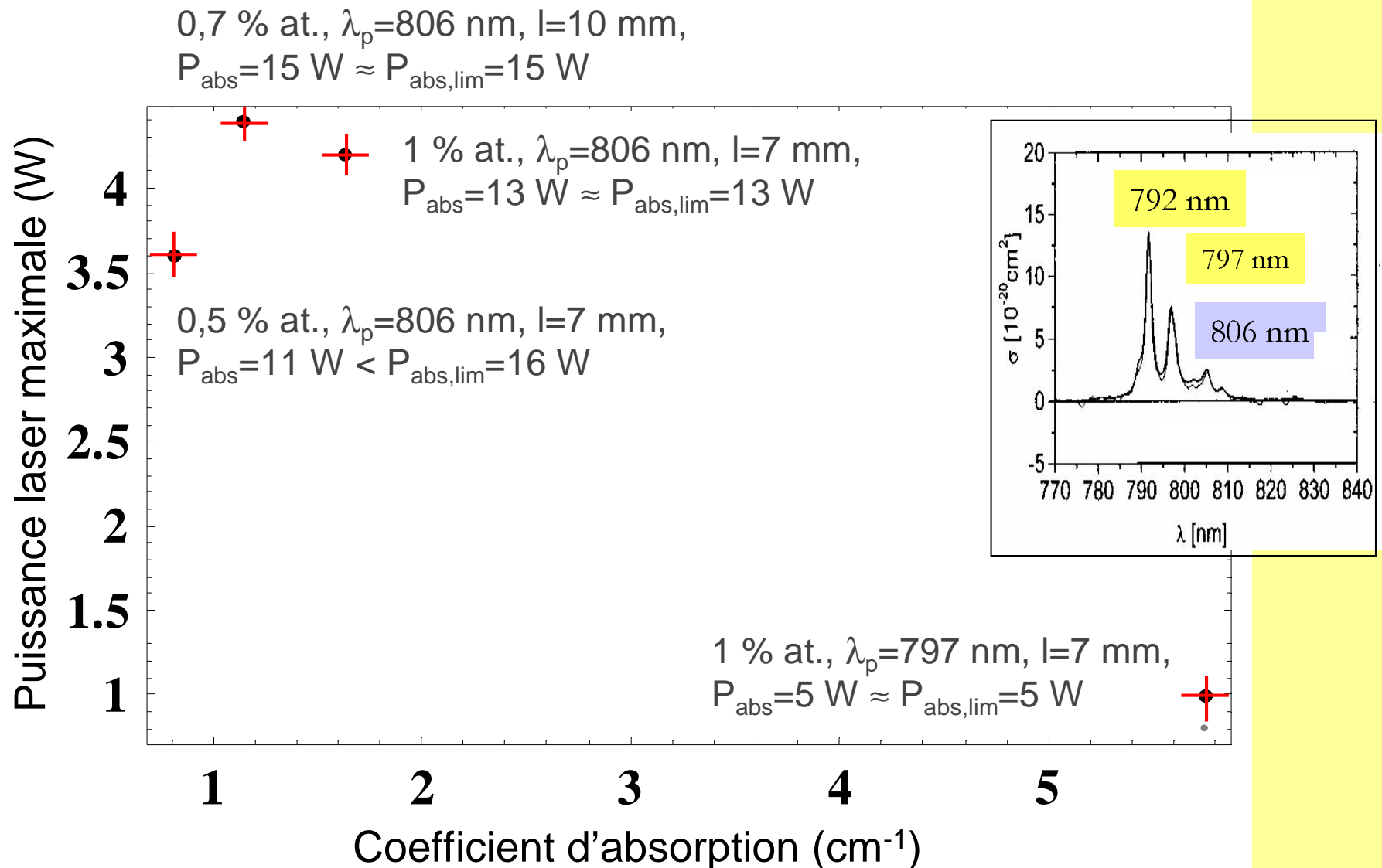
Nd:YLF 1 % Nd

Fracture pour ~13 W
de puissance
absorbée à 806 nm.



Optimisation de la puissance laser

Puissance laser maximale pour différents dopages



T25

Coefficient d'absorption optimal

Modèle numérique basé sur les *équations cinétiques* du laser

λ_p, l sont fixées $\rightarrow P_{abs} \sim P_{abs,lim}$ avec $P_{p,inc} < 25 W$

Paramètres de la cavité laser sont fixés

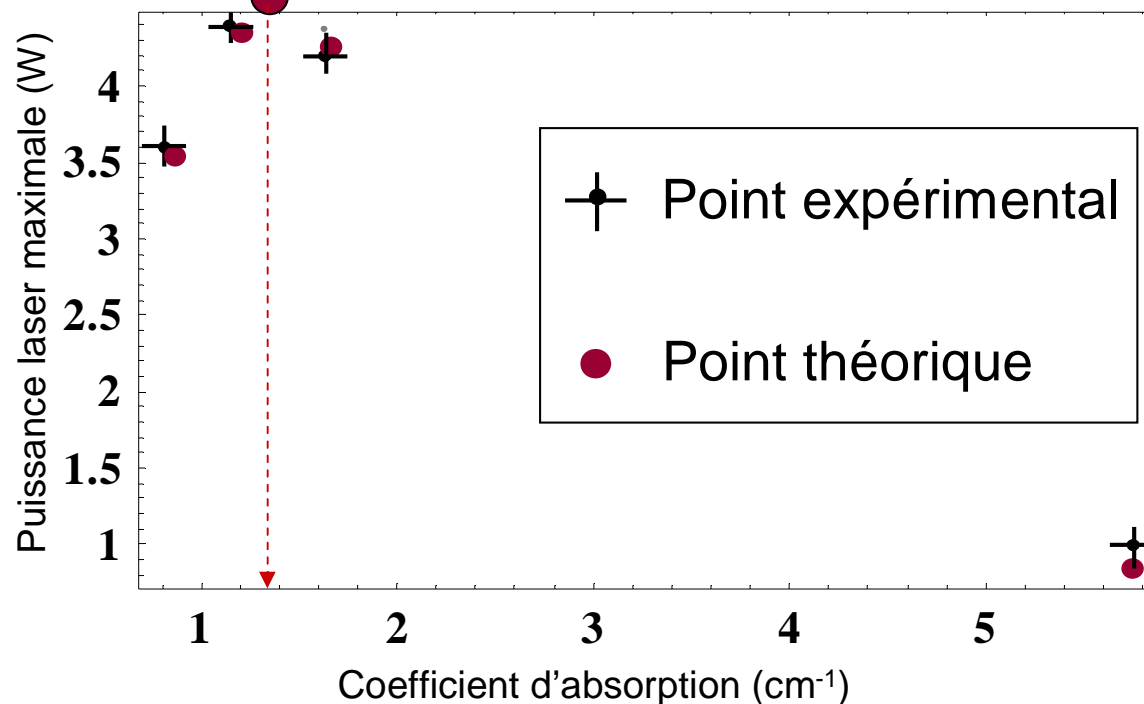
$\forall \alpha_p \approx 1,63[Nd] \text{ cm}^{-1} \rightarrow$ Puissance laser maximale

$$\alpha_{p,opt} \approx 1,25 \text{ cm}^{-1}$$

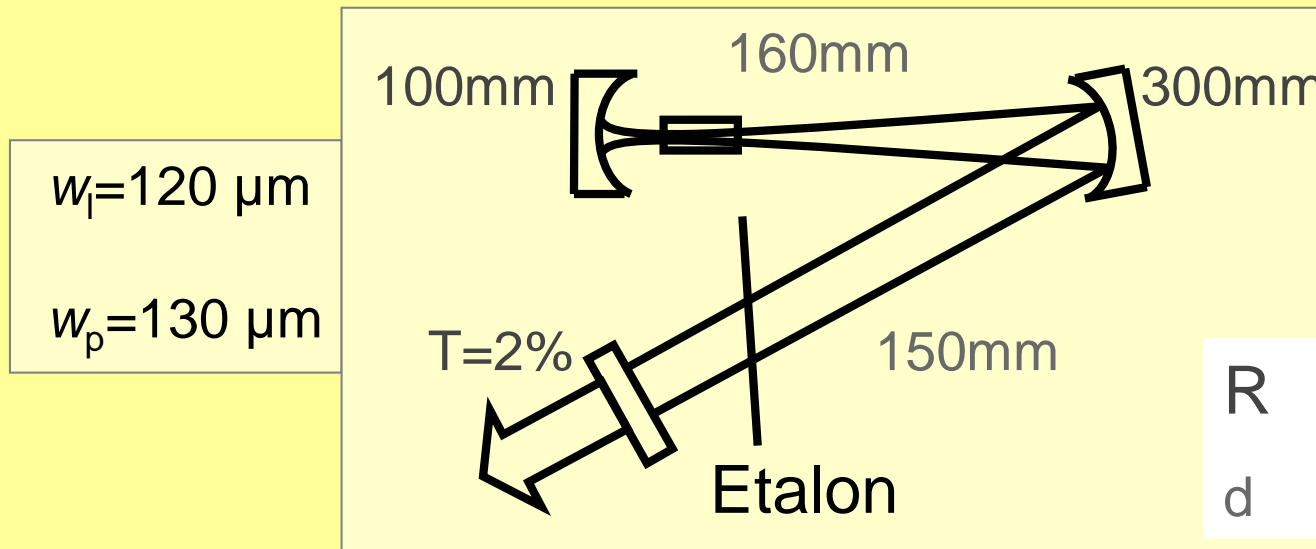
$$P_{abs} = 15 W,$$

$$[Nd] = 0,78 \%,$$

$$l = 10 \text{ mm}, \lambda_p = 806 \text{ nm}$$



Résultats



Nd:YLF, $l=10 \text{ mm}$, $[\text{Nd}]=0,7 \%$

multimode 1322,6 et 1312 nm

$$P_{l,\text{max}} \approx 4 \text{ W}$$

$$P_{\text{abs}} \approx 15 \text{ W @ } 806 \text{ nm}$$

Premier laser solide à 1322,6 et 1312 nm

Introduction

A) Horloge optique à base d'atomes d'argent

B) Choix du cristal laser

C) Laser solide multimode

- Définition du laser
- Problèmes thermiques
- Puissance laser

D) Laser monomode

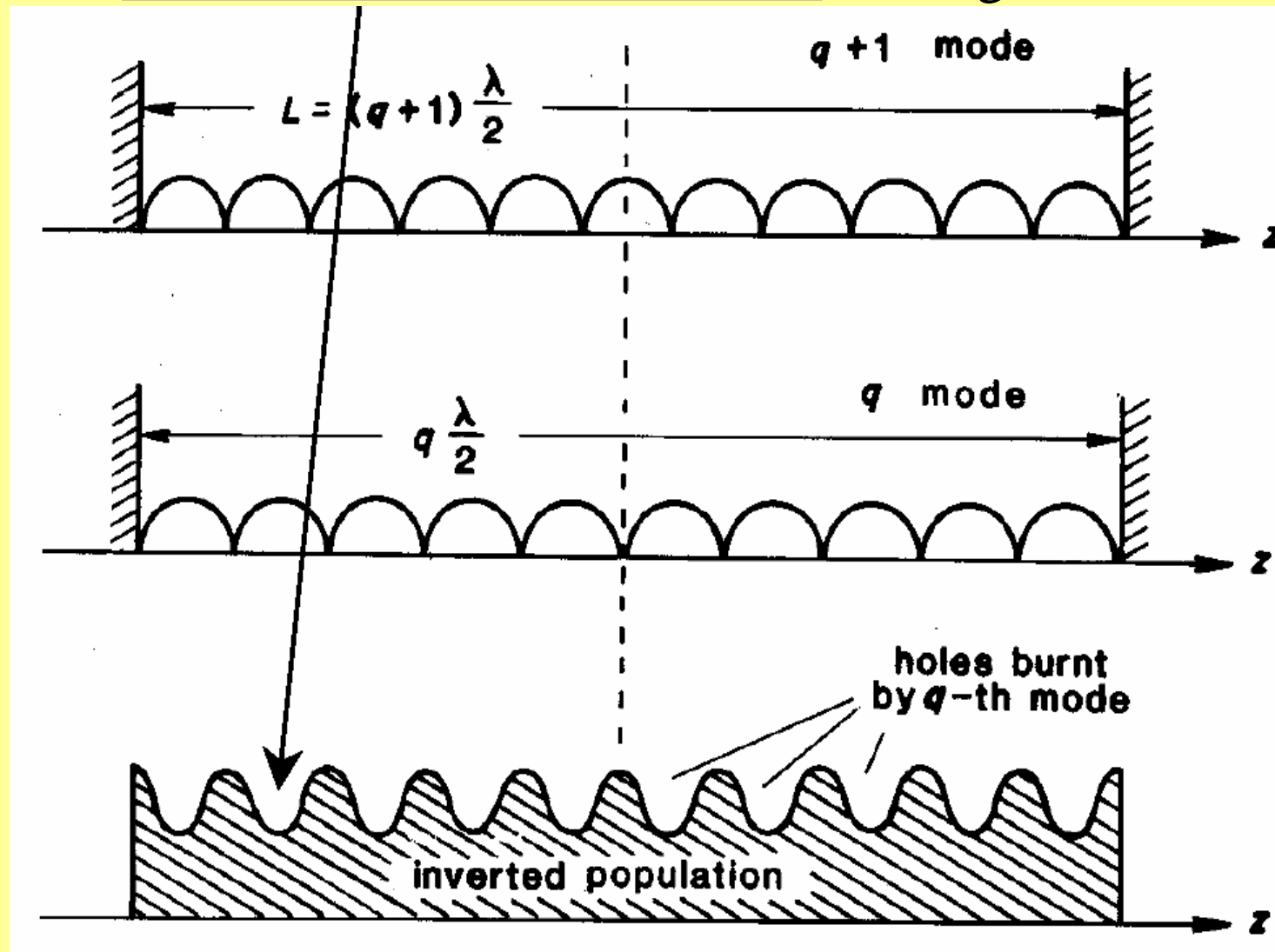
- Cavités linéaires
- Cavités en anneau et doublage intra-cavité

Conclusion et perspectives

« Hole Burning » spatial

« Hole Burning » spatial

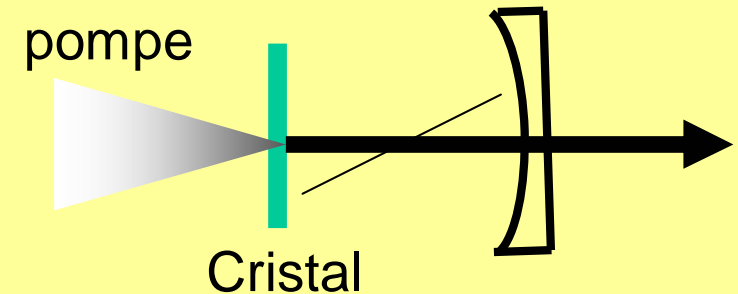
Siegman, *Lasers*



Obtention laser monomode

- Cristal mince \Rightarrow cavité courte, longueur optique L tel que :
 $c/2L > \Delta\nu_{\text{gain}}$

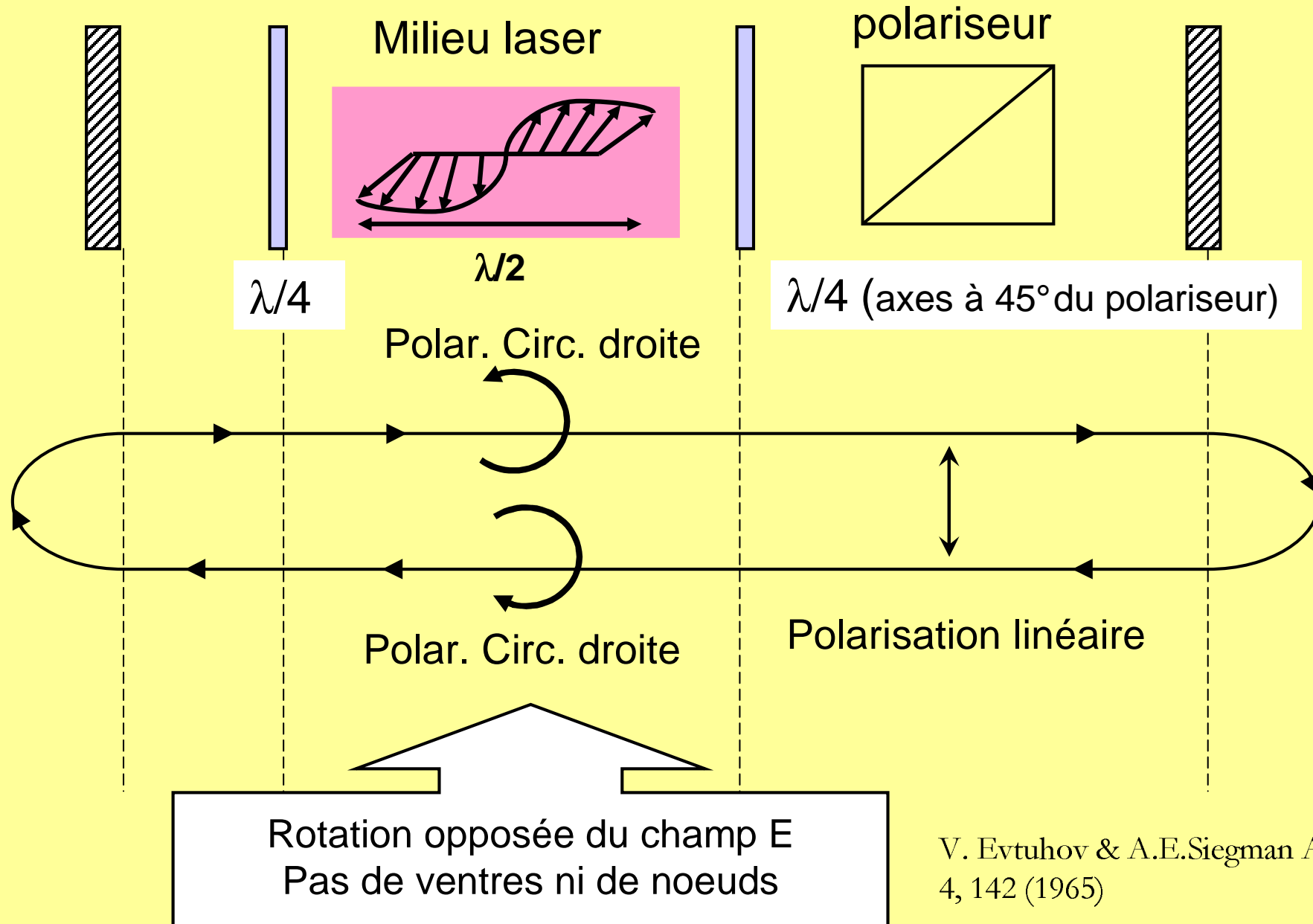
$$\Rightarrow L = 0,1 - 0,5 \text{ mm}$$



ou prévenir la formation d'ondes stationnaires \Rightarrow éliminer le
« hole burning » spatial, **via**

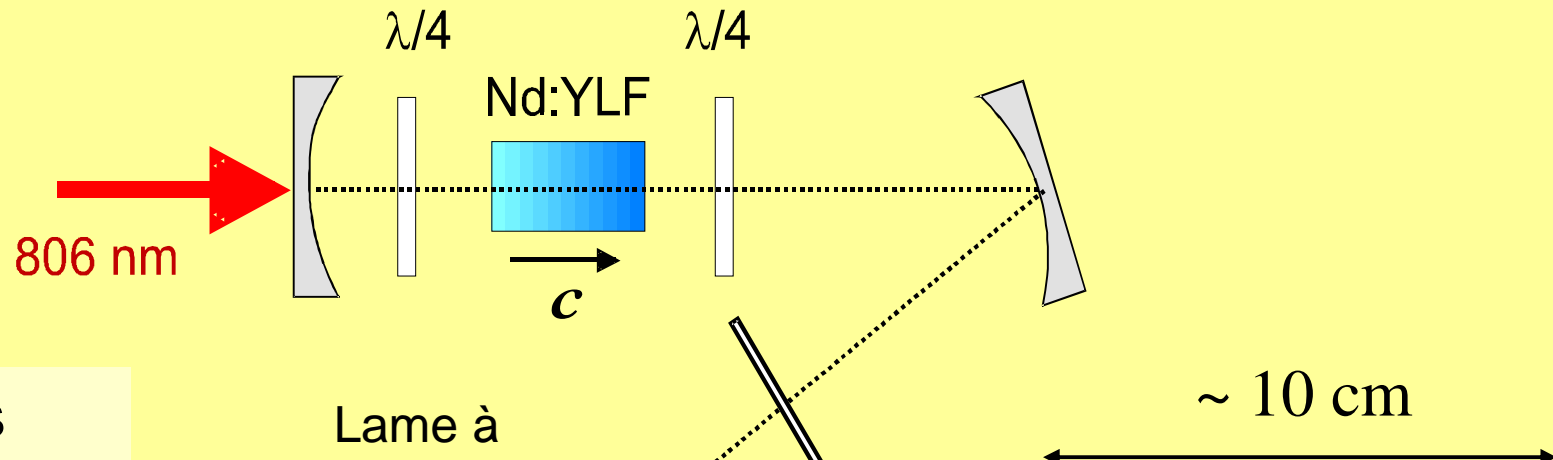
- résonateur à **mode hélicoïdal**
- laser en **anneau unidirectionnel**

T30 Principe du laser à mode hélicoïdal



T31

Laser Nd:YLF à mode hélicoïdal



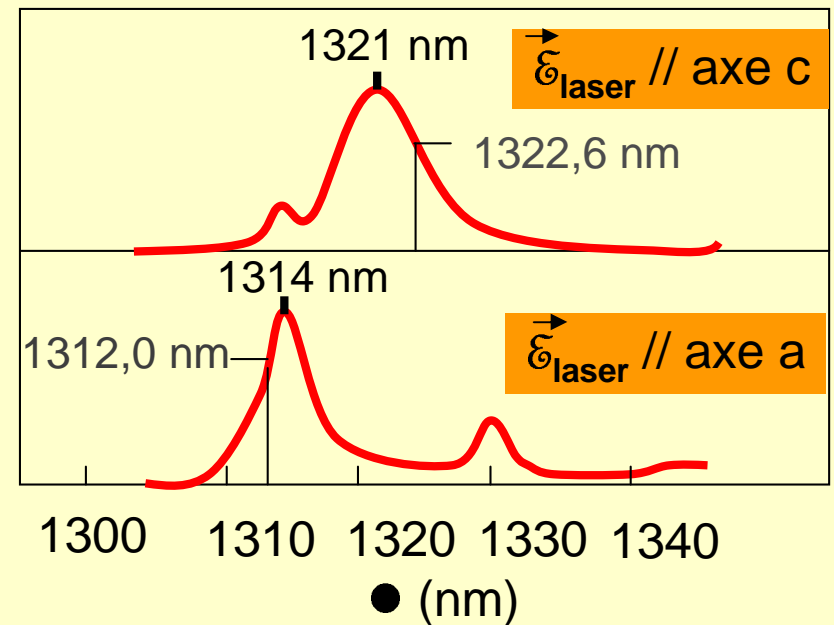
Ondes polarisées
circulairement
dans le cristal



Cristal
optiquement
isotrope

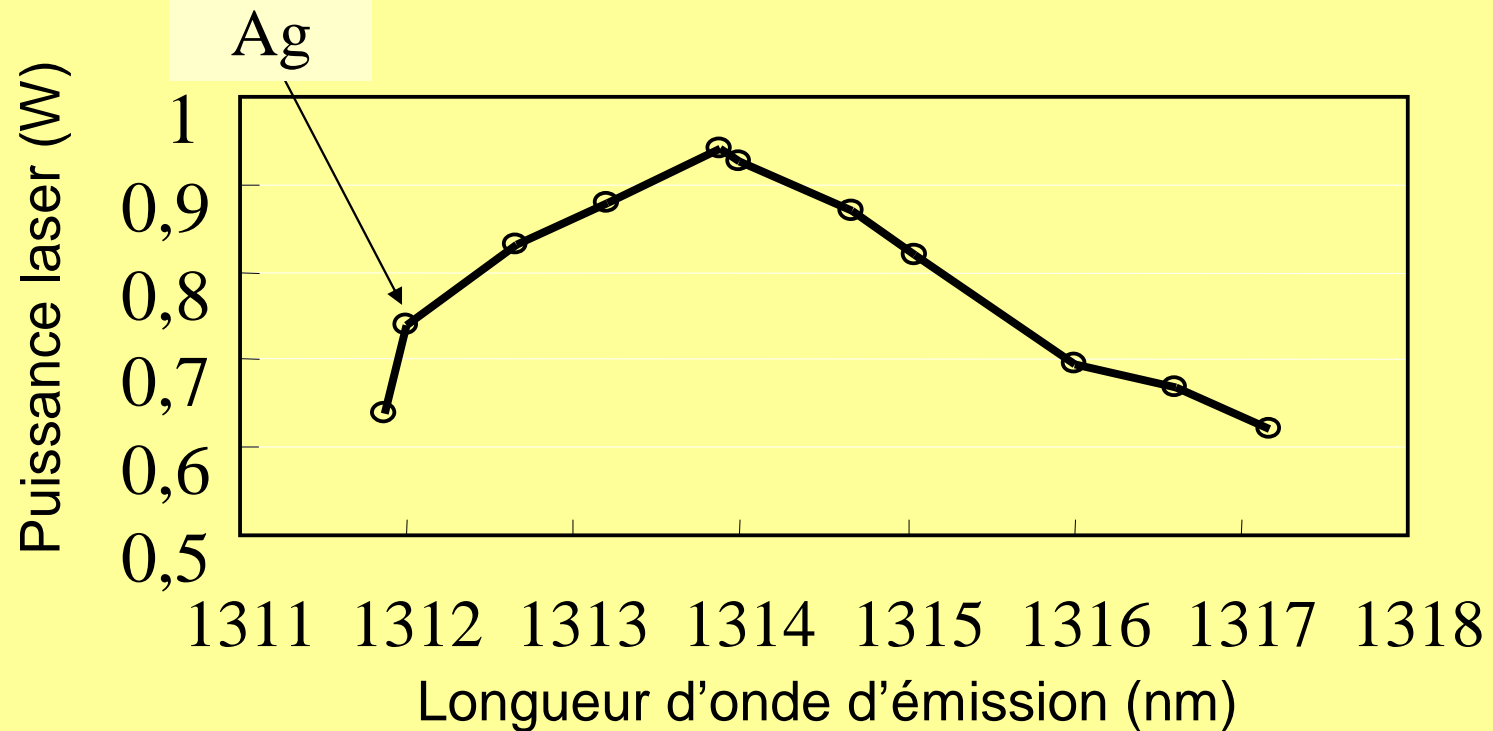
1312 nm
T=2%

Etalon 0,1 mm
d'épaisseur



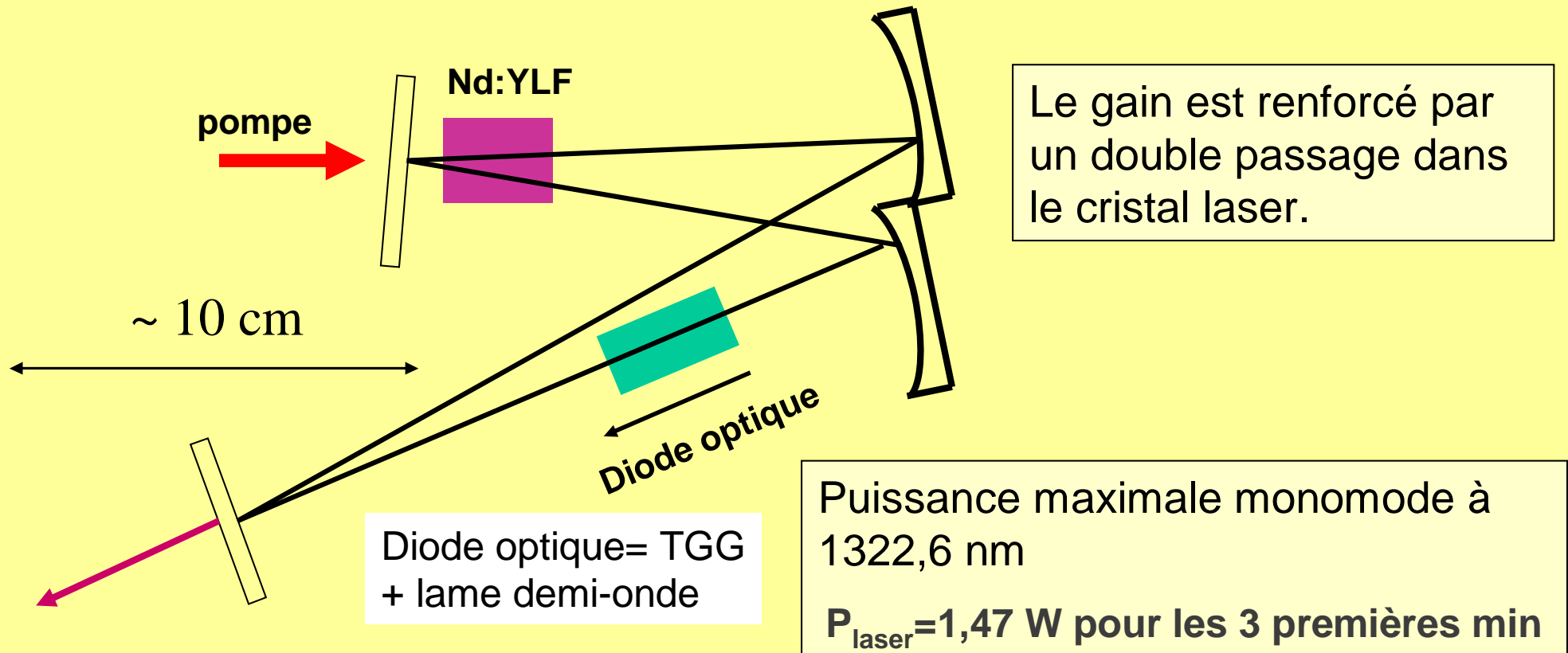
Résultats du laser à mode hélicoïdal

- $P_{\text{laser}} = 750 \text{ mW}$ à 1312 nm monomode longitudinal (refroidissement de l'argent)
- Monomode accordable



T33

Laser unidirectionnel en anneau



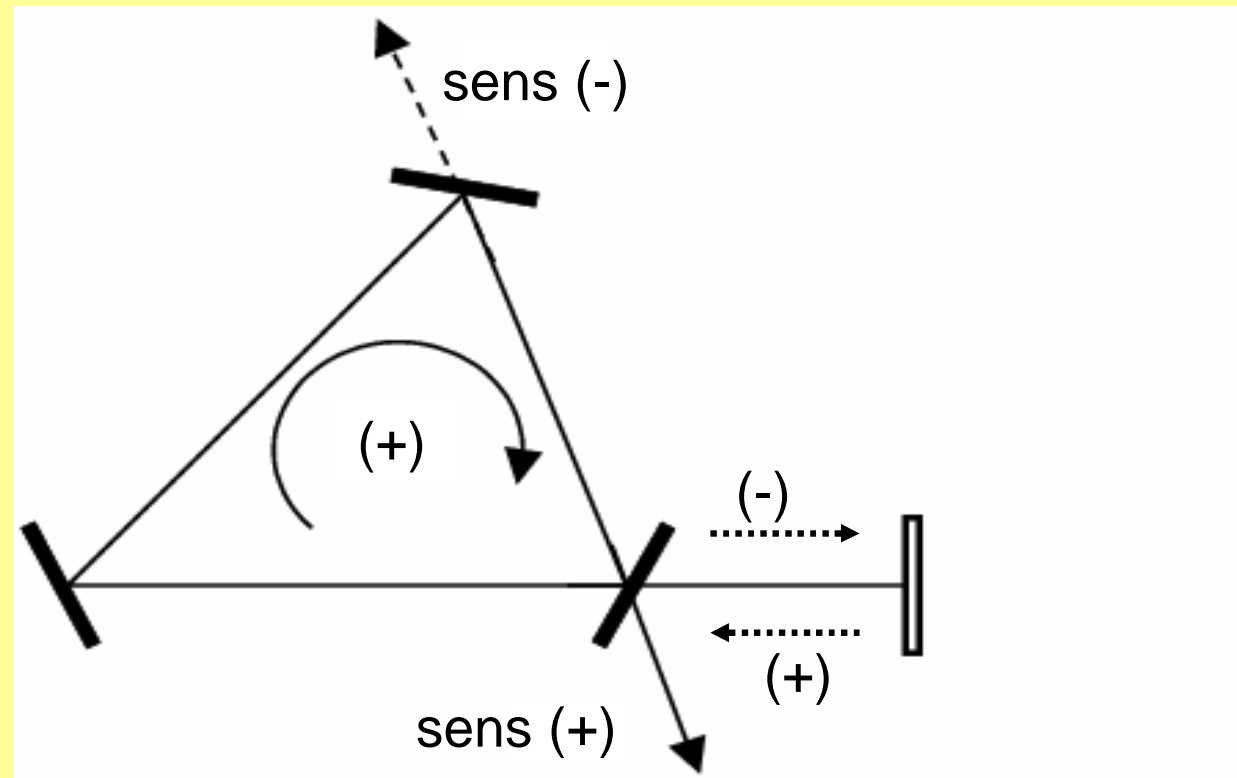
• **Problème** : rotateur Faraday 4° de rotation (TGG) absorbe 2 % de 1322,6 nm

⇒ fracture du TGG

T34

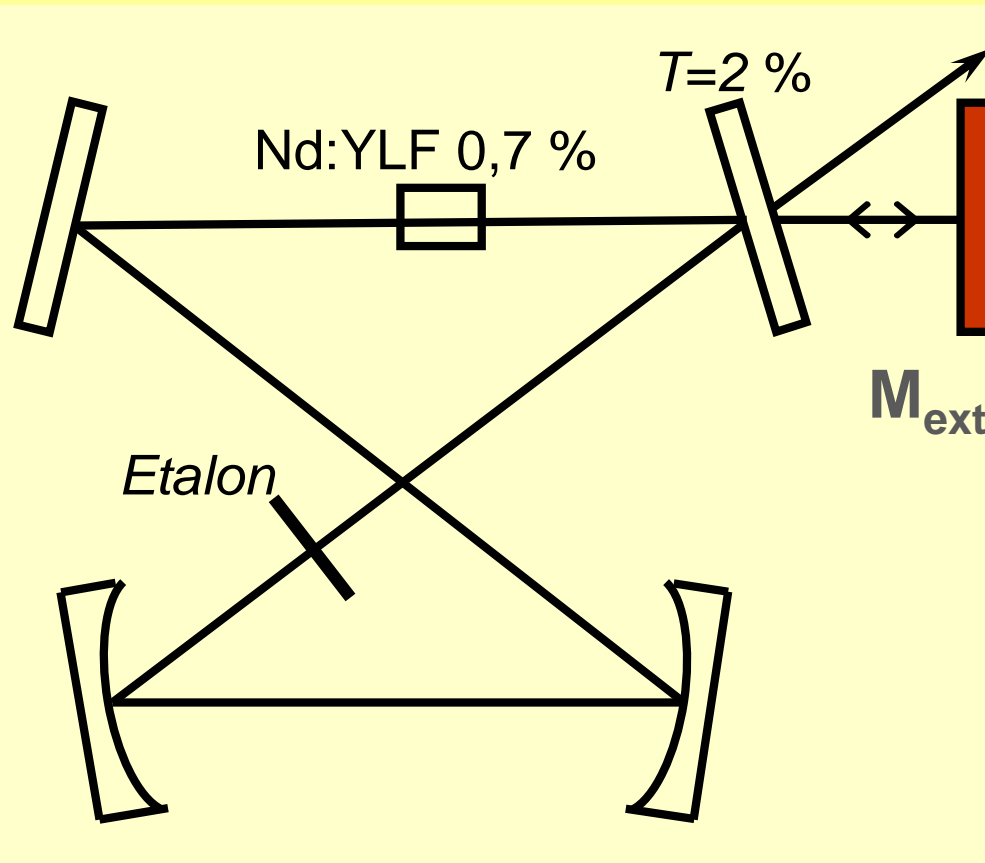
Laser en anneau avec miroir externe

Siegman,
« Lasers » p. 534

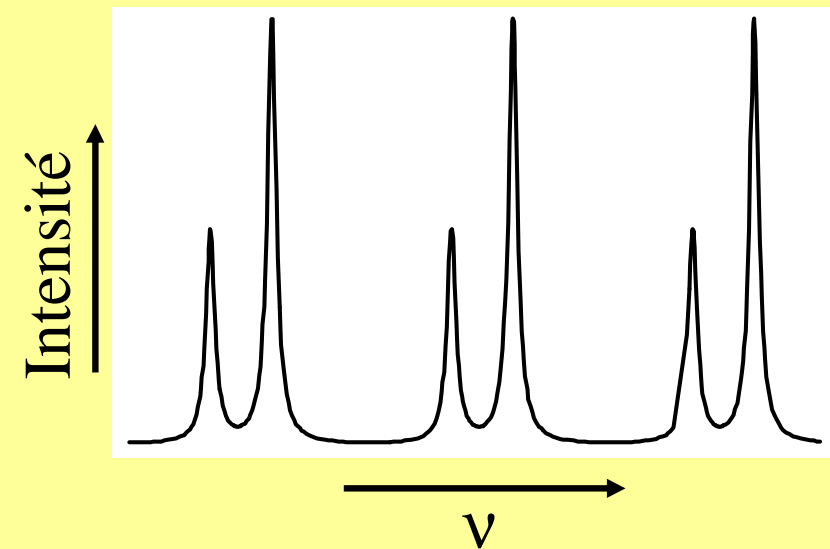


- En régime stationnaire, la puissance laser dans le sens (-) ne peut s'annuler totalement car les photons (-) servent à créer des photons (+).

Réalisation



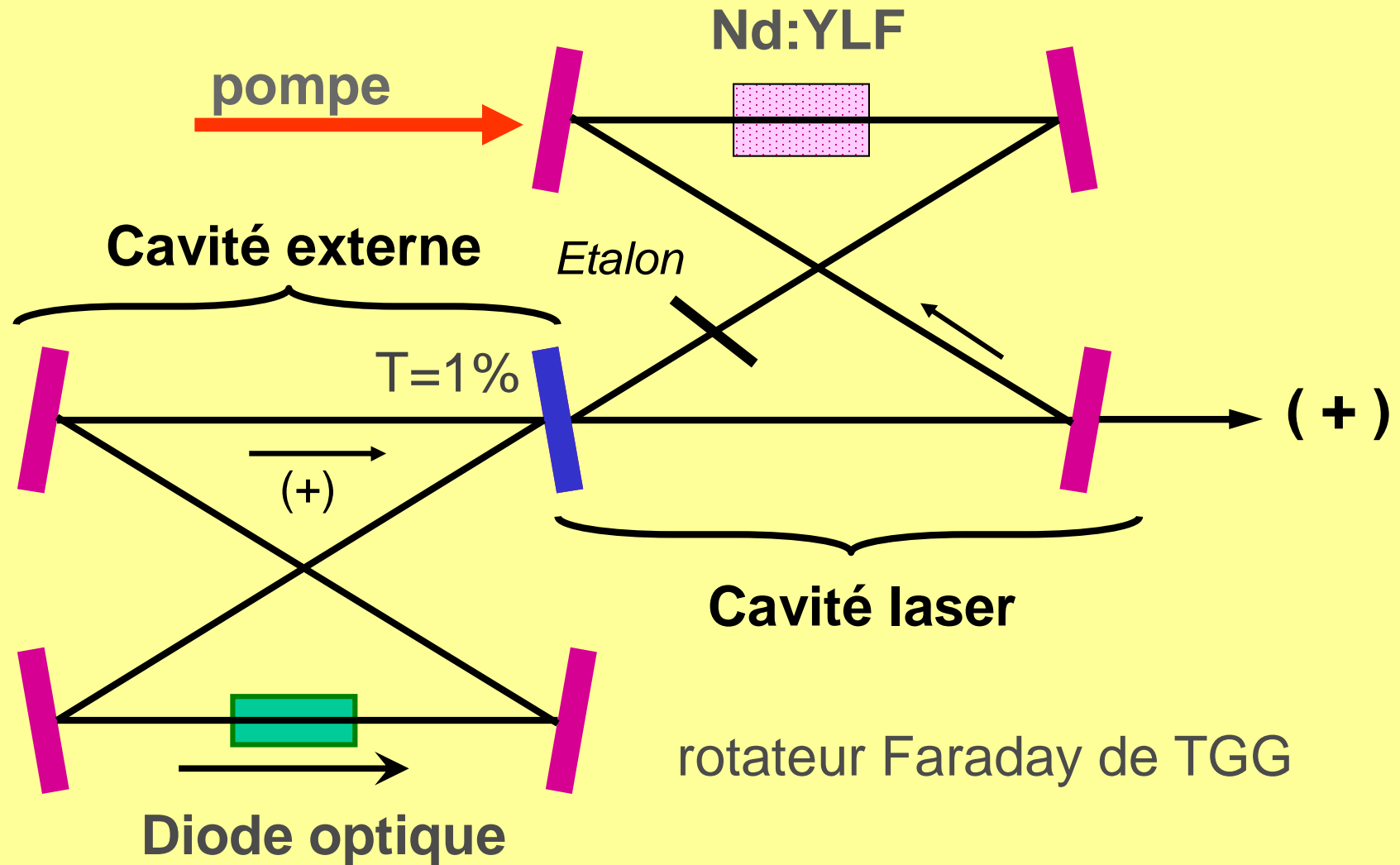
Spectre modal
obtenu avec ou
sans miroir externe



$P_{(+)} \sim 100 \times P_{(-)} \Rightarrow$ quasi-unidirectionnel \Rightarrow multimode

$P_{(+)} \sim 2 \text{ W}$

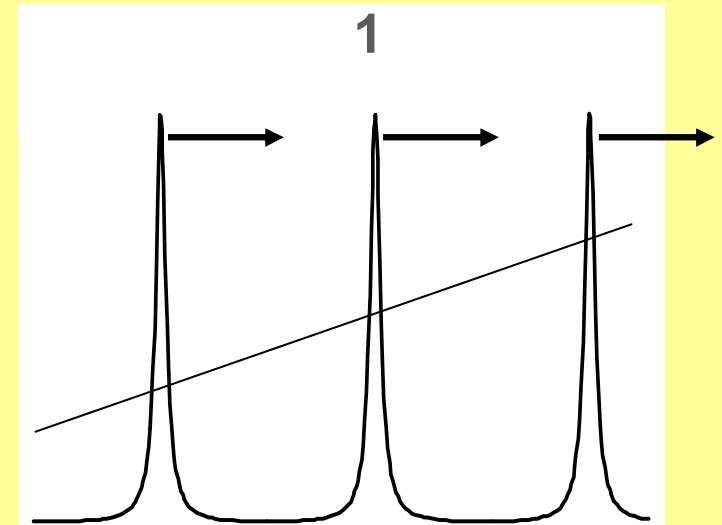
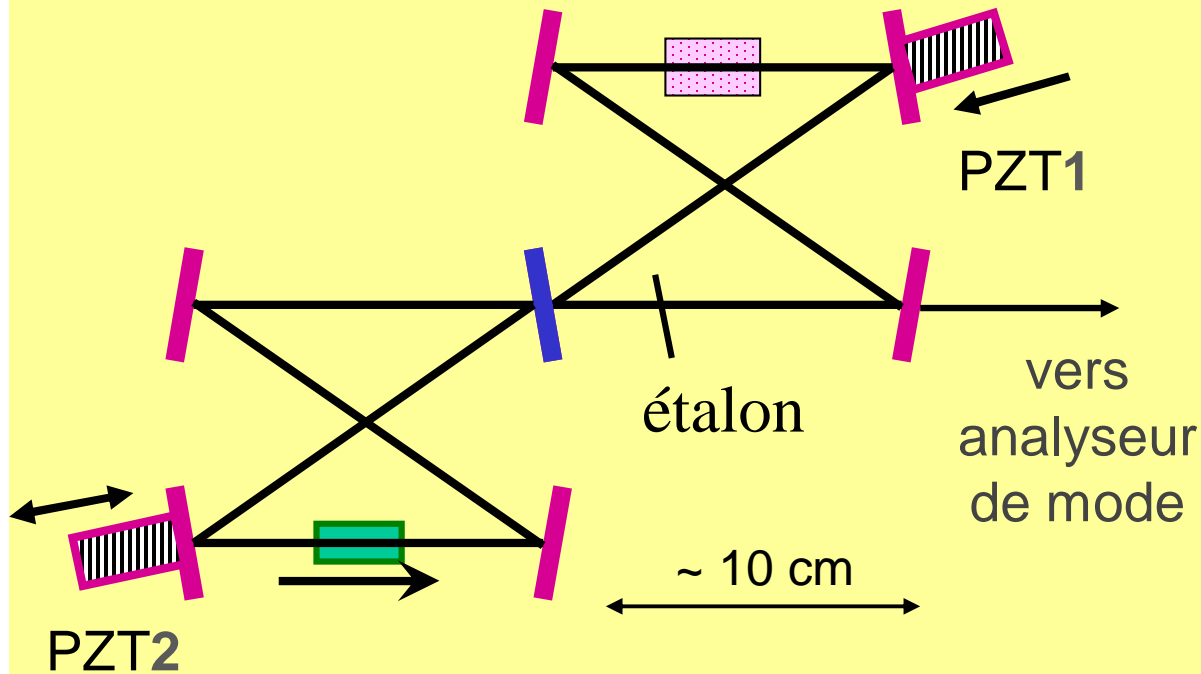
T36 La CADOER Cavity en Anneau avec une Diode Optique à l'Extérieur du Résonateur



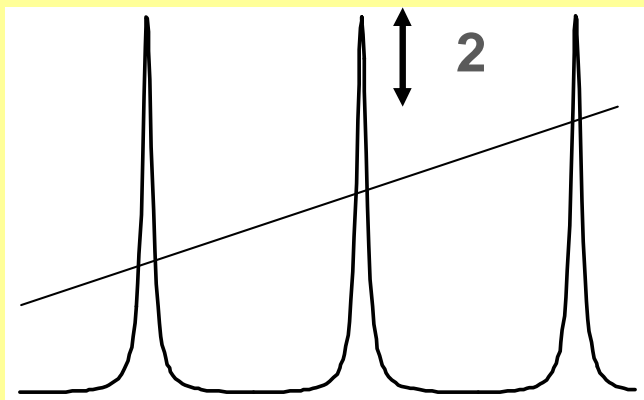
• Ici les photons (+) servent aussi à créer des photons (+) et donc $P_{(-)} \sim 0$.

Le laser est **unidirectionnel** \Rightarrow monomode

Propriétés de la CADOER



PZT1 : accordabilité
sans sauts de mode
(sur 6 GHz)

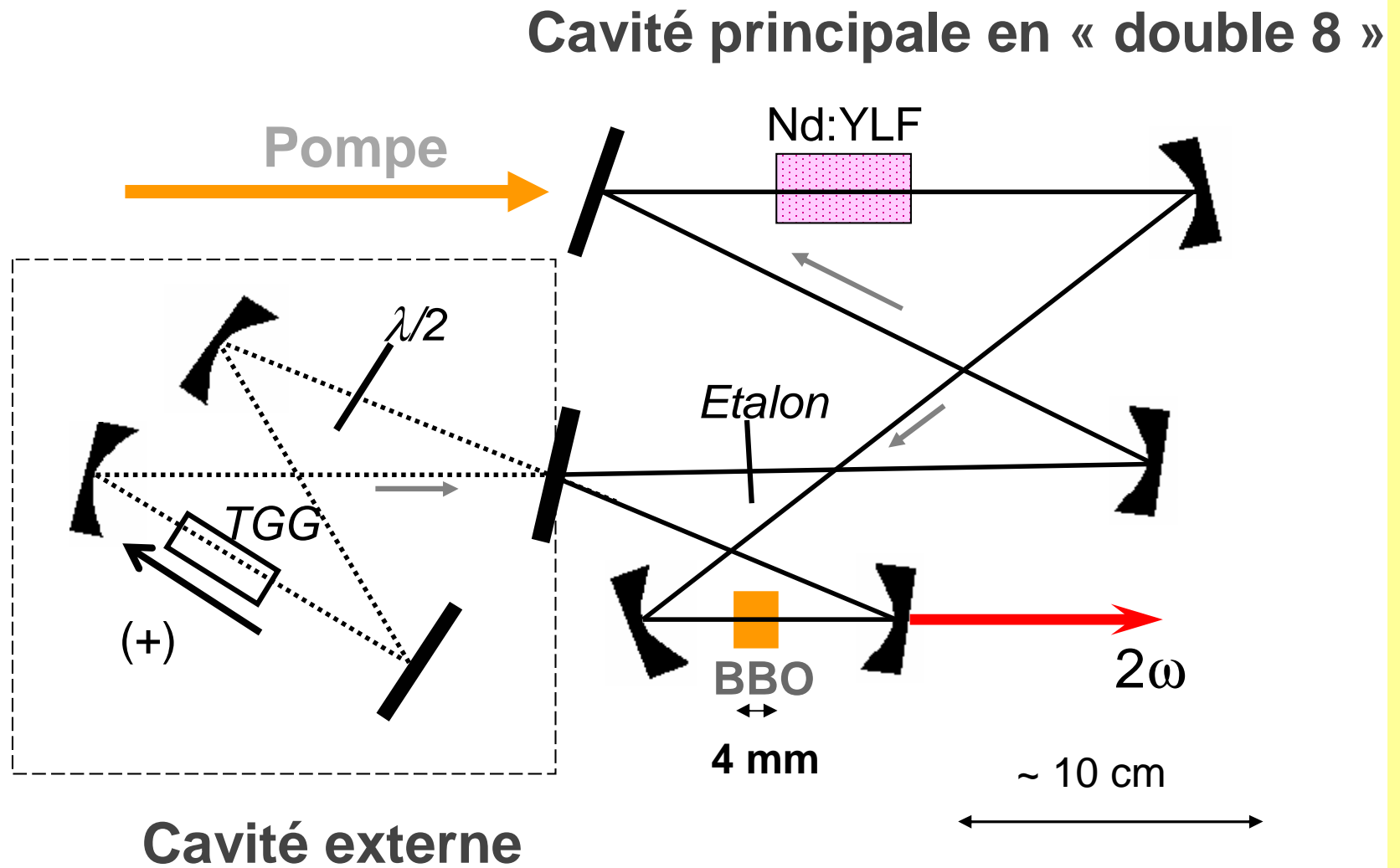


Mode longitudinal
peu influencé par
PZT2

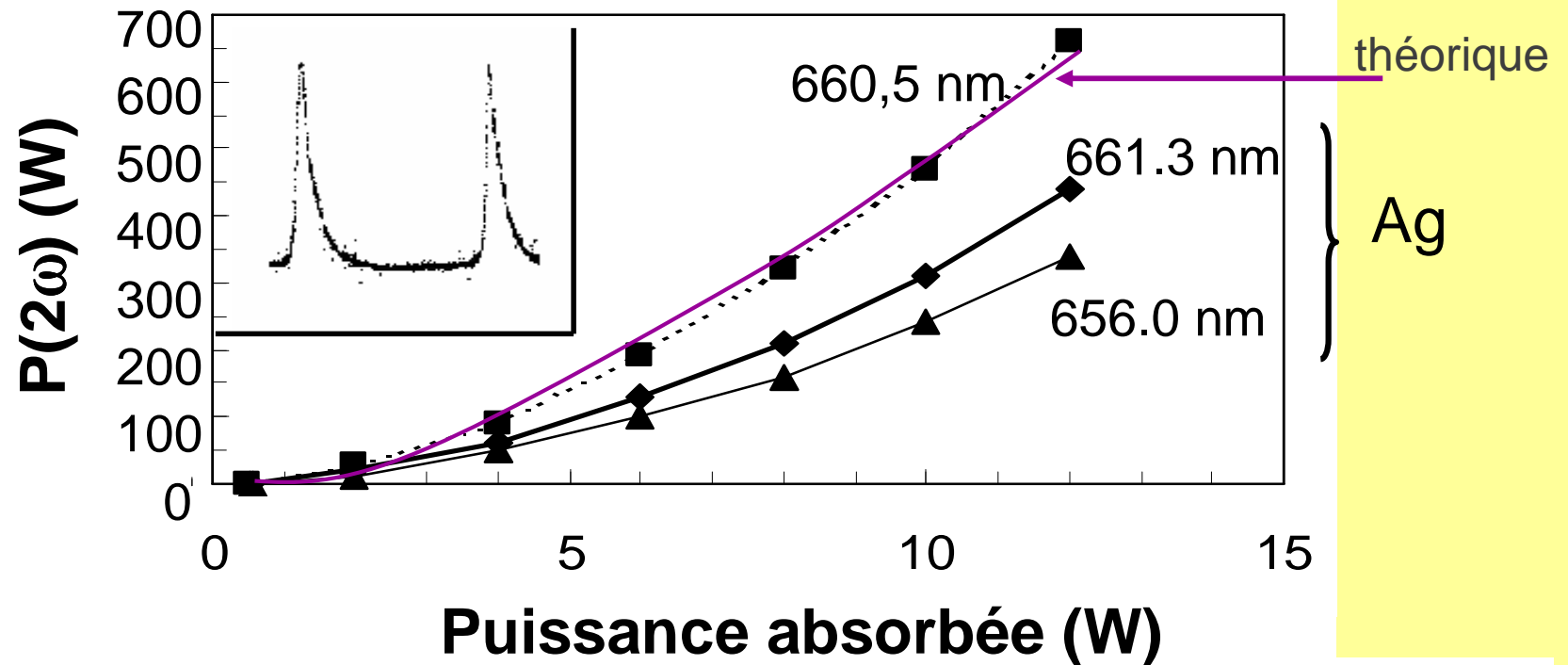
Propriétés de la CADOER

- **Fréquence du mode laser très peu dépendante de la cavité externe**
- **Accordable sans saut de mode sur au moins 6 GHz (limité par la rampe de tension)**
- **Peu de pertes (diode optique externe)**
- **Doublage efficace (intra-cavité)**

Doublage intra-cavité



Résultats doublage intra-cavité



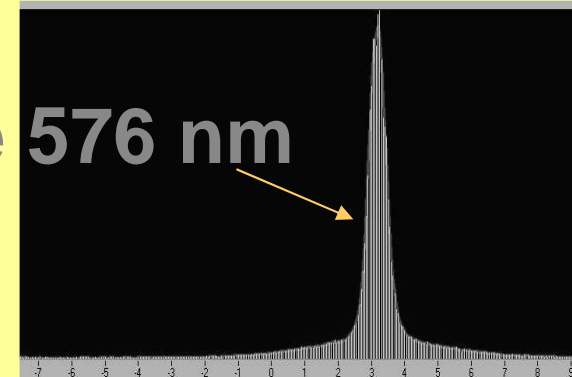
$P_{\text{abs}} = 12 \text{ W}$

- 440 mW @ 661,3 nm Ag (horloge)
- 340 mW @ 656,0 nm Ag (refroidissement)
- 660 mW @ 660,5 nm maximum de gain

- **Nd:YLF à 1312,0 et 1322,6 nm**
- **Nouvelle configuration laser: CADOER**
- **Bon accord théorie-expérience**
- **Performances:**
 - ✓ **340 mW à 656 nm (refroidissement)**
 - ✓ **440 mW à 661 nm (transition d'horloge)**

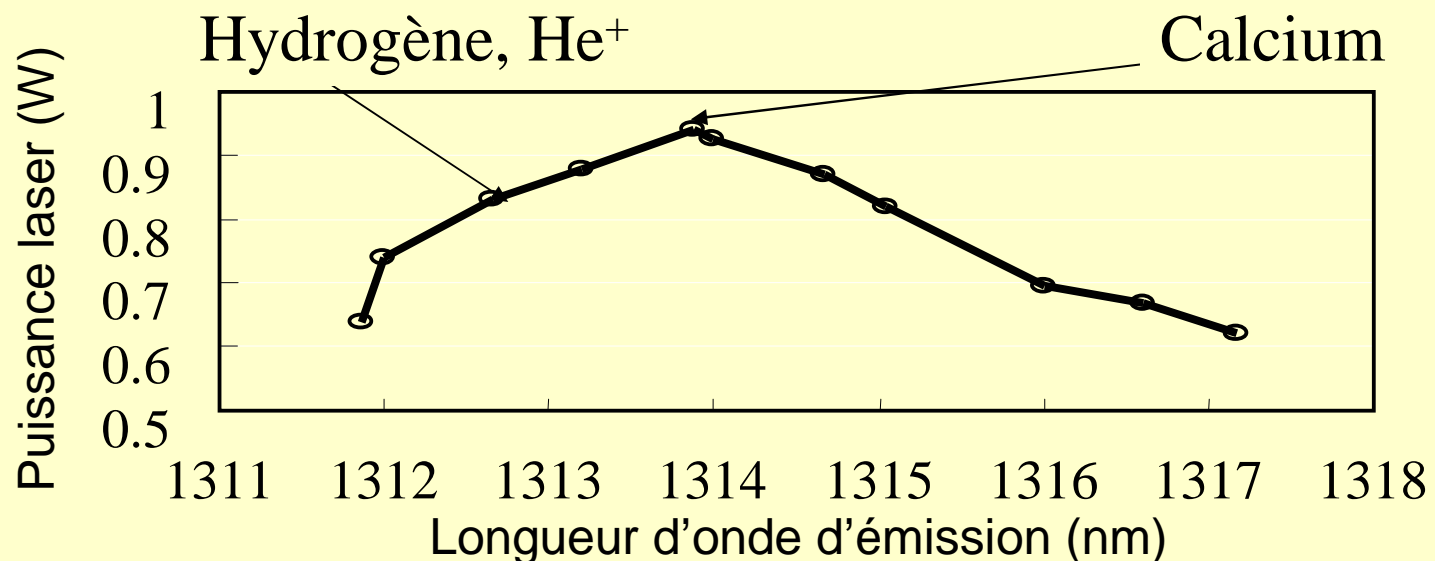
T42 Perspectives pour l'atome d'argent

- Changer cristal doubleur, LBO 500 mW attendu
- Doubler l'onde à 656 nm \Rightarrow 328 nm, 100 mW visé
- Mécanique du laser (stabilisation fréquentielle passive)
- Asservissement actif en fréquence des sources
- Transition 2 photons: passer de 576 nm
à 661 nm



Perspectives autres que l'argent

- ✓ l'atome de **calcium** : transition d'horloge à **657 nm**
- ✓ systèmes hydrogénoïdes :
 - H (transition 2S-3S) 2 photons à **1312,6 nm mesure de R_∞**
 - **He⁺** (transition 2S-3S) 2 photons à **328,1 nm Lamb Shift 2S (QED)**



Remerciements

- **Marc Himbert**, directeur du BNM-INM
- **Mark Plimmer**, responsable du projet Ag
- **Patrick Juncar**, responsable de l'équipe longueur
- **Thomas Badr**, le « CADOER » des lasers à colorant
- **Jean-Pierre Wallerand, Suat Topçu, Jozsua Fodor** et tout l'INM
- **François Balembois**, le « CADOER » des lasers solides
- **Patrick Georges**, responsable d'ELSA, IOTA