

# 'Lasers en HEP'

## cours numéro 1

- Chap. I : Intro générale :
  - Ondes électromagnétiques (=ondes elm)
  - 'Atomes'
  - Faisceaux lasers
- Chap. II : Principe de fonctionnement des lasers
  - Inversion de population & pompage
  - Mode pulsé et mode continu
- Chap. III : Quelques exemples de lasers du commerce

# Bibliographie

- Siegman, *Lasers* (University science books, en anglais)
  - 1200 pages [la 'bible'!]
- B. Cagnac et J.P. Faroux, *Lasers* (CNRS Editions, en français)
  - 500 pages [assez formel et pointu...]
- E. Hetch, *Optics* (Addison Wesley edt., en anglais),
  - bonne intro générale sur l'optique
  - [d'un niveau supérieur : 'Principle of Optics' Born&Wolf, une bible aussi ...]

# Chap I : introduction générale

- Onde elm
- Atomes
- Quelques caractéristiques des faisceaux lasers

# Rayonnement électromagnétique

Une charge + et une charge – qui oscillent → rayonnement une onde elm

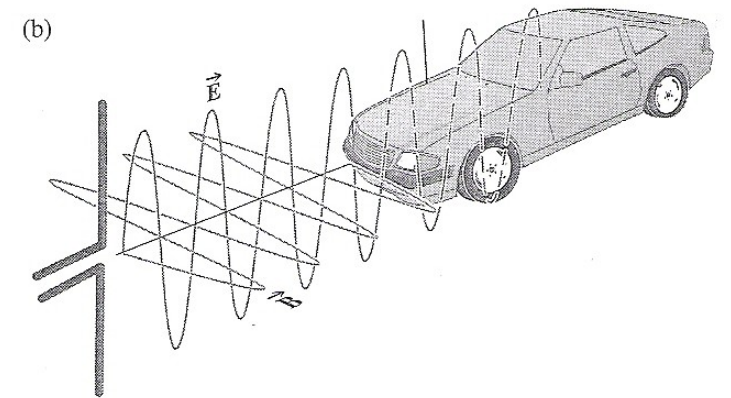
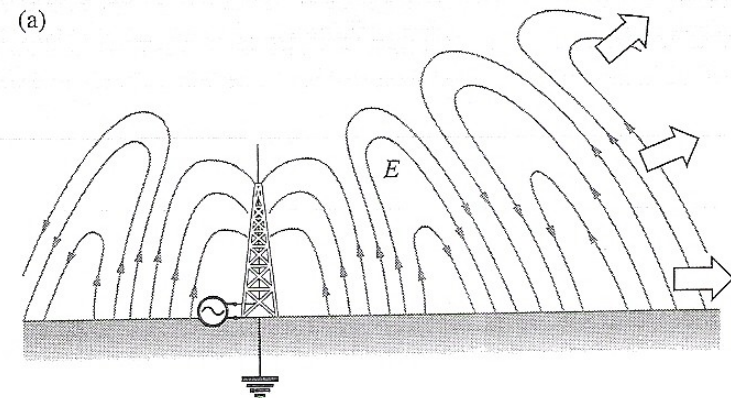
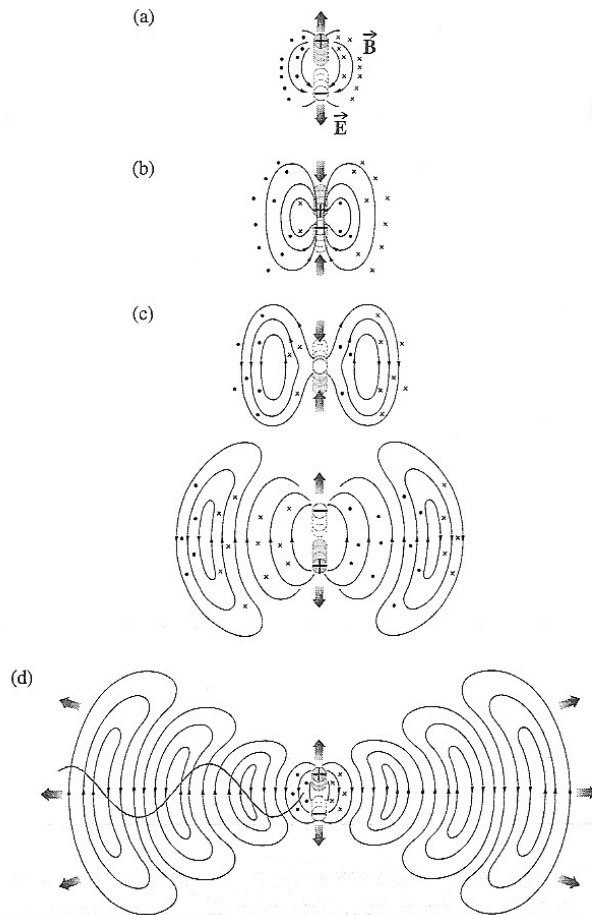


Figure 3.32 The  $\vec{E}$ -field of an oscillating electric dipole.

# Champ Électromagnétique (continu !)

Champ électrique oscillant

$$E = E_0 \cos(2\pi\nu t - kx)$$



et

Champ magnétique oscillant

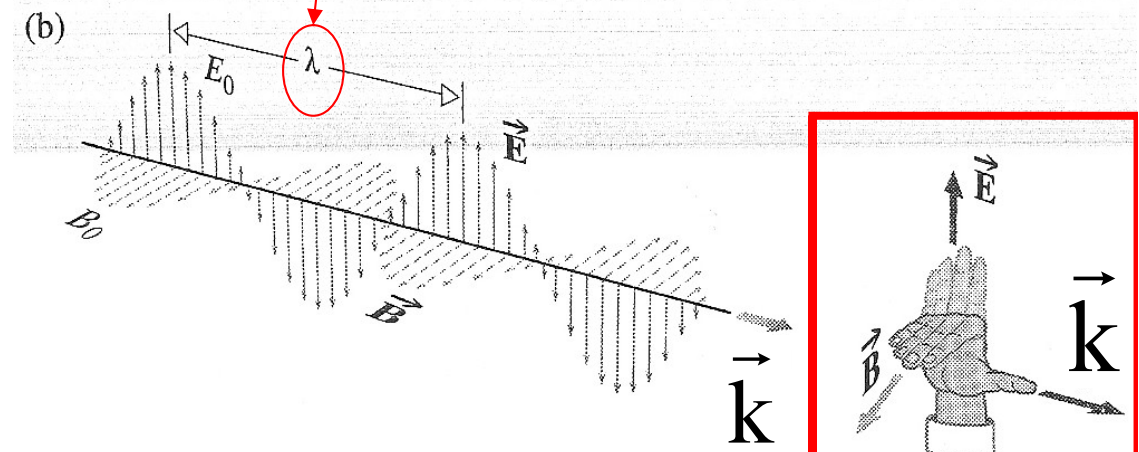
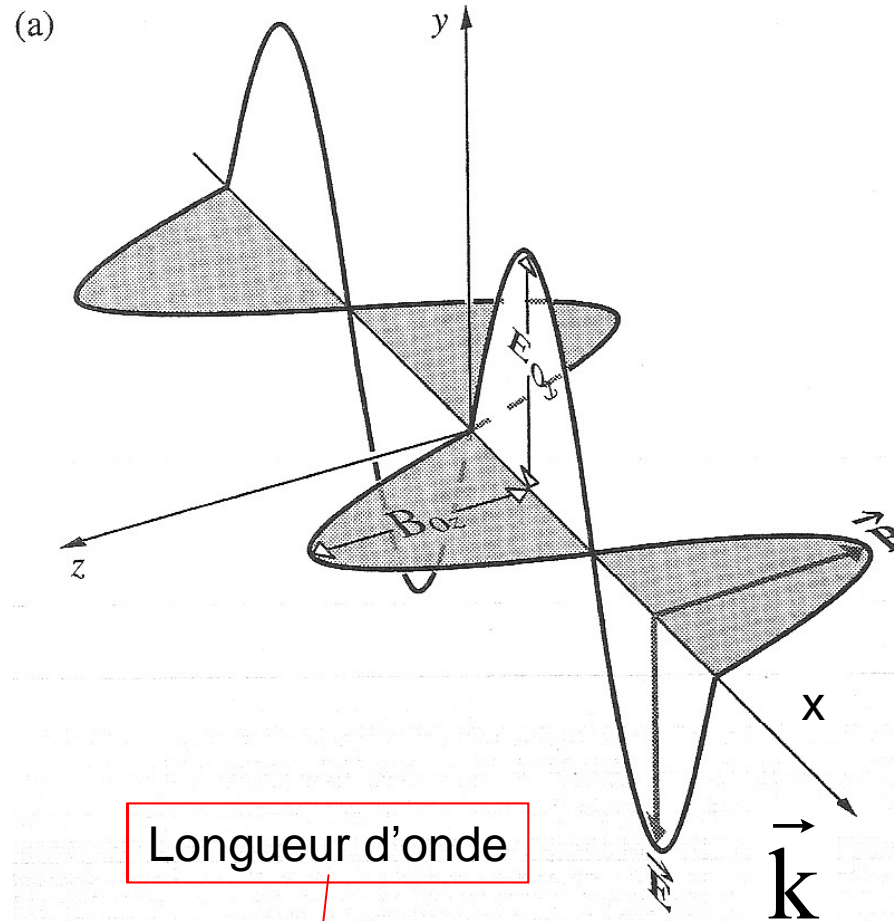
B : perpendiculaire à E dans le vide  
et les milieux isotropes

Longueur d'onde  $\lambda$

Fréquence  $\nu = c/\lambda$

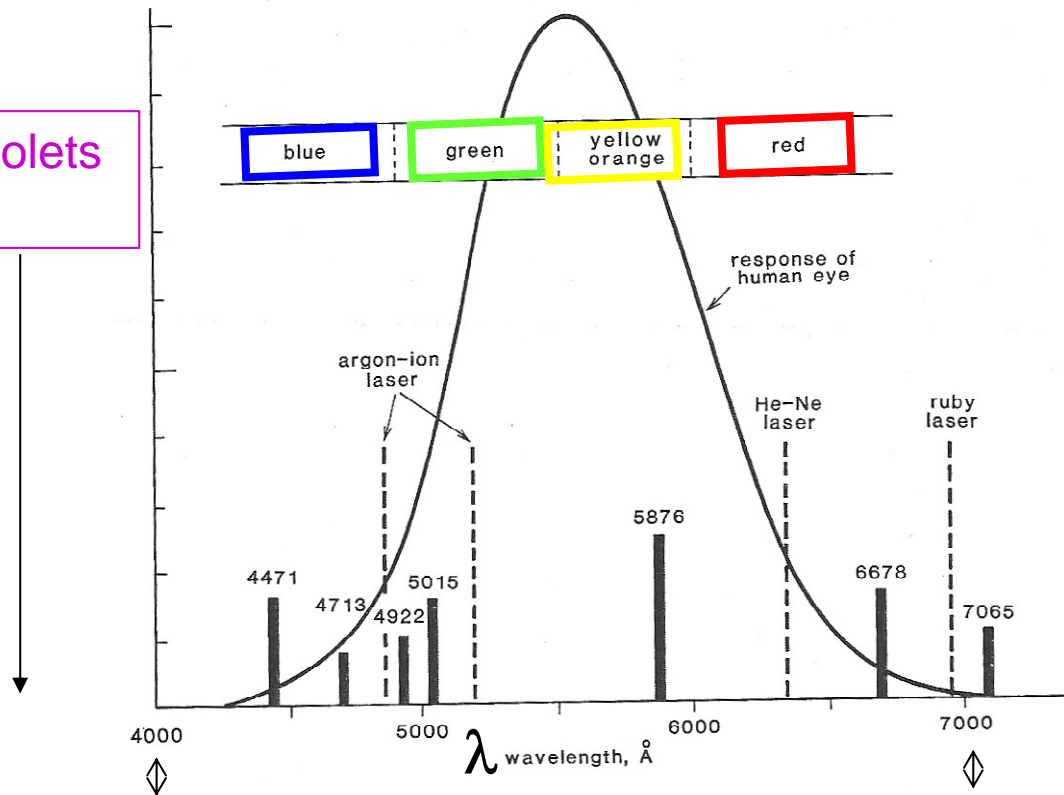
Vecteur d'onde  $\vec{k}$

et  $k = 2\pi/\lambda$



# Longueur d'onde / puissance / photons

Lasers ultraviolets  
eximères



Lasers infrarouges

Ti:sa YAG CO2  
0.8μm 1μm 10μm

$$\nu = 750 \cdot 10^{12} \text{ Hz} = 750 \text{ THz}$$

$$\nu = 428 \text{ THz}$$

## Dualité onde-corpuscule :

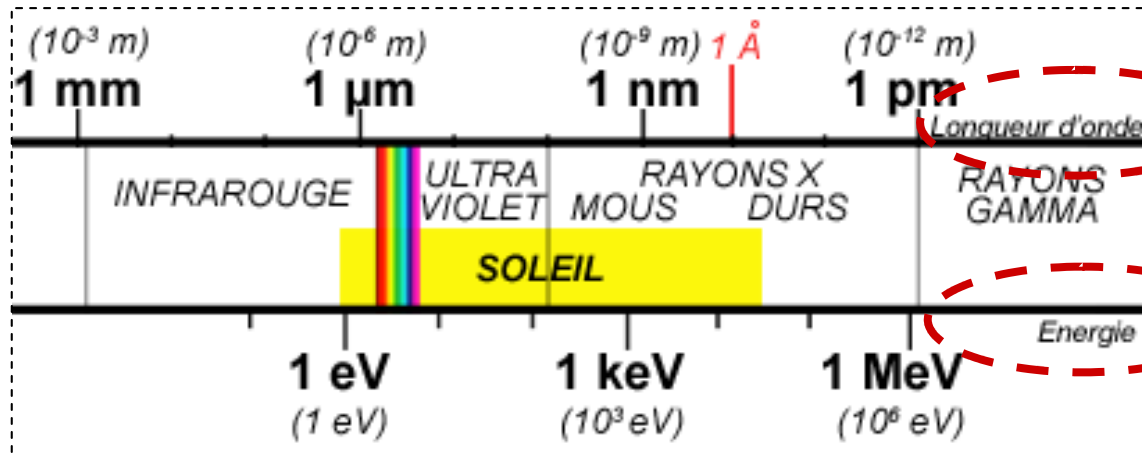
Une onde elm peut être vue comme un ensemble de photons d'énergie  $h\nu$



- Flux de photons = nb de photons qui traverse une surface / unité de temps [en  $\text{s}^{-1}$ ]
- Flux d'énergie = Flux de photons multiplié par  $h\nu$  [en  $\text{W} = \text{Js}^{-1}$ ]
- Intensité du faisceau (éclairage) = Flux d'énergie par unité de surface [en  $\text{Wm}^{-2}$ ]

$$\propto \|\vec{E}\|^2$$

$\lambda$  croissant



$$E = h\nu = hc/\lambda$$
$$h = 6.6 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$
$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$



$E$  croissant

# L'ATOME

Noyau :  
protons+  
neutrons

Nuage  
d'électrons

=Fluorescence  
=Relaxation  
=Émission spontanée

$\mathcal{E} = h\nu$

$\mathcal{E} = h\nu$   
photon

$\Delta\mathcal{E} = h\nu$

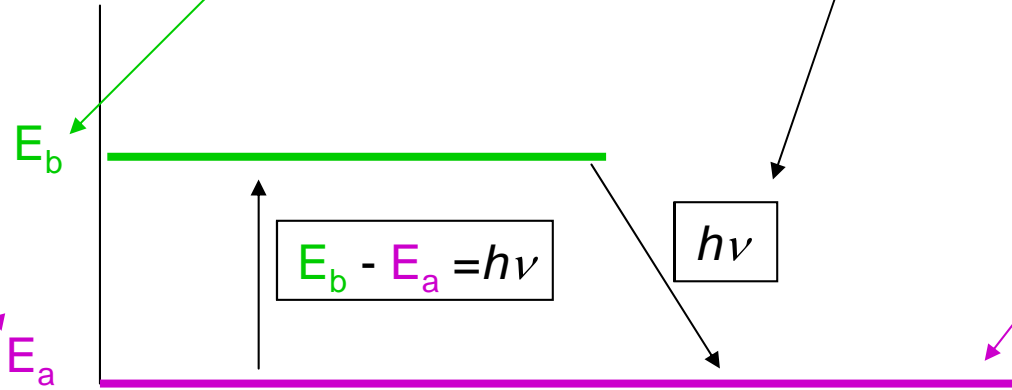
(a) The ground state about to receive a blast of energy

(b) Excitation of the ground state

(c) De-excitation with emission of a photon

(d) Ground state  $\approx 10^{-8}$  seconds later

Onde elm



$E_b$

$E_a$

$E_b - E_a = h\nu$

$h\nu$

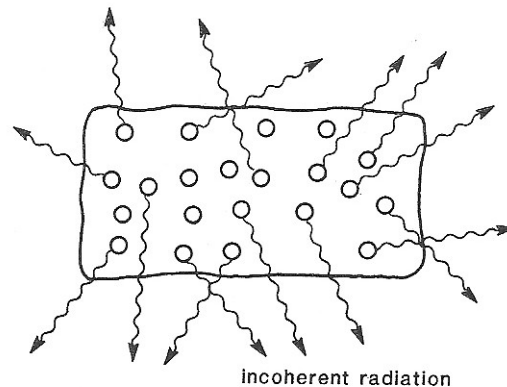
Diagramme d'énergie



# Mesure de fluorescence sur un ensemble d'atome

## fluorescence

Spontaneous emission is incoherent or noise-like, emerging randomly in all directions.



Imaginons un système à 2 niveaux

$E_b$  et  $E_a$  uniquement

On illumine le milieu, on stoppe ( $t=0$ )

l'illumination puis on mesure la fluo.

Nb atomes/unité volume  $N=n_b(t)+n_a(t)$

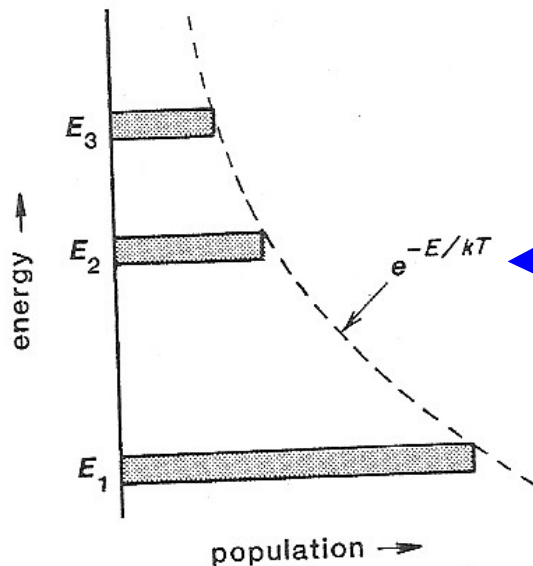
Mesure de l'intensité de la fluorescence

en fonction de  $t$  donne  $n_b(t)$

⇒ On trouve une exponentielle

$$n_b(t) = \exp(-t/\tau)$$

$\tau$  est la durée de vie du niveau b



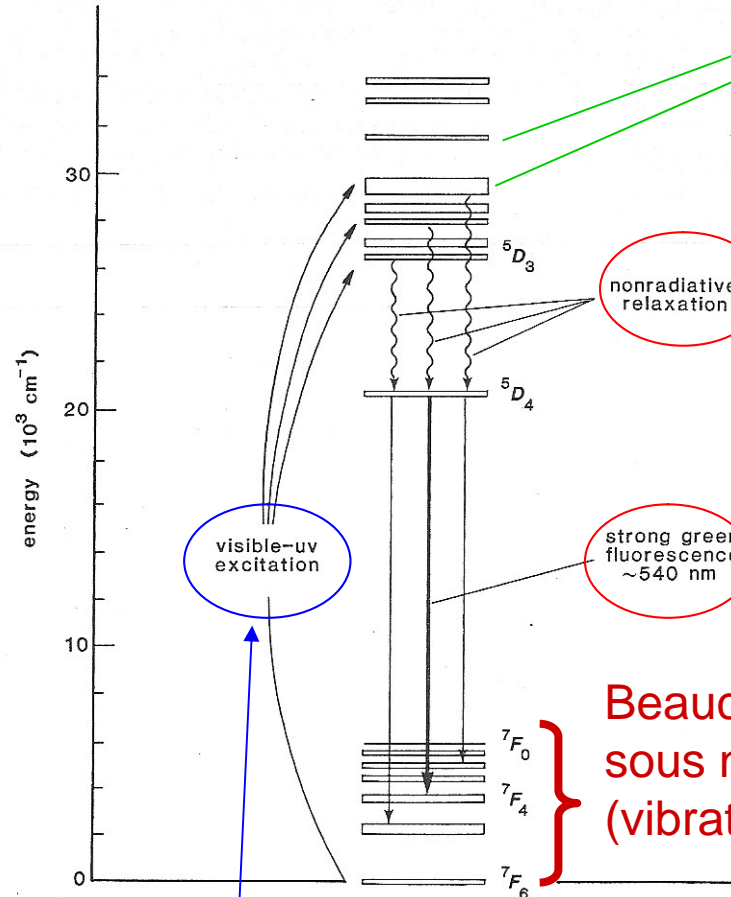
Note : les niveaux peuvent aussi être peuplés grâce à l'agitation thermique :

Loi de Boltzman

# Un petit peu plus sur les diagrammes d'énergies



ion chrome Cr<sup>3+</sup> SEUL



Les niveaux ont des largeurs différentes :

- Largeur 'naturelle' (Heisenberg)
  - $\tau \Delta E > h/2\pi \Rightarrow$  plus  $\tau$  petit, plus  $\Delta E$  grand
- Comme  $E=h\nu$ ,  $\Delta\nu$  (et  $\Delta\lambda$ ) grands aussi si  $t$  petit
- Élargissement environnemental, ex: effet Doppler dans les gaz.



Toute désexcitation ne produit pas une radiation (= un photon): vibration/rotation  $\Rightarrow$  dissipation locale de l'énergie sous forme de chaleur

Beaucoup de sous niveaux (vibration/rotation)



La plupart du temps transition dans l'UV

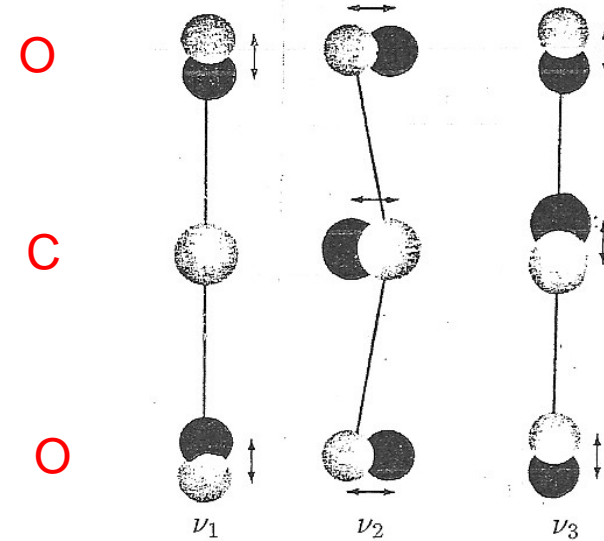


## Un petit peu plus sur les sous structures des niveaux atomiques

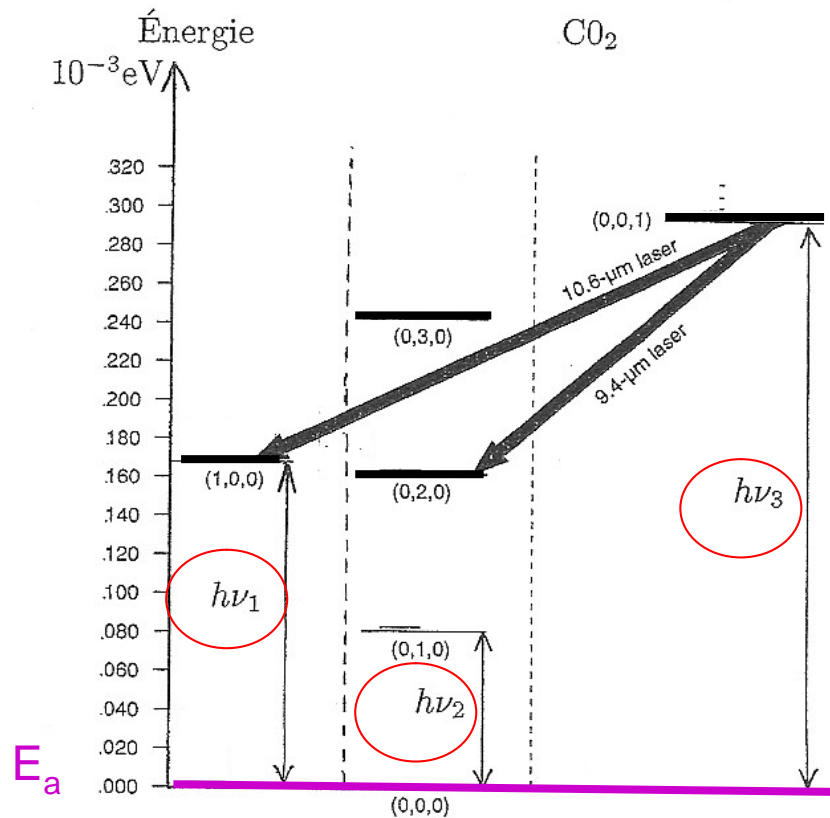
Ex. : atome/molécule d'un gaz :

- Collisions avec les autres atomes
- Collisions avec les parois
- Vibrations/rotation des atomes dans une molécule
- ...

Ex. : CO2



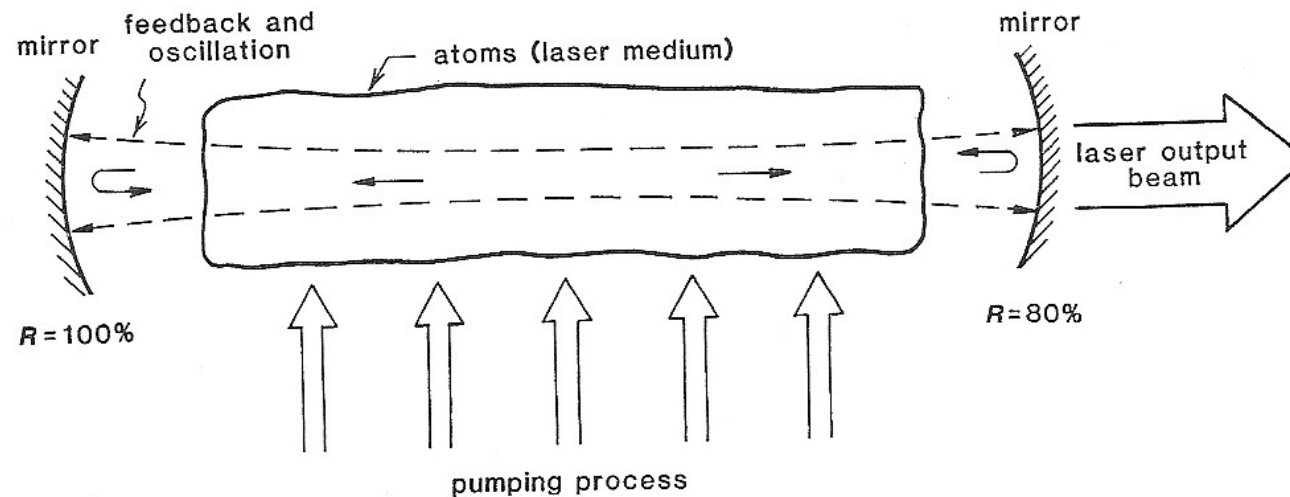
3 degrés élémentaires de vibration  
Énergies :  $h\nu_1, h\nu_2, h\nu_3$



Il y a des sous niveaux dus aux vibrations mais  $h\nu_3 \ll E_b - E_a$



# Les faisceaux lasers



## 2 types de faisceaux

**Faisceaux lasers continus** (but de ce cours) :

du mW (ex : HeNe pour alignement ou métrologie)

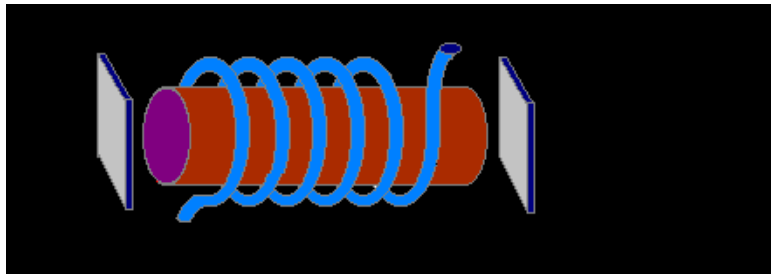
à qqes dizaines de W (lasers de pompage pour les oscillateurs femtosecondes)

# Faisceaux pulsés

•Plusieurs méthodes pour produire des pulses laser

•La source d'énergie (pompage) est pulsée (premier laser à rubis ou laser CO2)

•Ex : le premier laser à rubis :

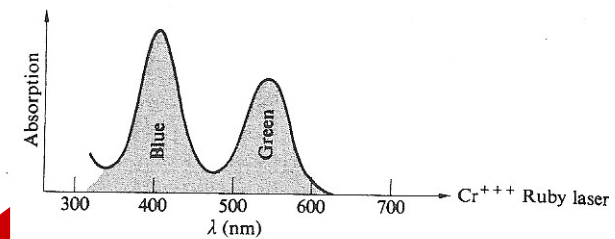


Rubis= $\text{Al}_2\text{O}_3$  (transparent)+ions  $\text{Cr}^{3+}$   
=couleur rouge

Quand les ions  $\text{Cr}^{3+}$  sont dans le réseaux Cristallin du saphir ses niveaux d'énergies sont abaissés :

2 bandes d'absorption, dans le rouge et dans le vert

⇒L'énergie est contenue dans des pulses temporels de durées > qqes micro secondes [ $1\mu\text{s}=10^{-6}\text{s}$ ]



(a)

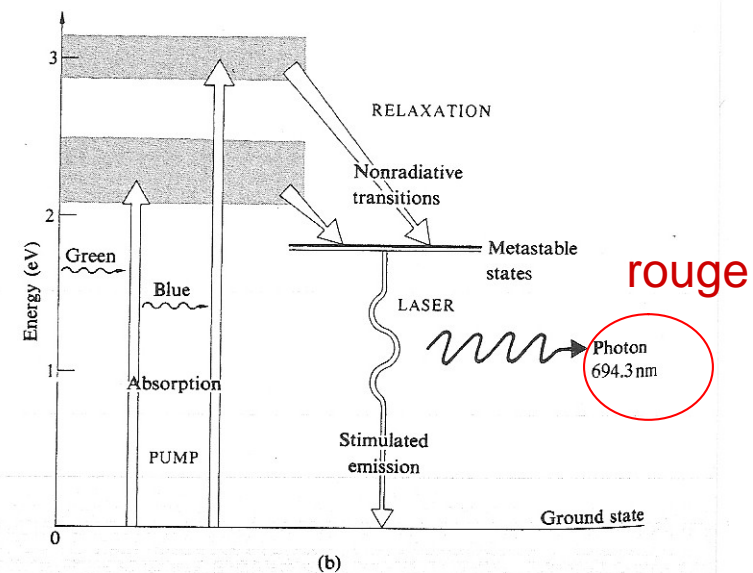


Figure 13.7 Ruby-laser energy levels.

On peut aussi produire des faisceaux pulsés grâce à des mécanismes spéciaux intra-laser (but de ce cours) :



• 'Q-switch'

• Durée des pulses :

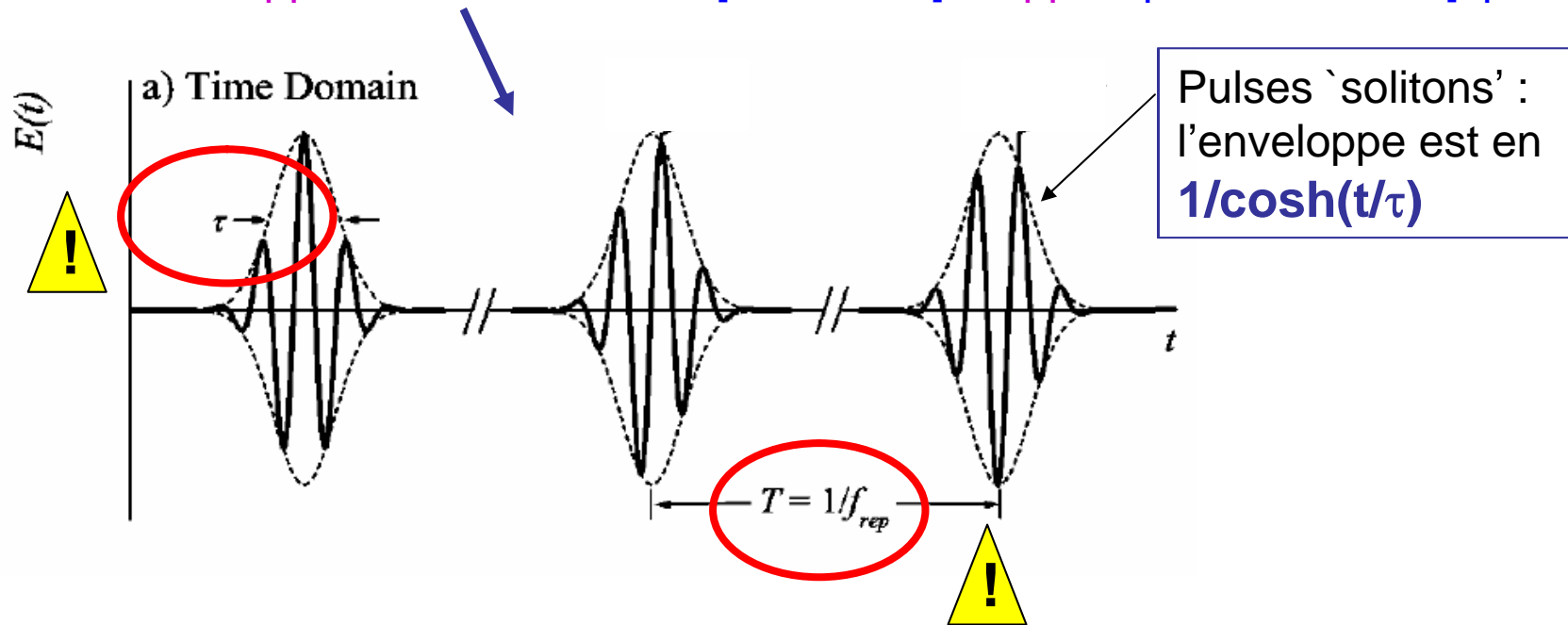
~ nano seconde [ $1\text{ns} = 10^{-9}\text{s}$ ] et pulses ~ gaussiens



• Blocage de modes passif ou actif

• Durée des pulses

entre qqes femto secondes [ $1\text{fs} = 10^{-15}\text{s}$ ] et qqes pico secondes [ $1\text{ps} = 10^{-12}\text{s}$ ]



$E$  = énergie par pulse (en Joule)

$P_{moyenne} = E/T$  (en Watts)

$P_{crête} = E/\tau$  (en Watts)

Ex. : YAG,  $\lambda = 1\mu\text{m}$ ,  $E = 0.5\text{J/pulse}$ ,  $f_{rep} = 10\text{ Hz}$ ,  $\tau = 5\text{ns}$

$P_{moyenne} = 5\text{ W}$

$P_{crête} = 100\text{ MégaW !!!}$



# Avantage de pulses courts pour la chirurgie ou l'usinage

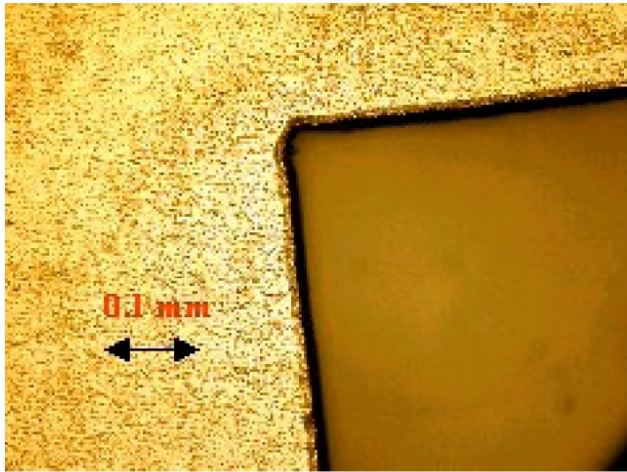


Figure 4a : Exemple d'usinage femtoseconde de l'acier



Figure 4b : Exemple d'usinage nanoseconde

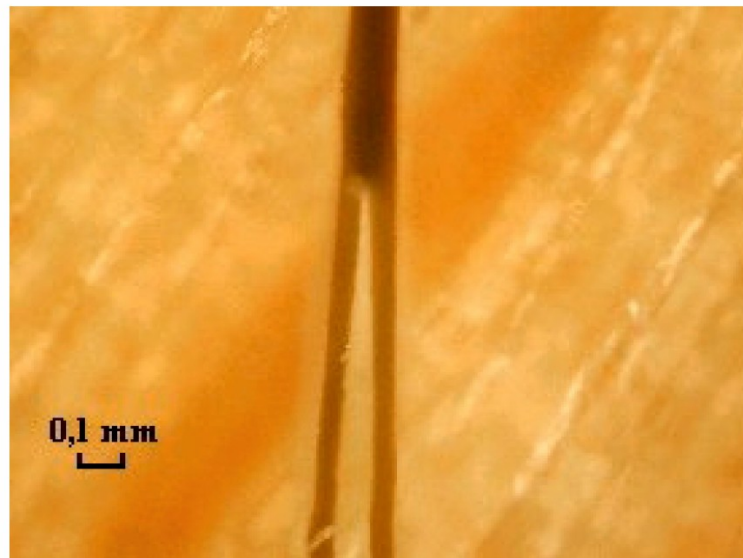


Figure 2 : face d'un échantillon de hêtre avec 2 sillons débouchants formant un angle de  $3^\circ$ .

# (Différence spectrale entre mode continu et pulsé)

La répartition de l'intensité d'une onde elm en fonction de la longueur d'onde  
[= la transformée de Fourier entre temps & fréquence du champ électrique]  
donne la distribution spectrale du faisceau laser [=les proportions des diverses  
longueurs d'ondes qui composent le faisceau]

**Mode continu** : **monofréquence** en théorie !  
(=une seule `couleur' ou longueur d'onde)

•**Ex. d'un excellent laser YAG du commerce**

$\Delta\nu \sim 50\text{MHz/heure}$  (dérives lentes)

$$\Rightarrow \Delta\nu/\nu \sim 10^{-7}$$

$\Delta\nu \sim 200\text{kHz/seconde}$  (dérives rapides)

$$\Rightarrow \Delta\nu/\nu \sim 10^{-9}$$

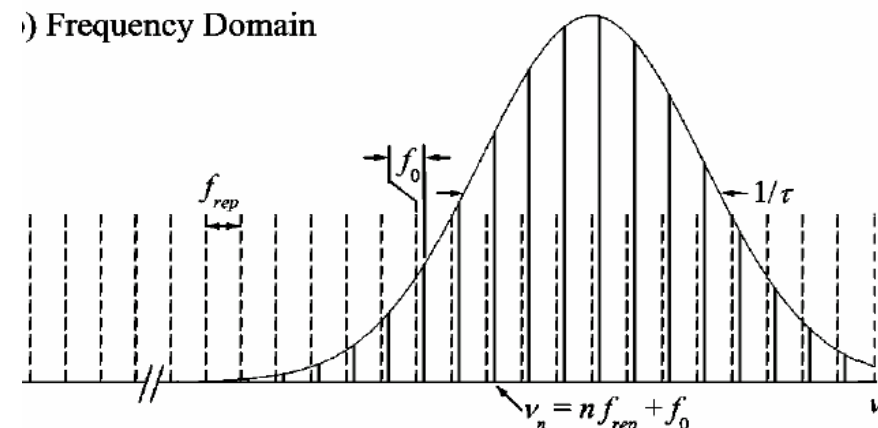
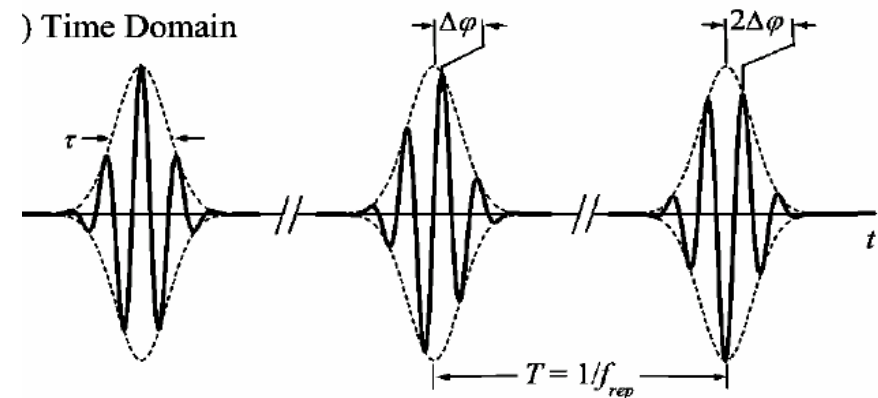
•**Techniques de stabilisation**

(cf. prix Nobel 2005 : J.L. Hall)

$$\Delta\nu \sim 25\text{mHz} \Rightarrow \Delta\nu/\nu \sim 10^{-16} \text{!!!!!!!!!!!!}$$

**Mode pulsé** : **peigne de fréquences**

(cf. prix Nobel 2005 : T. Hansh)



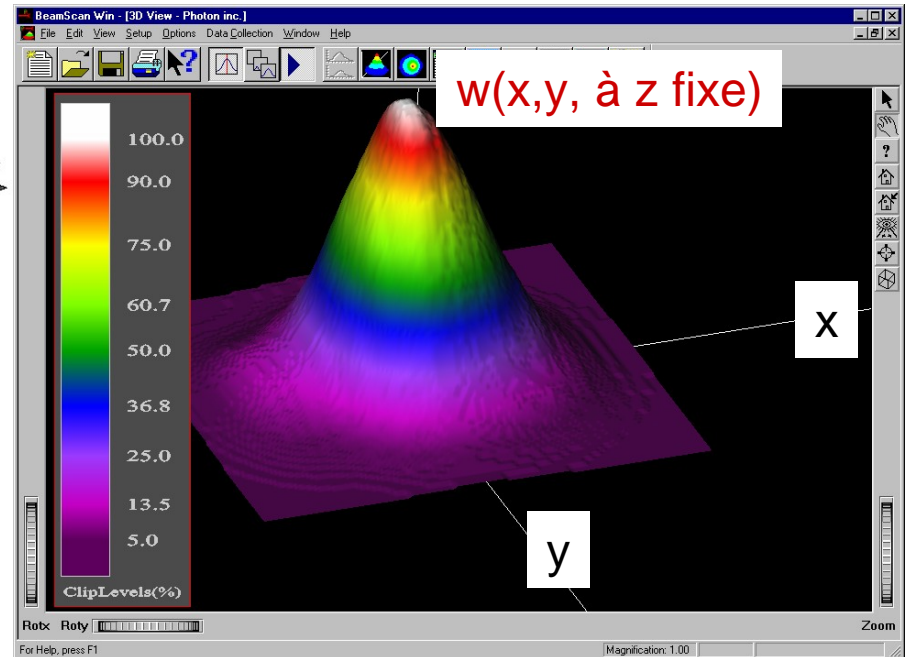
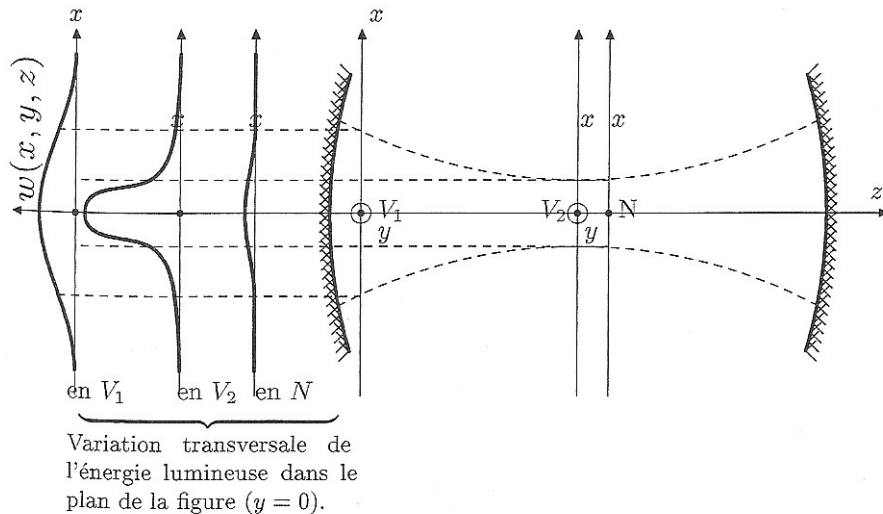


# Forme de l'intensité des faisceaux lasers = modes transverses (elle est la même pour les modes pulsés et continus)

Axe du faisceau :  $z$

intensité  $w(x,y;z)$  : quelle est sa forme en fonction de  $x,y$  à un  $z$  donné ?

L'onde laser sort d'une cavité parfaite  $\Rightarrow$  la forme est gaussienne



Mais il y a aussi d'autres 'modes' transverses en réalité...  
et de la diffraction ...

# Chap. II : Principe de fonctionnement des lasers

- C'est l'interaction d'une onde elm avec la matière
  - Théorie *semi classique* d'interaction rayonnement matière
    - Rayonnement : onde elm (eq. de Maxwell)
      - [Pas de quantification du champ elm]
    - Interaction onde elm et atome
      - Mécanique Quantique [eq. Schrödinger]
      - Les niveaux d'énergie des atomes sont discrets
- On va décrire le passage d'une onde elm dans un milieu `à gain`
  - Puis l'amplification du signal laser grâce à une cavité optique

# Oscillations de Rabi

Exercice de 'Meca. Q.' (Chap. 1 Cagnac)

Solution de l'équation de Schrödinger pour :

- un atome à 2 niveaux + une onde elm de fréquence  $\nu$

- Pas d'émission spontanée ici !

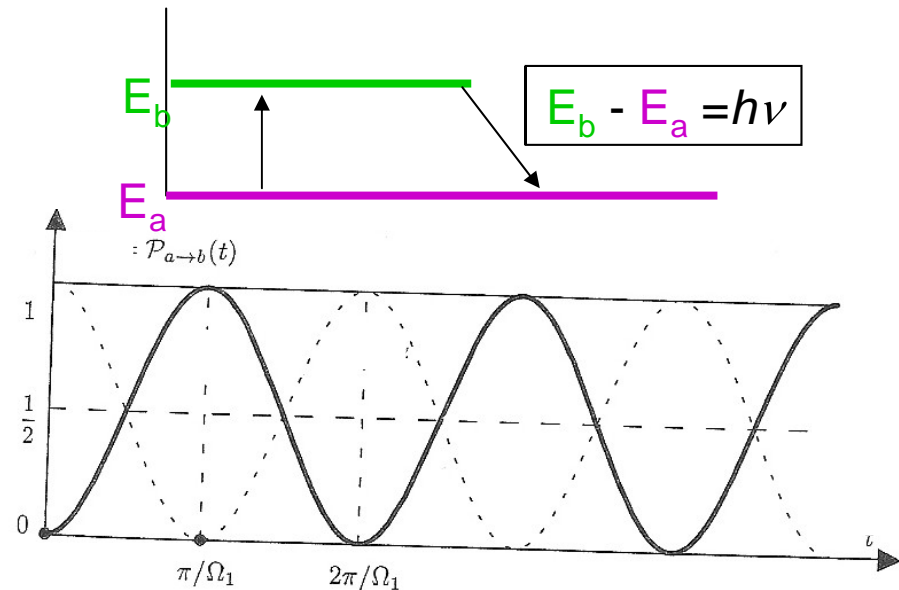
- L'atome est dans le niveau  $E_a$  à l'instant  $t=0$

- Quelle est la proba de l'observer dans l'état  $E_b$  à l'instant  $t>0$  ?

$P_{a \rightarrow b}(t)$  = proba. atome sur niveau b  $\propto \sin^2 \frac{\Omega}{2} t$

$\Omega = E_0 C$ ,  $C$  = constante qui depend du milieu

$E_0$  est l'amplitude du champs electrique de l'onde elm



Quand on envoie une onde elm sur un atome à 2 niveaux, la proba d'observer l'atome dans le niveau excité  $E_b$  oscille à une fréquence  $\Omega$  proportionnelle à l'amplitude du champ

**Une onde elm de fréquence  $\nu$  peut donc :**

- exciter l'atome (le faire passer de  $E_a$  à  $E_b$ )

- **MAIS AUSSI** le désexciter (le faire passer de  $E_b$  à  $E_a$ ) par émission d'un nouveau photon de fréquence  $\nu$  **C'EST L'ÉMISSION STIMULÉE**

- On peut montrer que la conservation de l'impulsion  $\Rightarrow$  photons issus de l'émission stimulée sont émis dans la même direction que l'onde elm.

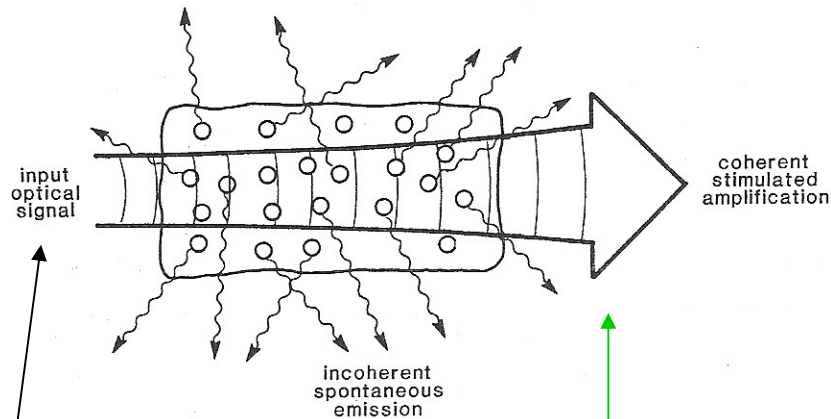
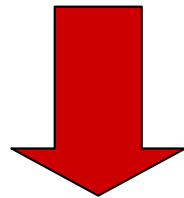
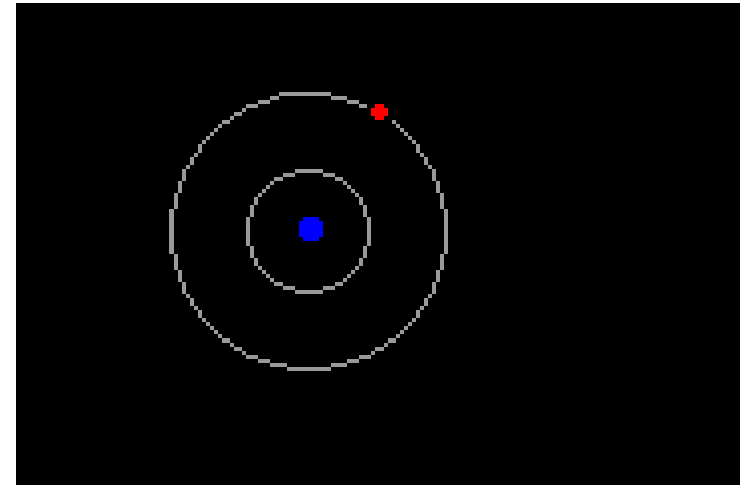


## Notion hyper importante : l'émission stimulée

1 photon incident interagit avec un atome excité et induit une transition radiative si son énergie correspond à l'énergie d'excitation de l'atome

⇒ On peut espérer amplifier un rayonnement !

si l'on arrive à 'peupler' le niveau excité ...



Puissance à l'entrée du milieu

Puissance à la sortie du milieu

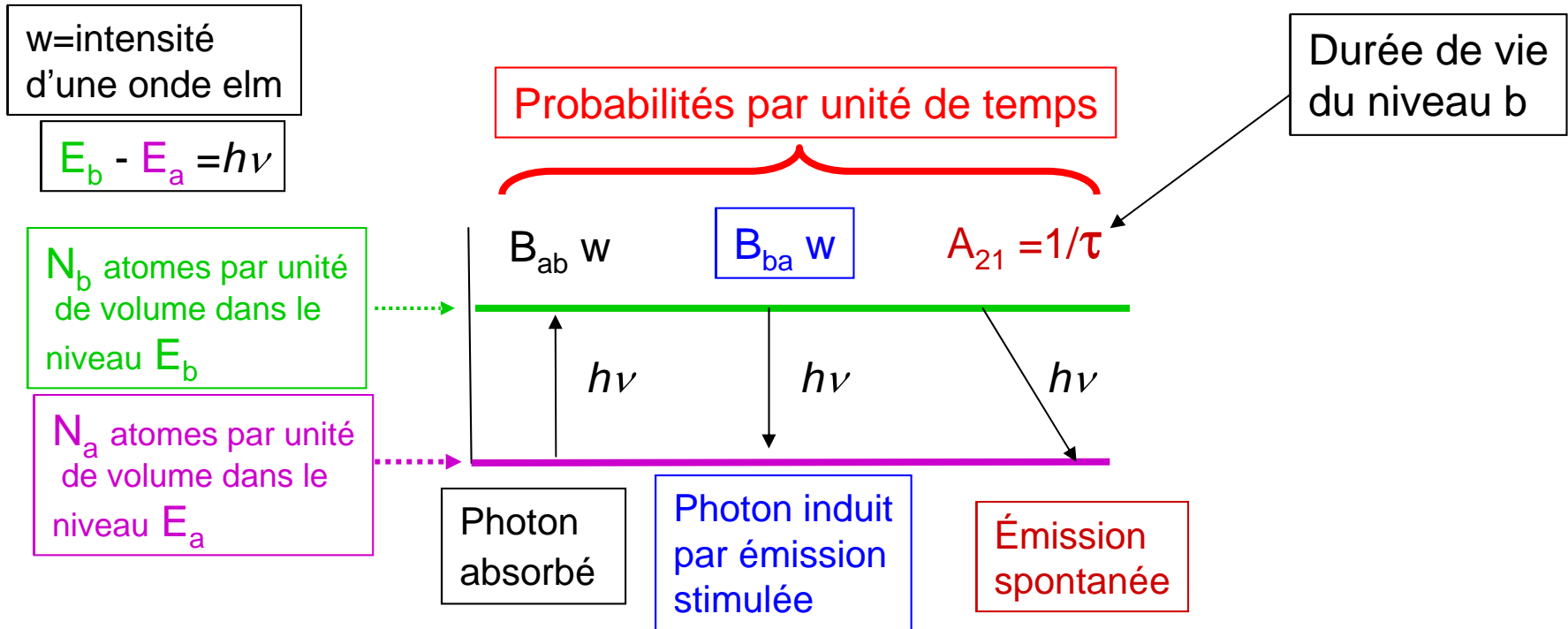
**MAIS** pour calculer la puissance en sortie, il faut prendre en compte l'émission spontanée

**ET** pas seulement d'1 atome MAIS un ensemble d'atomes...

⇒ Équations de Bloch et non de Rabi [mais très compliquées ...]

⇒ **Équations d'Einstein** [phénoménologiques, plus simples]

# Equations d'Einstein pour un système à 2 niveaux d'énergie



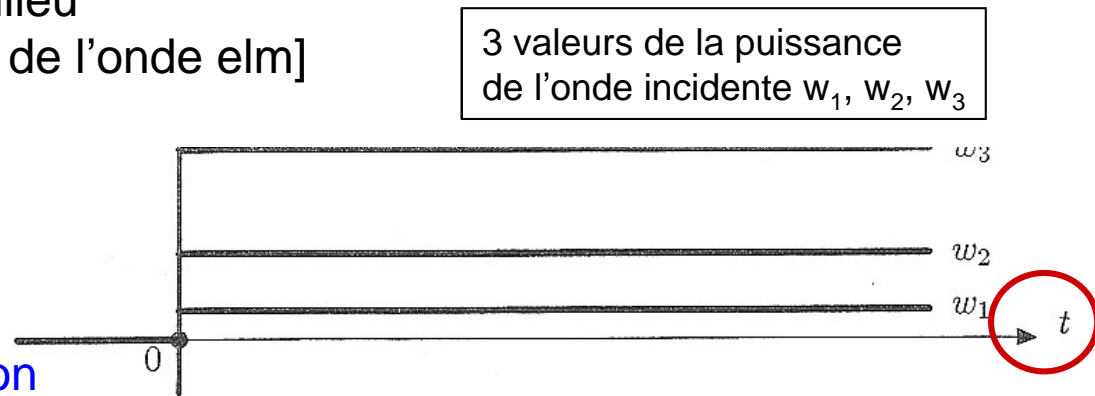
$$\begin{cases} \frac{dN_b(t)}{dt} = -A_{ba} N_b(t) - B_{ba} w N_b(t) + B_{ab} w N_a(t) \\ \frac{dN_a(t)}{dt} = +A_{ba} N_b(t) + B_{ba} w N_b(t) - B_{ab} w N_a(t) \end{cases}$$

[j'ai omis un terme qui décrit les largeurs spectrales des niveaux]

## Solution des équations d'Einstein pour une variation brusque de la puissance $w$ à $t=0$

• on cherche

- La variation de  $N_b$
- La puissance à la sortie du milieu  
i.e. la variation de  $w$  [intensité de l'onde elm]



On définit la différence de population

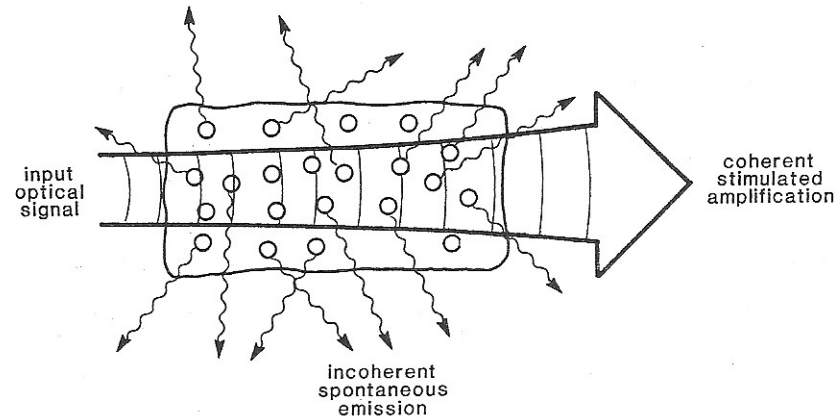
$$D(t) = N_b(t) - N_a(t)$$

avec  $D(t=0) = -N_a(0) = -N$

$N = n_b$  total d'atome/unité de volume

$$D(t) = D_s + (D(0) - D_s) e^{-t/T}$$

l'onde incidente



l'onde en sortie

Au cours de la propagation dans le milieu, la puissance de l'onde incidente  $P$  est modifiée par :

- L'absorption (perte de puissance car transition :  $a \rightarrow b$ )
- L'émission stimulée (gain car transition stimulée :  $b \rightarrow a$ )
- (on néglige l'émission spontanée car elle a lieu dans toutes les directions)

On trouve... :

$$\frac{1}{P} \frac{dP}{dz} = -\frac{h}{\lambda} B_{21} < 0 \quad !!!!!$$

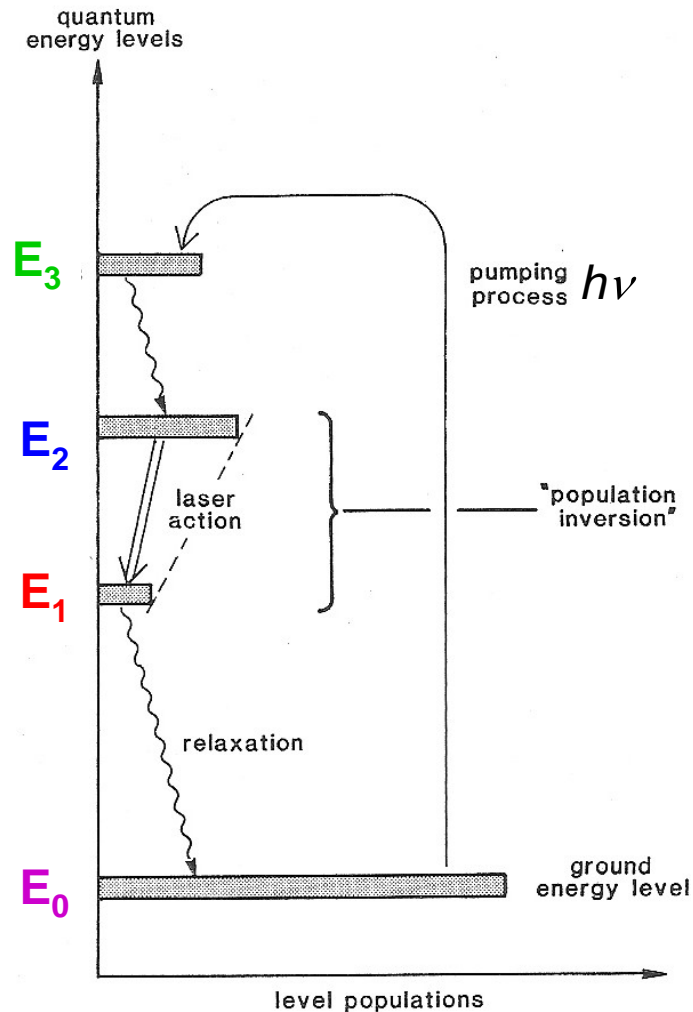
Variation de la puissance le long de l'axe de propagation  $z$

Résultats : on perd de la puissance !!!! **Donc on ne peut pas amplifier un rayonnement avec un système à 2 niveaux ...**

On définit la différence de population  $D(t) = N_b(t) - N_a(t)$  avec  $D(t=0) = -N_a(0) = -N = n_b$  total d'atome/unité de volume

$D > 0$  impossible !!!  $\rightarrow N_b(t) < N_a(t)$  [ $\rightarrow$  pas d'inversion de population]

## Solution : il faut POMPER un système à plusieurs niveaux



Ça marche BIEN si :

- Fréquence de l'onde elm :  $\nu = (E_3 - E_0) / h$

- **Durée de vie du niveau 3 très courte**

- Relaxation non radiative entre les niveaux **3** et **2**

- **Radiation laser entre les niveaux 2 et 1**

  - **Durée de vie du niveau 2 très longue**

- **Durée de vie du niveau 1 très courte**

**Note :**

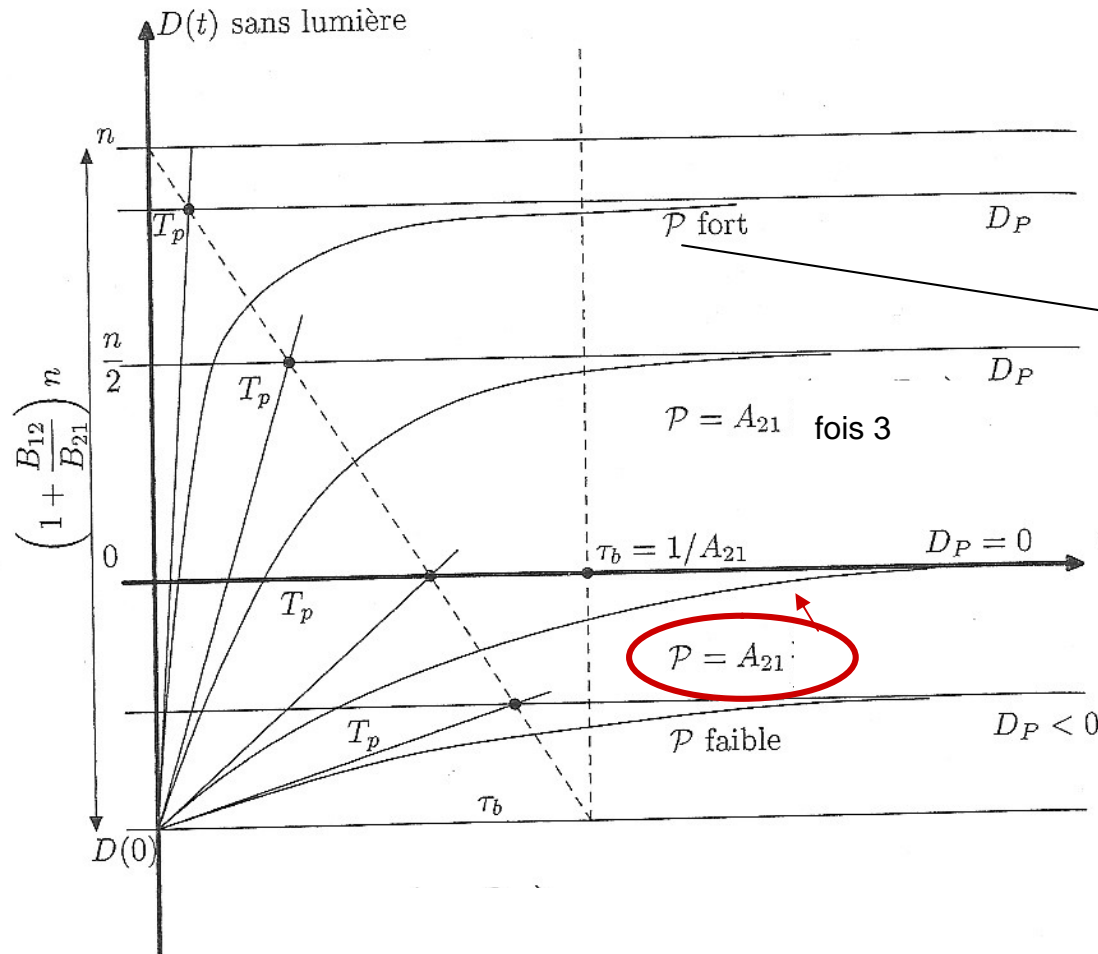
- **radiation laser  $E_{\text{Laser}} = E_2 - E_1 < h\nu$**

grâce au durées de vies courtes des niveaux 3 et 1 on peut décrire le système comme un système à deux niveaux ou  $E_{\text{Laser}}$  et  $w$  sont distinctes



On a toujours :  $D(t) = D_P + (D(0) - D_P) e^{-t/T}$  ( $D_p = \text{le } D_s \text{ de tout à l'heure...}$ )

MAIS entre les niveaux 2 et 1, la différence de population est la suivante:

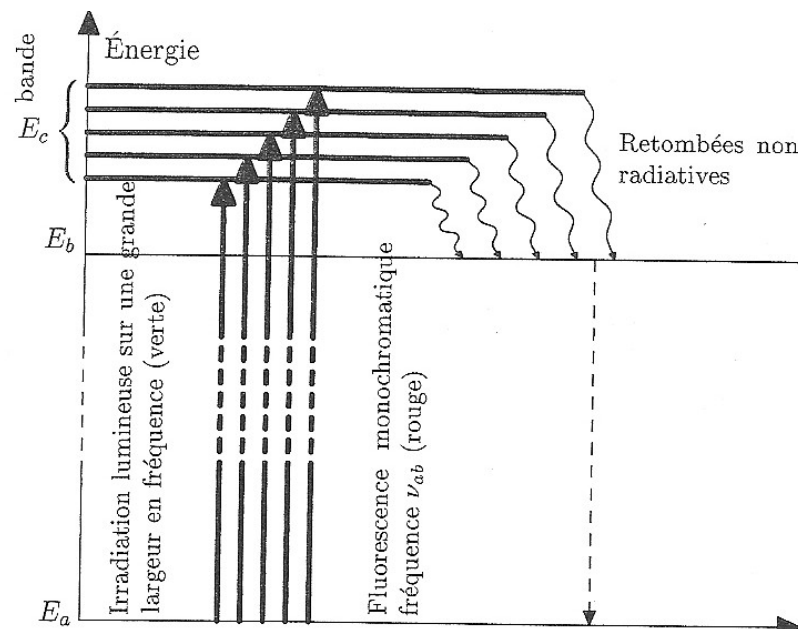


Facteur de pompage :  
 Nb de transitions  $0 \rightarrow 3$  par  
 unité de temps induite  
 par l'onde pompe  
 [proportionnel à la puissance  
 de l'onde pompe]

$D > 0$  possible !!!  $\rightarrow N_b(t) > N_a(t)$

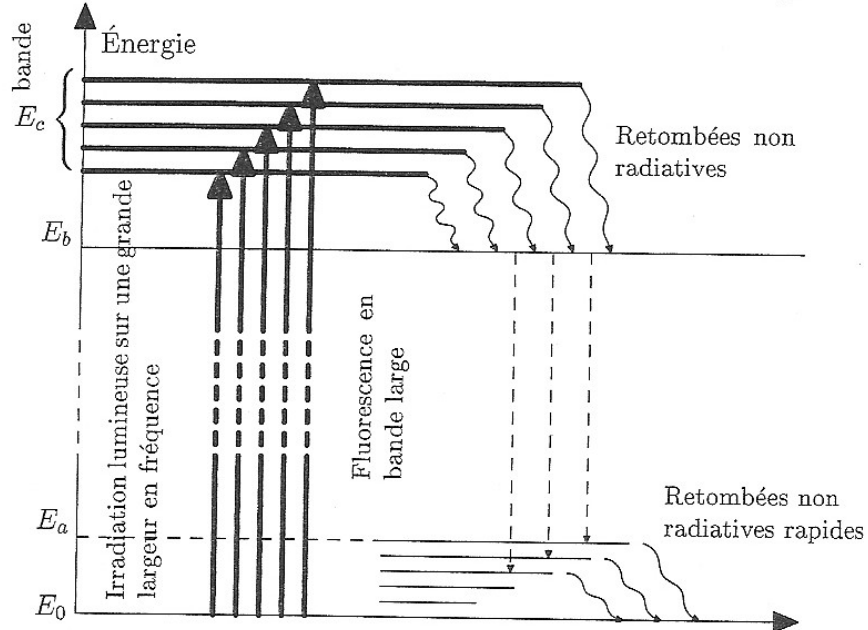
Exemple : système à 3 niveaux  
Le rubis

(a)



Exemple : système à 4 niveaux  
colorant dilué

(b)



- Pour l'instant on a juste créé une **inversion de population** ( $D > 0$ ) grâce au pompage d'un système à plusieurs niveaux

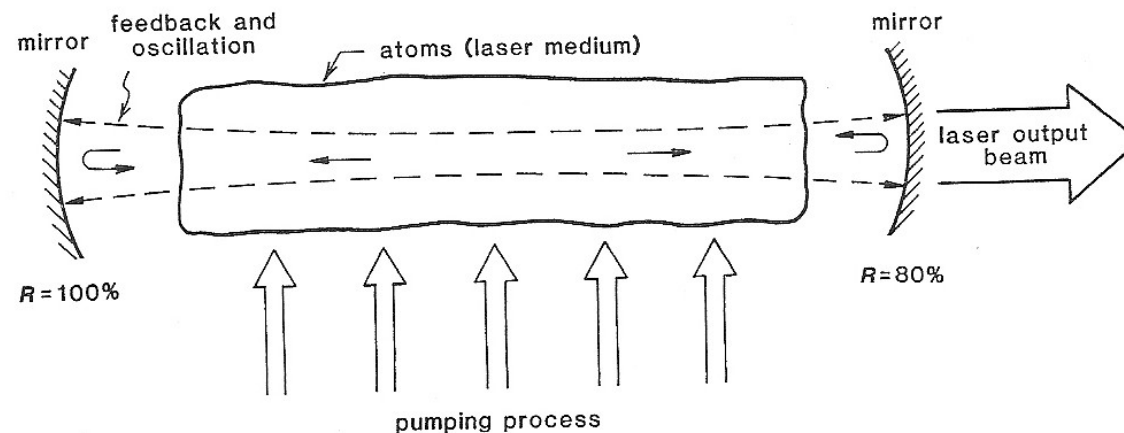
- **Comment obtenir un signal laser ?**

- Il faut pomper avec un facteur de pompage  $P$  'grand' pour peupler le niveau 2

- Puis produire suffisamment de photons laser  $E_L$  pour stimuler la transition  $2 \rightarrow 1$  peuplée par le pompage

- **Technique :**

- **On place 2 miroirs autour du milieu pompé (=cavité Fabry-Perot):**



A  $t=0$ , on pompe. Les premiers photons lasers sont produits par l'émission spontanée. Certains de ces photons sont **émis suivant l'axe optique des 2 miroirs : ils vont peu à peu stimuler les transitions laser.**

Le processus d'amplification laser peut démarrer.

Note: il faut que les coefficients de réflexion des miroirs soient proches de 100% pour la longueur d'onde laser.

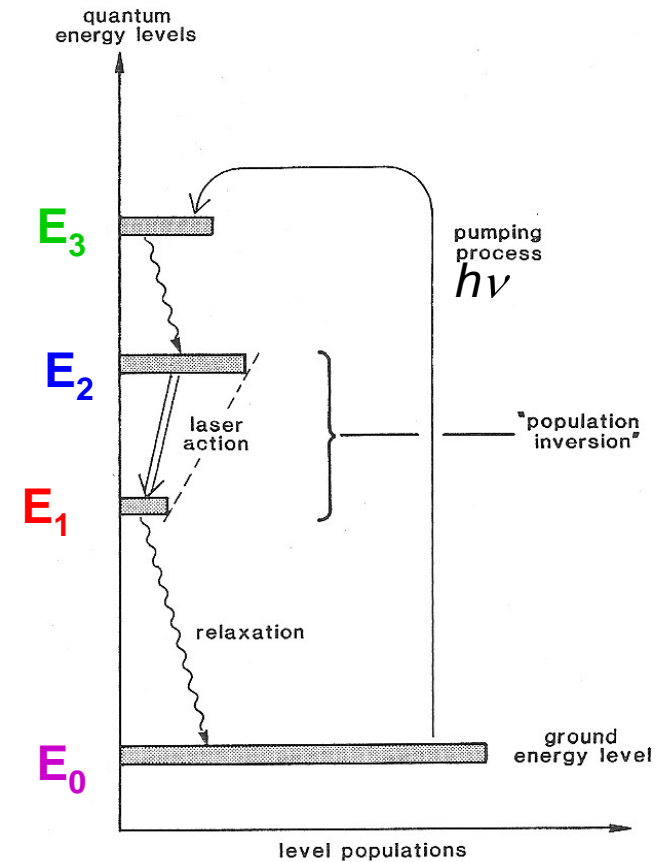
# Modification des équations d'Einstein dans la cavité

On a maintenant deux sources de puissance distinctes qui se propagent dans la cavité qui entoure le milieu :

- L'onde utilisée pour le pompage optique  $h\nu = E_3 - E_0$ 
  - Elle est constante au cours du temps
  - Elle ne `rebondit pas sur les miroirs` : elle traverse continûment le milieu
  - Elle est caractérisée par le facteur  $P$
- L'onde laser  $E_L = E_2 - E_1 < h\nu$ 
  - Elle varie au cours du temps !  $w_L = 0$  à  $t = 0$
  - Elle rebondit sur les miroirs (=elle est `piégée`)
  - Elle est amplifiée par l'émission stimulée dans le milieu à chaque aller-retour

La différence de population  $D(t) = N_2(t) - N_1(t)$  est différente du système sans cavité:

- Le pompage optique peuple le niveau 2
  - $D(t)$  augmente (idem sans cavité)
- L'onde laser crée stimule la transition laser  $2 \rightarrow 1$ 
  - $D(t)$  diminue (effet du recyclage dans la cavité)



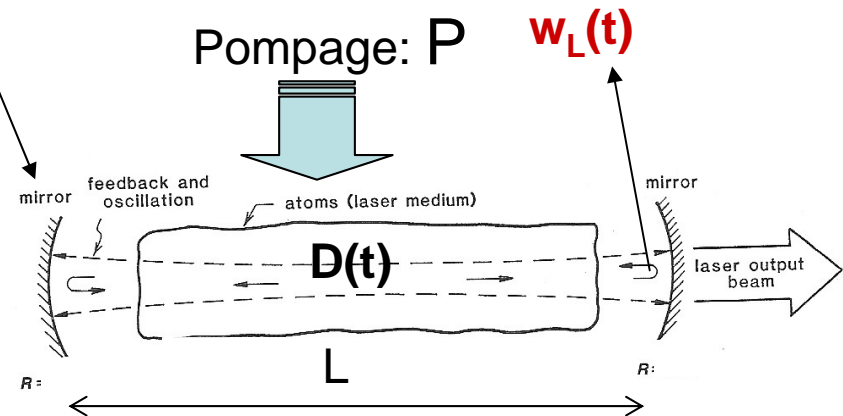
**MAIS il faut une condition pour que l'onde laser soit amplifiée :**

- Il faut que les pertes (par réflexion sur les miroirs) au cours d'un aller-retour dans la cavité soient plus faibles que le gain induit par l'émission stimulée.

En calculant le gain en puissance de l'onde laser au cours d'un aller-retour :

$$\left\{ \frac{dw_L(t)}{dt} = \left( \frac{D(t)}{D_{seuil}} - 1 \right) \frac{1}{\tau_c} w_L(t) \right.$$

$$D_{seuil} \propto \frac{1}{\nu_L \tau_c B_{21}}$$



- Plus  $\tau_c$  et  $B_{21}$  (proba émission stimulée) sont grands  
Plus  $D_{seuil}$  petit
- $dw_L(t)/dt > 0 \Rightarrow$  **GAIN**  $\Rightarrow D(t) > D_{seuil}$
- Plus  $\tau_c$  est grand plus la puissance de l'onde laser croît vite

$$\frac{1}{\tau_c} = (1 - R) \frac{c}{L} \equiv \text{pertes dans la cavite}$$

$$Q \equiv \text{facteur - qualite - cavite} = 2\pi\nu_L \tau_c$$

## Équations d'Einstein avec du pompage $P$ et de la puissance laser $w_L(t)$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dN_2(t)}{dt} = -A_{21}N_2(t) - B_{21}w_L(t)N_2(t) + B_{12}w_L(t)N_1(t) + \mathbf{P} N_1(t) \\ \frac{dN_1(t)}{dt} = +A_{21}N_2(t) + B_{21}w_L(t)N_2(t) - B_{12}w_L(t)N_1(t) - \mathbf{P} N_1(t) \end{array} \right.$$

New terms

**Tout dépend de t !!! Mais équation + simple pour  $D(t) = N_2(t) - N_1(t)$**

$$\frac{dD(t)}{dt} = (P + A_{21}) \left[ D_P - D(t) \left( 1 + \frac{w_L(t)}{w_r} \right) \right]$$

Pompage par  
unité de temps

Proba. Émission  
spontanée

Valeur de  
 $D(\infty)$  si  $w_L(t)=0$

$$w_r \propto \frac{P + A_{21}}{B_{21}}$$

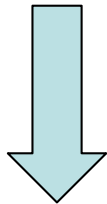
- $w_r \ll w_L(t)$  régime fort : l'émission stimulée dépeuple le niveau 2  
→ contribution négative :  $dD(t)/dt < 0$  →  $D(t)$  diminue
- $w_r \gg w_L(t)$  régime faible : Pompage efficace car  $dD(t)/dt > 0$

$$\begin{cases} \frac{dw_L(t)}{dt} = \left( \frac{D(t)}{D_{seuil}} - 1 \right) \frac{1}{\tau_c} w_L(t) \leftarrow \text{contribution} + w_L(t) D(t) \\ \frac{dD(t)}{dt} = (P + A_{21}) \left[ D_P - D(t) \left( 1 + \frac{w_L(t)}{w_r} \right) \right] \leftarrow \text{contribution} - w_L(t) D(t) \end{cases}$$

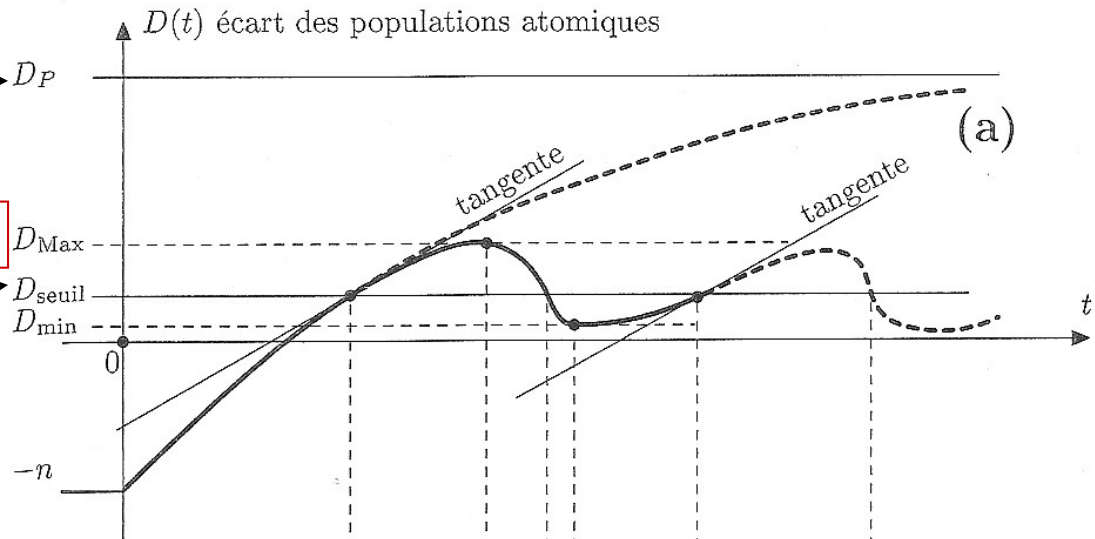
Valeur que l'on atteindrait s'il n'y avait pas de cavité (= si on avait  $w_L=0$ )

Valeur max atteinte à cause de la cavité (=  $w_L > 0$ )

Seuil au delà duquel  $w_L$  est amplifié



Un tel système [cavité + milieu pompé]  
Produit une intensité laser oscillante  
en sortie.  
C'est le *laser spiking*



# Un exemple d'enregistrement expérimental

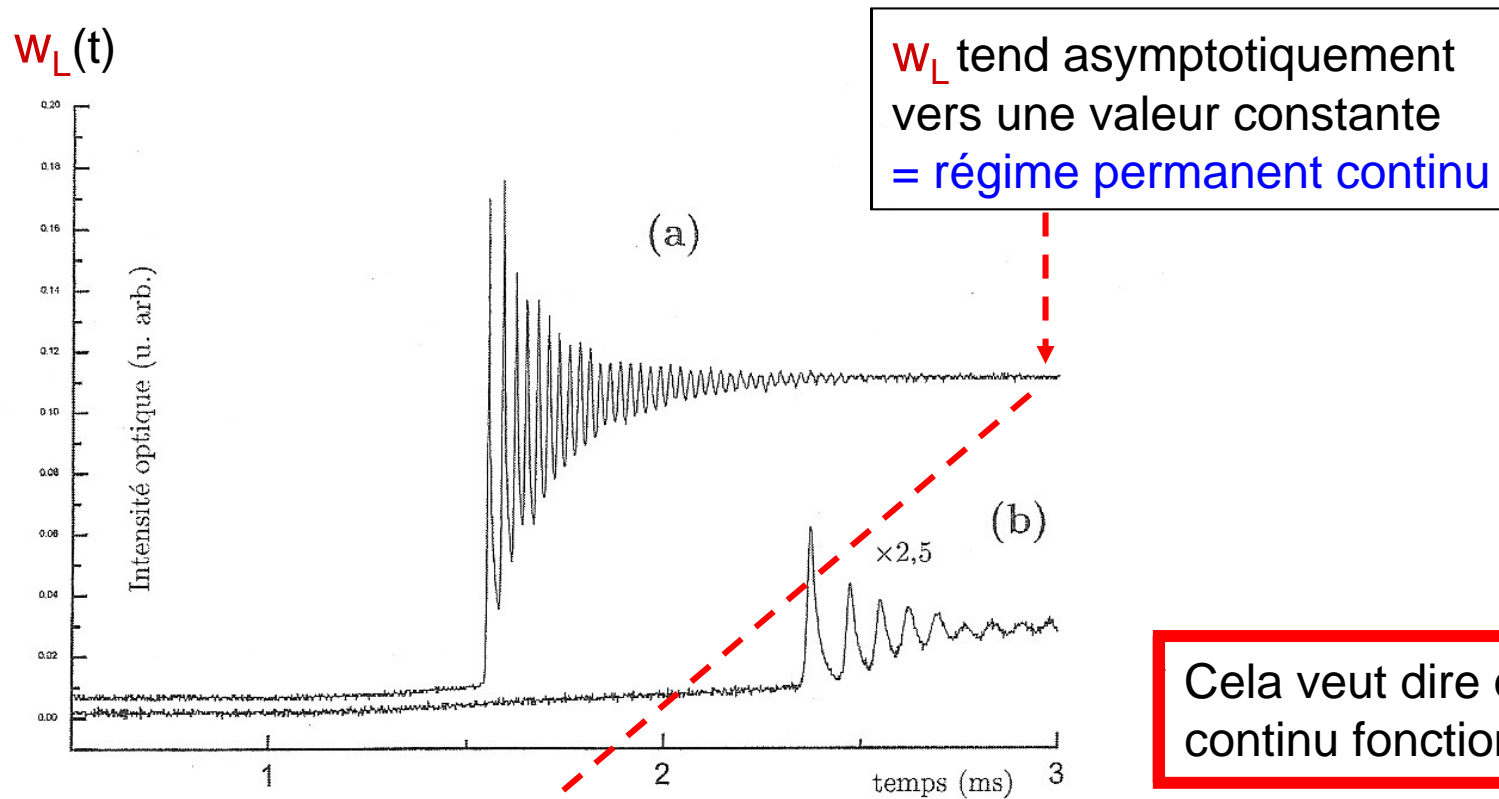
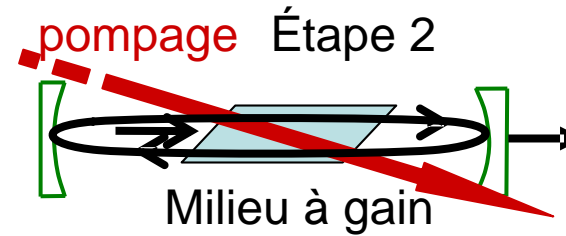
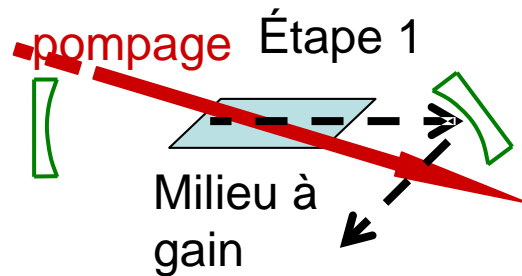


FIG. 11.2 - Démarrage d'un laser à fibre dopée au  $Nd^{+++}$ ; (a) pompage fort

$$\left\{ w_L(t) = \text{constante} \Rightarrow \frac{dw_L(t)}{dt} = \left( \frac{D(t)}{D_{seuil}} - 1 \right) \frac{1}{\tau_c} w_L(t) = 0 \Rightarrow D(t) = D_{seuil} \right.$$

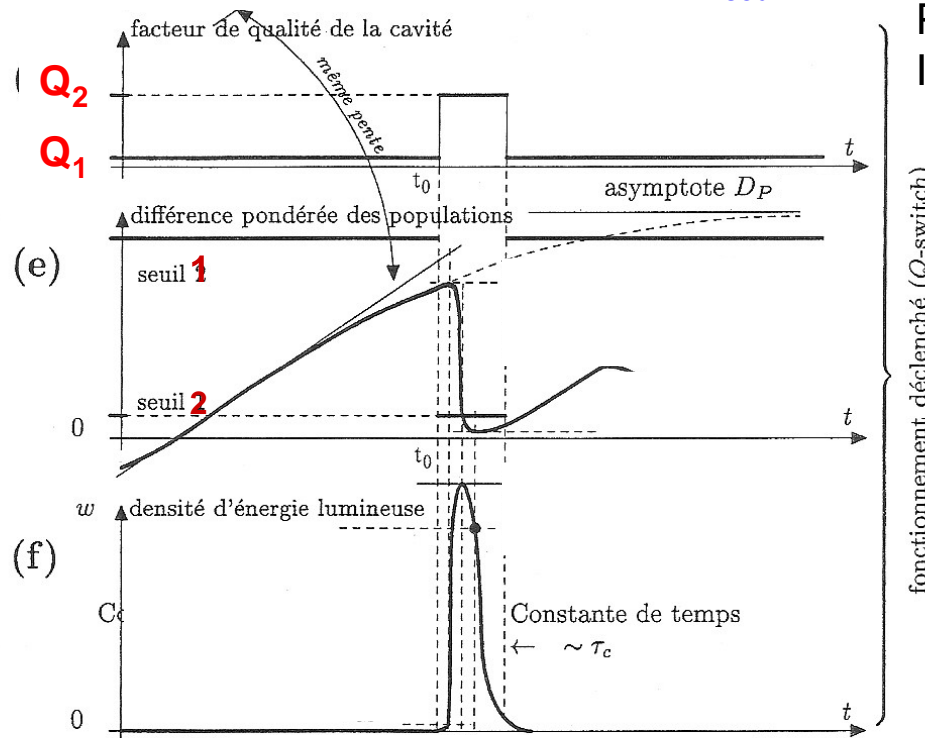


# Laser pulsé : le Q-switching



Pertes de la cavité très grandes ( $Q_1$  petit)  
 $D$  peu augmenter 'tranquillement'  
 [car on bloque l'émission stimulée ( $w_L = 0$ ,  $D_{seuil} \sim 1/Q$ )

Pertes de la cavité très faibles pendant un temps très court ( $Q_2$  grand)  
 $w_L$  augmente et diminue rapidement  
 Pour repeupler le niveau 2 (=ré-accroître  $D$ )  
 Il faut revenir 'rapidement' à l'Étape 1

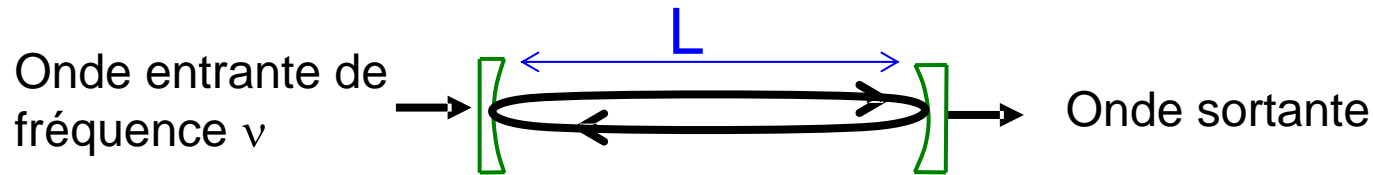


Évidemment, il y a des méthodes plus rapides qu'un tilt de miroir pour basculer de  $Q_1$  à  $Q_2$  !  
 ⇒ modulateur électrooptique  
 ⇒ On obtient des pulses de l'ordre de la nanoseconde au minimum

## Laser pulsés : le blocage de modes

On a court-circuité les résonateurs Fabry-Perot jusqu'à présent !

**Retour aux cavités :**



Résonance dans la cavité

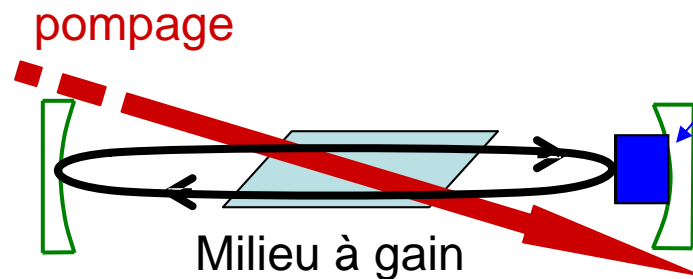
[=interférence constructive entre l'onde entrante et l'onde qui circule à l'intérieur]

$$\text{Si } \nu = \frac{nc}{2L} = \nu_n \text{ (ici } n \text{ est un nb entier)}$$

Donc, dans le cas du laser, seules les fréquences  $\nu_n$  sont amplifiées.

Les ondes se propageant à ces fréquences sont les modes propres de la cavité

Comme  $n$  vaut typiquement  $10^7$ , l'idée est de superposer en phase un grand nombre de ces modes et de les laisser sortir d'un seul coup du laser !



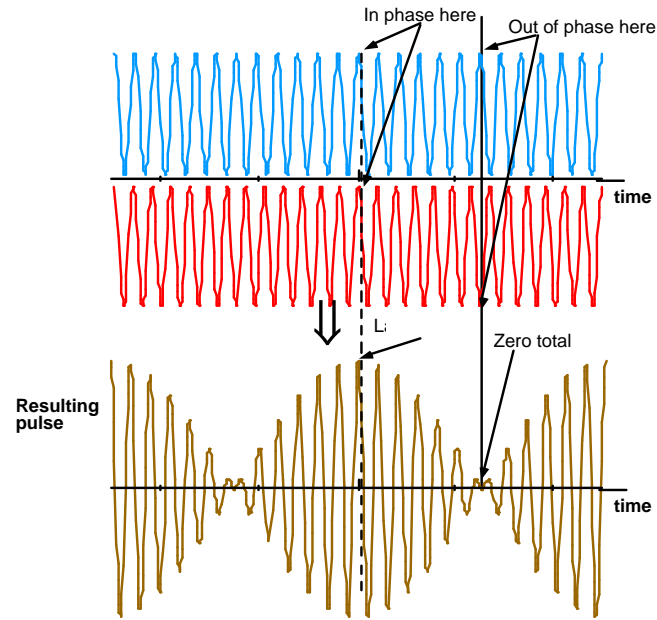
Absorbeur saturable qui ne transmet le faisceau que si l'énergie du pulse est très grande = si beaucoup de modes oscillent en phase

Comment cette superposition apparaît-elle ?

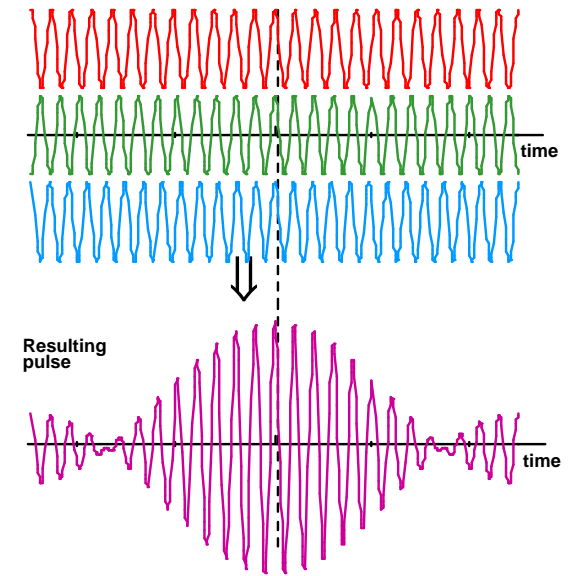
**A partir du bruit !!!!!**

# Exemples de superpositions de modes longitudinaux

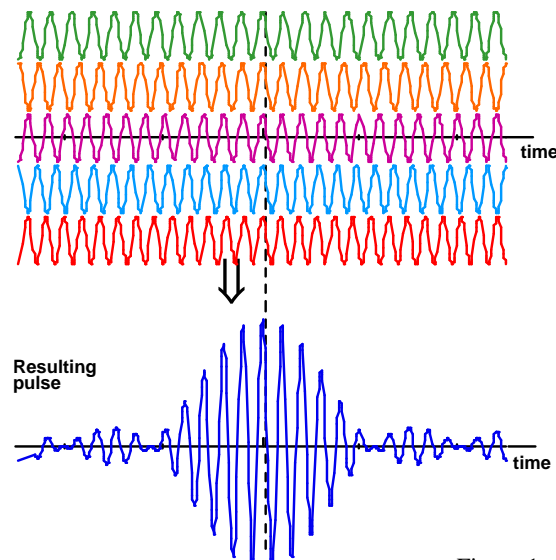
SUM OF 2 FREQUENCY COMPONENTS



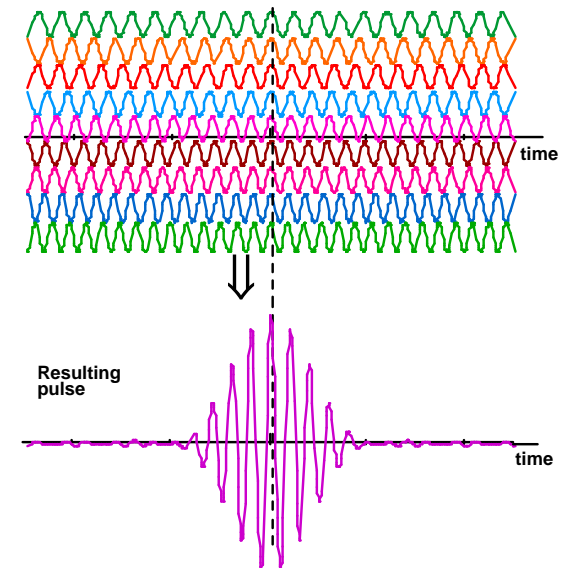
SUM OF 3 FREQUENCY COMPONENTS



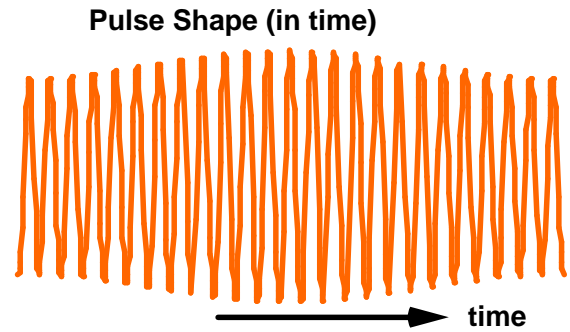
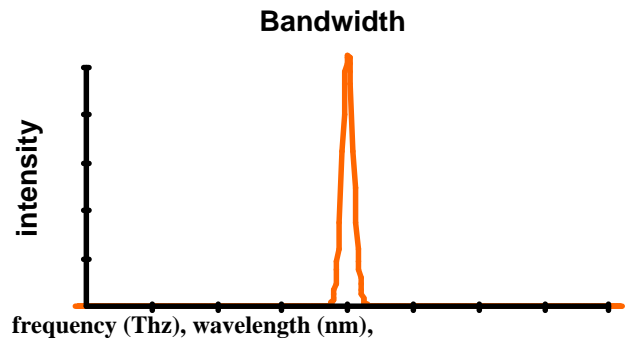
SUM OF 5 FREQUENCY COMPONENTS



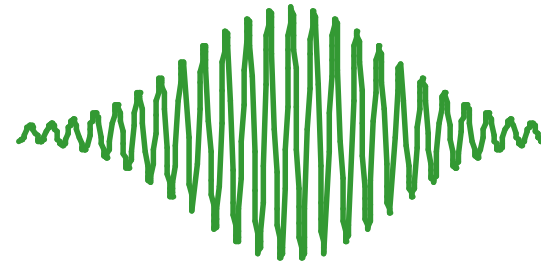
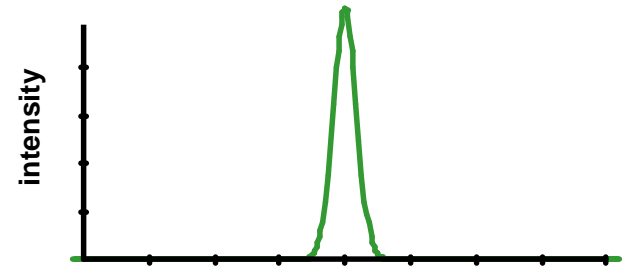
SUM OF 9 FREQUENCY COMPONENTS



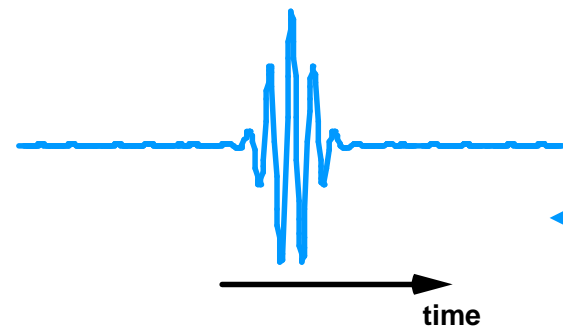
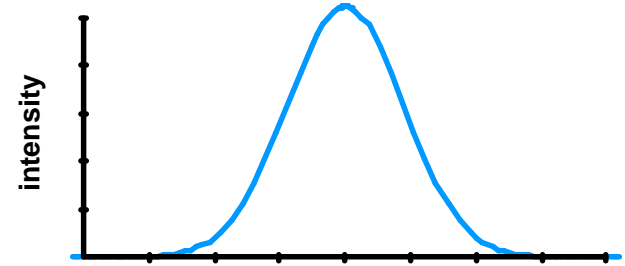
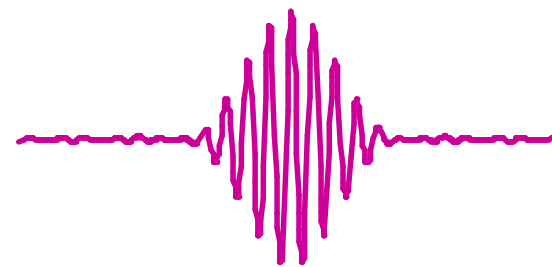
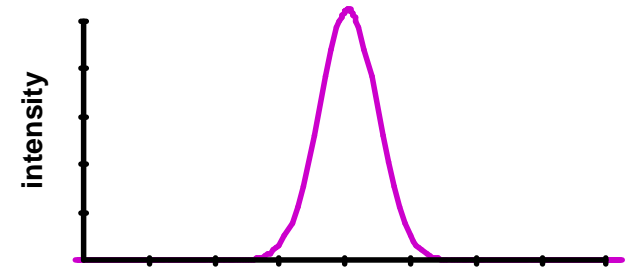
# RELATIONSHIP BETWEEN BANDWIDTH AND PULSELENGTH



Laser continu



Laser pulsé

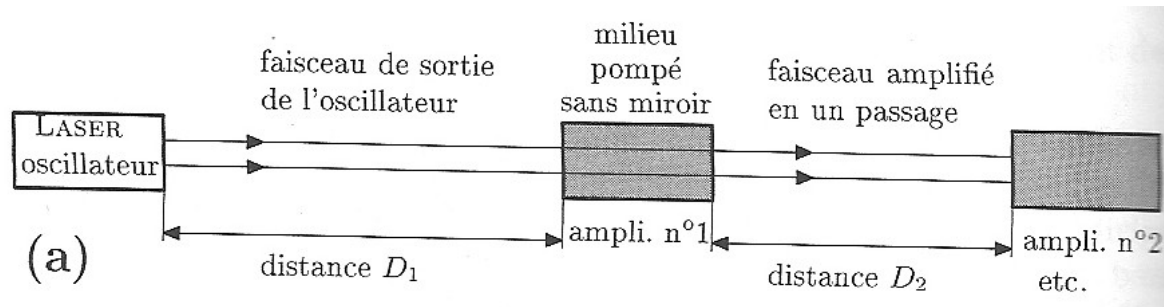


Superposition d'un très grand nombre de modes

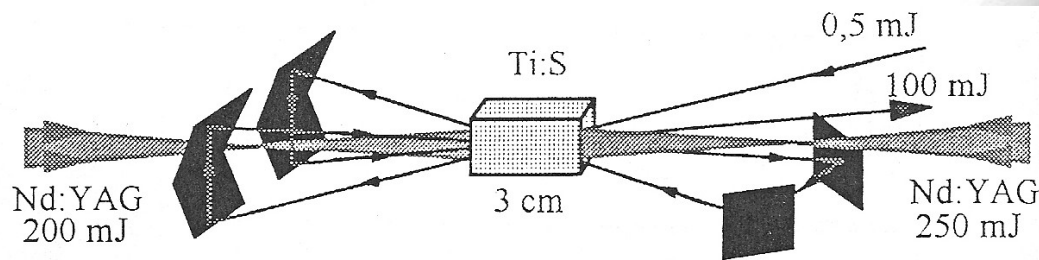
Axe des fréquences ou des longueurs d'ondes

## Comment amplifier la puissance d'un faisceau laser ? La méthode 'classique'

Avec des milieux à gain  
pompé sans miroir



On peut aussi faire passer plusieurs  
fois (ici 4 fois) le faisceau



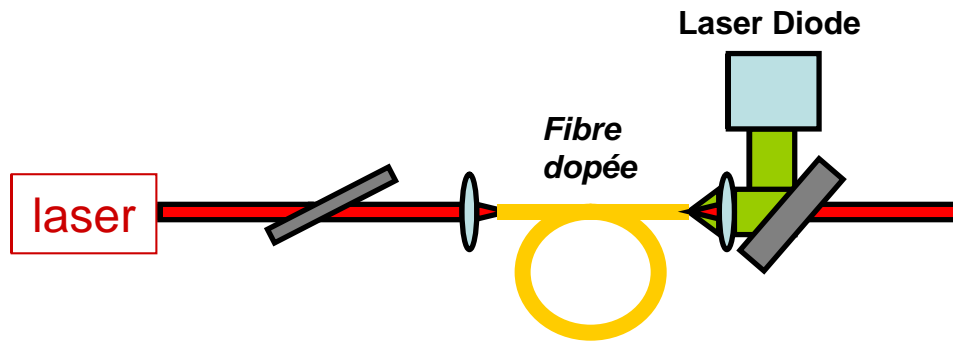
On amplifie des faisceaux pulsés à des niveaux extrêmes (cf. laser MégaJoule !)  
**MAIS** on doit limiter la cadence à cause des **effets thermiques**, il faut laisser refroidir les milieux à gain...

**DONC** : Plus on amplifie un laser pulsé  
plus on réduit la cadence des pulses (à  
l'extrême, on arrive à un pulse par jour)  
Ex. : LULI de l'école Polytechnique  
plusieurs projets dont le  
Petawatt=400J fois 400fs !!!)



# Une toute nouvelle technique d'amplification : les fibres [photoniques] dopées

Principe très simple (cf ampli fibre optiques)

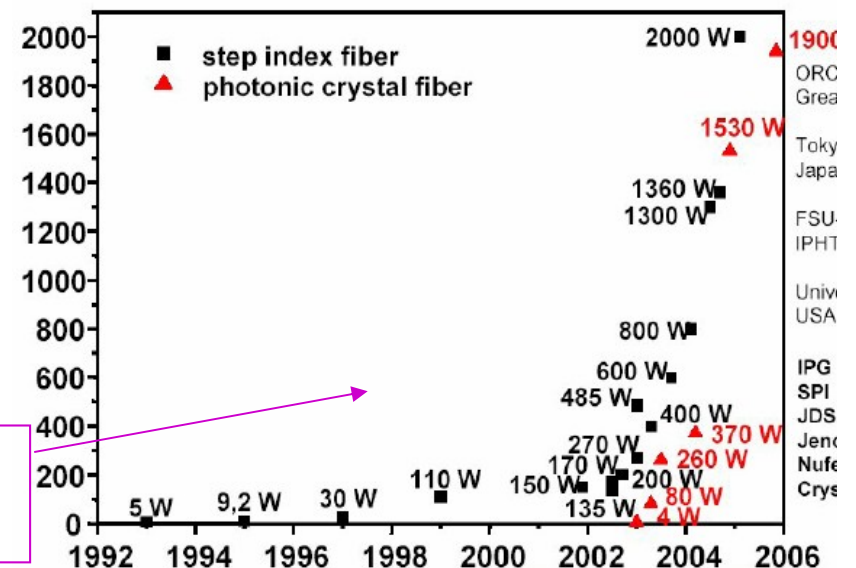


Fibre dopée et pompée :

- toute la surface de la fibre sert à évacuer la chaleur
- Pb thermique réduit
- forte puissance moyenne accessible

Suit l'évolution de la puissance des diodes de pompages...

## Régime continu



# Un mot sur les fibres photoniques

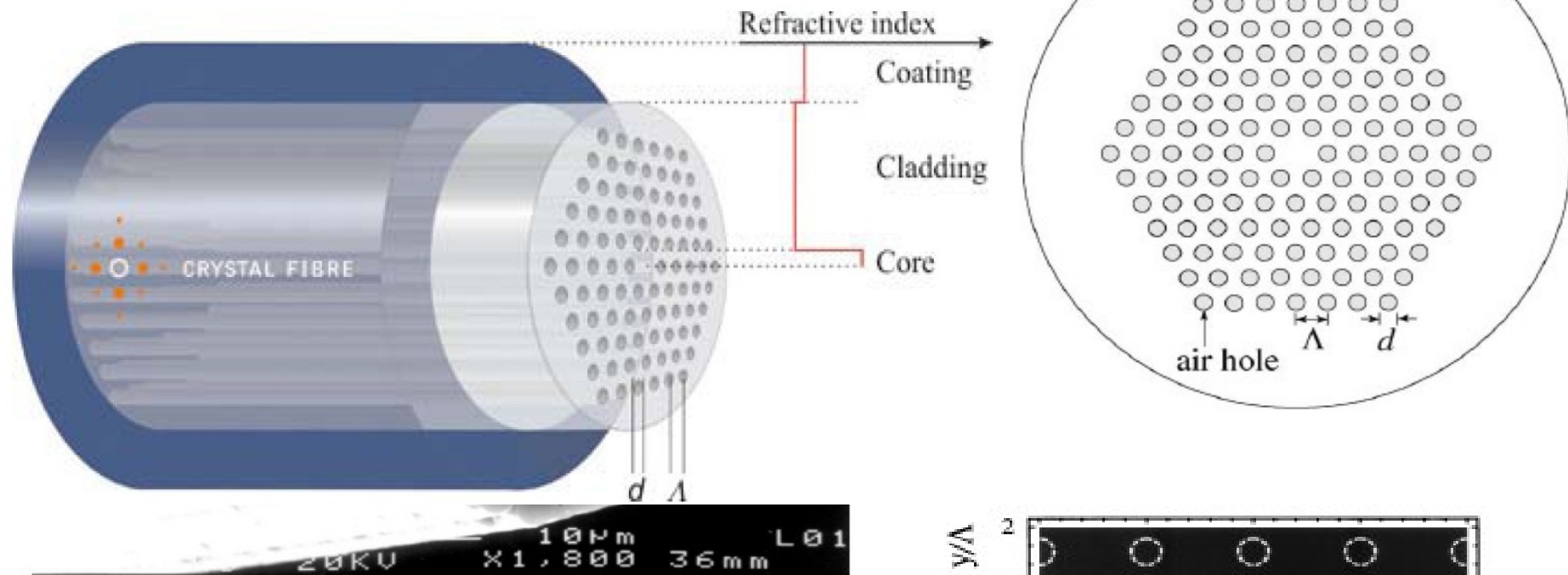


Fig. 1. Scanning electron micrograph of the photonic crystal fiber.

Monomode pour un rayon de coeur plus grand : **40 microns aujourd'hui !!!**  
→ Plus de gain (fibre 'standard'  $\sim 2-4 \mu\text{m}$ )  
→ Nécessaire pour les amplifications en mode pulsé

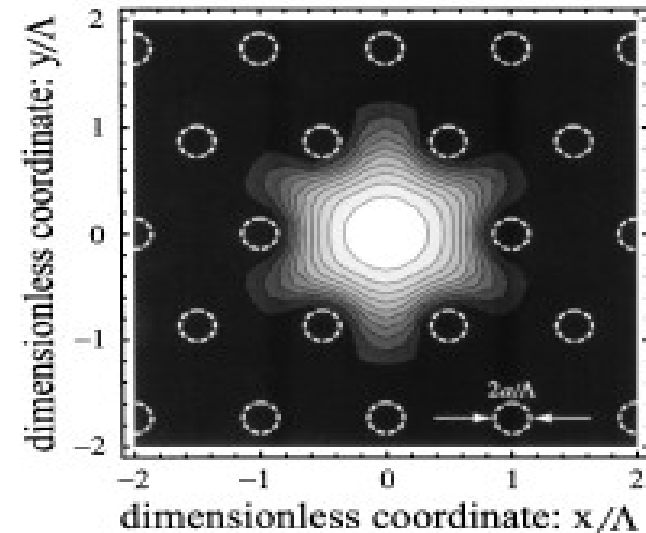


Fig. 2. Transverse intensity distribution for the x-polarized guided mode of the photonic crystal fiber described in Fig. 1 for  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ .

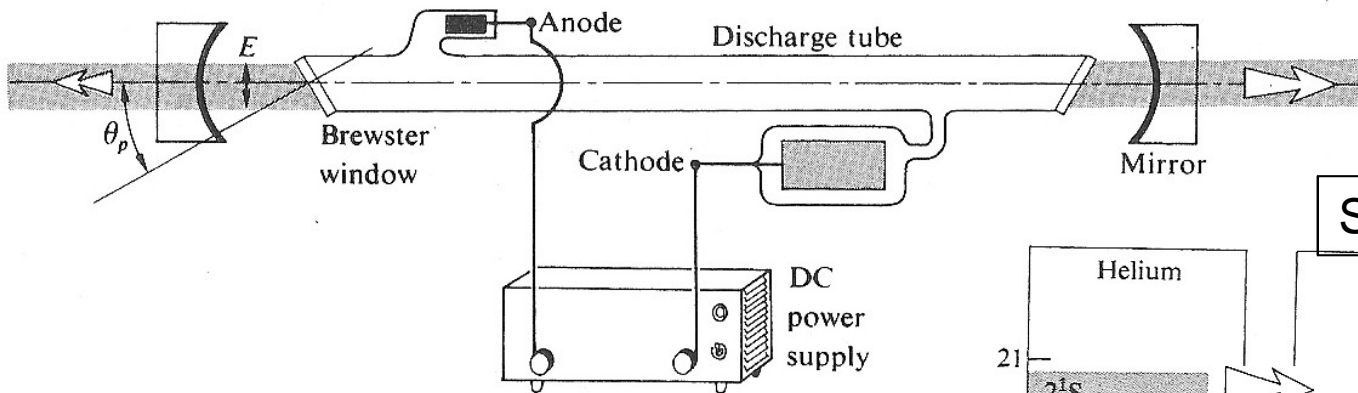


# Chap III : quelques exemples de lasers 'du commerce'

- **Continus** (cf. Cagnac chap. 12)
  - *'l'héliumnéon'*
  - 'Le YAG' hyper stable du commerce
- **Q-switch**
  - VECTOR (de chez COHERENT)
- **Blocage passif de modes**
  - [Le Titane saphir]
  - Le plus puissant & plus grandes cadences (du commerce...)



# Un exemple de laser continu : l'Helium-Néon



90% d'He et 10% de Ne  
 Une décharge électrique excite fortement les atomes d'He qui se désexcitent en 'retombant' sur 2 niveaux 'métastables'  
 Puis, certains de ces atomes transfèrent leur énergie aux Ne dans les niveaux 4s,5s  
 C'est le pompage du Ne !!!  
 Il y a ensuite plusieurs raies laser

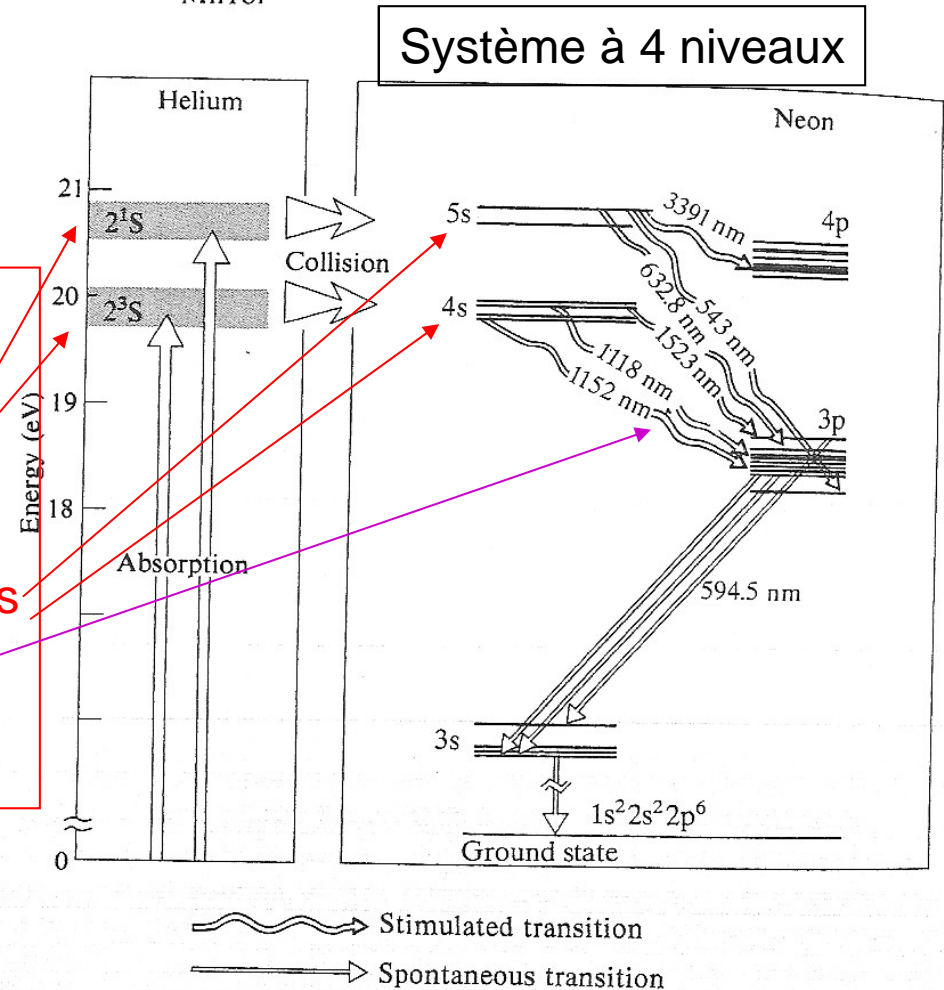
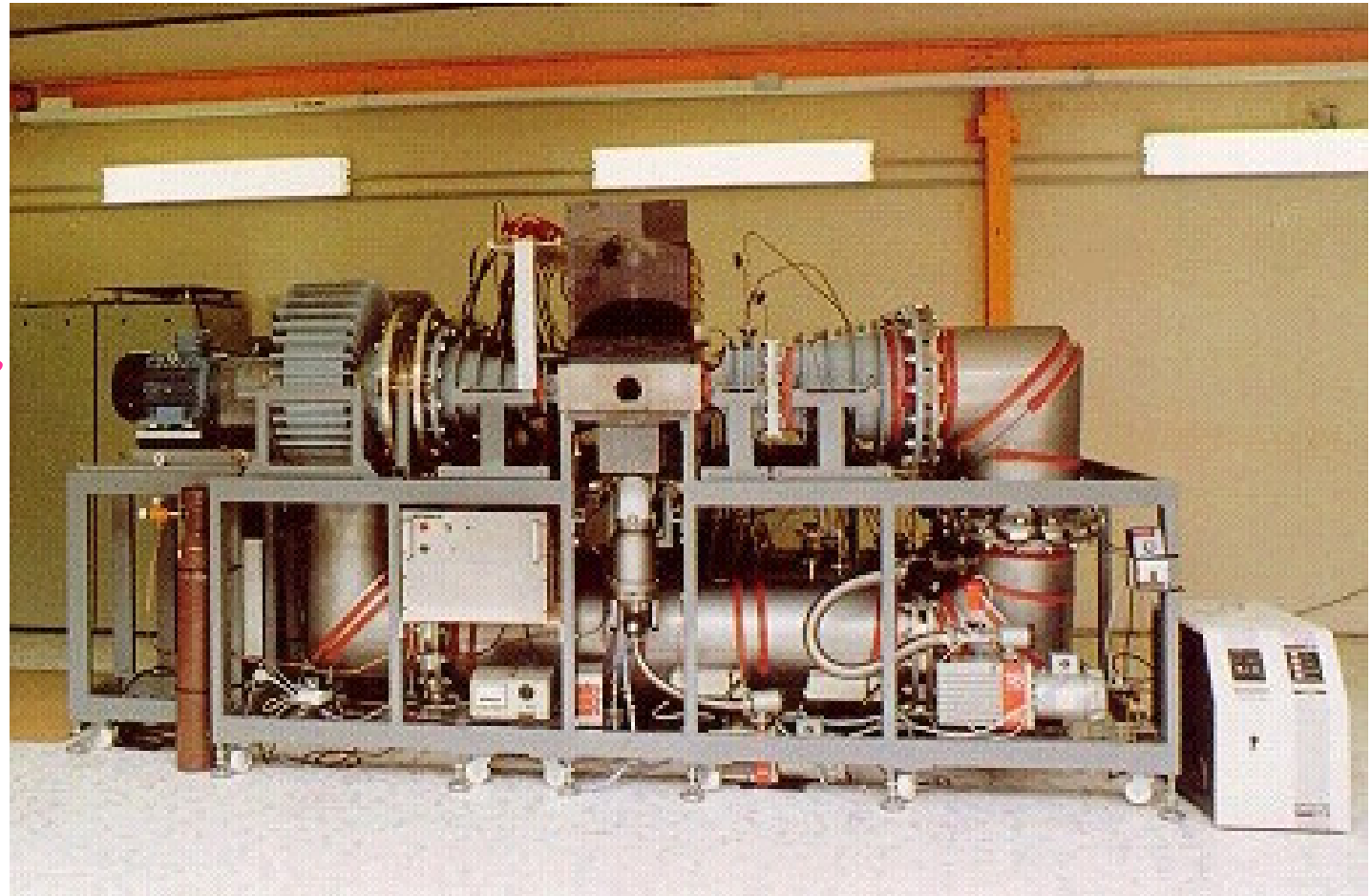


Figure 13.17 He-Ne laser energy levels.

# Le (plus gros ?) laser à gaz commercial

laser  
convertible  
to  $\text{CO}_2$   
[→BNL]



10 J per pulse,  
100 Hz repetition rate,  
1 kW average power

SOPRA

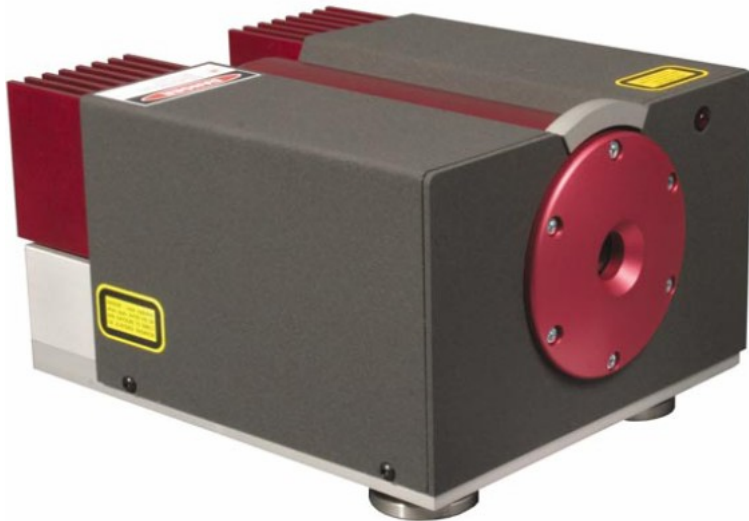
France

# Hyper stable Nd:YAG laser

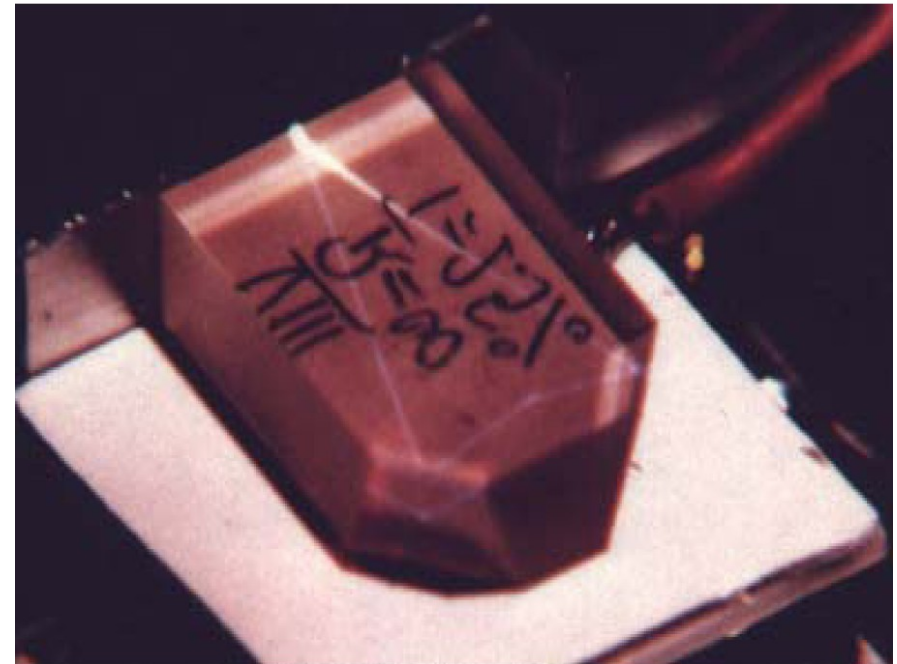


*ULTRASTABLE, CW, SINGLE-FREQUENCY LASERS*

▶ 946 nm ▶ 1064 nm ▶ 1319 nm

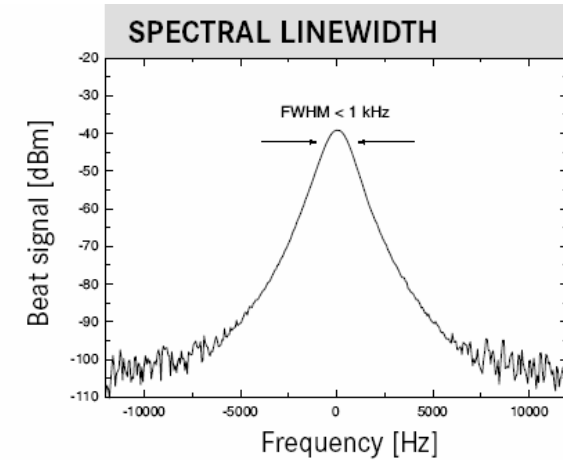


NPRO=Non-Planar-Ring-Laser



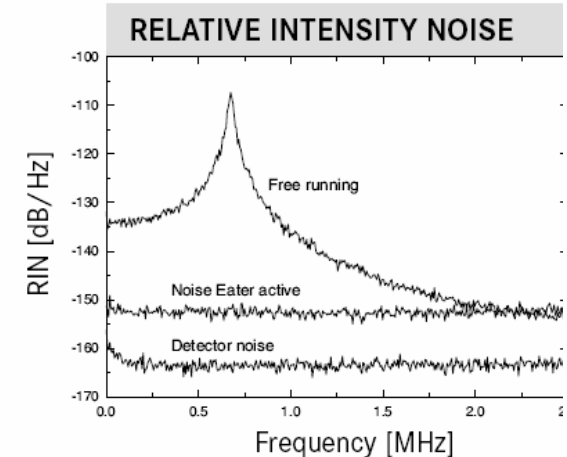
## GENERAL FEATURES

- ▶ NONPLANAR RING GEOMETRY FOR RELIABLE SINGLE-FREQUENCY OPERATION
- ▶ ALL-SOLID-STATE, DIODE-PUMPED SYSTEM
- ▶ MONOLITHIC CAVITY FOR ULTRASTABLE EMISSION
- ▶ LOW NOISE CONTROL ELECTRONICS
  - ▶ FREQUENCY & POWER MODULATION INPUTS
  - ▶ SAFETY CIRCUITRY (SOFT-START, INTERLOCK, TEMPERATURE GUARD)



## GENERAL SPECIFICATIONS @ 1064 nm

Operational mode	continuous wave (cw)
Beam quality	TEM <sub>00</sub> ( $M^2 \dagger < 1.1$ )
Thermal tuning coefficient [GHz/K]	-3
Thermal tuning range [GHz]	30
Thermal response bandwidth [Hz]	$\cong 1$
PZT tuning coefficient [MHz/V]	> 1
PZT tuning range [MHz]	-100
PZT response bandwidth [kHz]	100
Emission spectrum	single-frequency
Spectral linewidth [kHz/100 ms]	$\cong 1$
Coherence length [km]	> 1
Frequency drift [MHz/min]	$\cong 1$
Relative intensity noise, RIN [dB/Hz]	< -100
Noise eater option, RIN [dB/Hz]	< -150
Intensity noise, 10 Hz to 2 MHz [% rms]	< 0.1



# Un exemple de laser Q-switch commercial

The Coherent VECTOR Series is a family of diode-pumped, solid-state, Q-switched lasers that offer a choice of two different types of Nd-doped laser crystals: Nd:YAG for low repetition-rate systems under 10 kHz, and Nd:YVO<sub>4</sub>, which expands pulsed solid-state lasers to the 10 kHz to 200 kHz repetition-rate range.

Specifically designed for use with scanning systems, the air-cooled, low-power-consumption VECTOR lasers are ideal for the widest variety of applications in both materials processing and instrumentation. Processing applications include removing thin films such as ITO on different base components; marking (on diamond, as well as on plastics such as smart cards and chips); scribing on solar cells; zone texturing; airborne mapping; and trimming a wide range of electronic components including resistors, capacitors, quartz oscillators, and circuits.

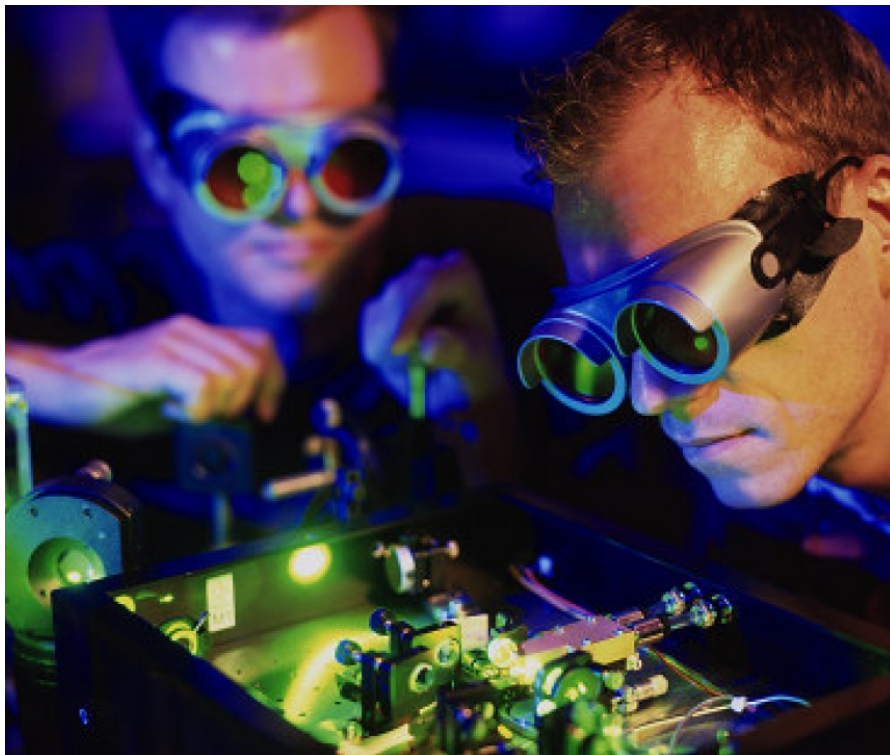
**VECTOR**  
**1064-750-01**

## System Specifications<sup>1</sup>

Wavelength	1064 nm
Pulse Repetition Rate <sup>2</sup>	Single-shot to 100 kHz
Pulsewidth	<30 ns @ 1 kHz
Pulse-to-Pulse Stability	<1.5% rms
Average Output Power	≥0.75W @ 1 kHz
Polarization Ratio	>100:1, vertical
Long-term Power Stability	<±2% over 8 hours
Warm-up Time	<10 minutes
Spatial Mode	TEM <sub>00</sub>
Beam Divergence	<6 mrad
Beam Diameter	0.25 mm @ 1/e <sup>2</sup>
Static Alignment Tolerances <sup>4</sup>	
Beam Position	±0.2 mm
Fiber Length	±2 mrad



# Un exemple de laser à bocage passif de modes commercial : les plus grandes cadences



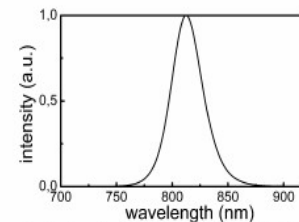
## GIGAJET 30 femtosecond oscillator

### description

GIGAJET 30 is a femtosecond oscillator designed for highest repetition rates. We specify 3 GHz, other values between 2 GHz and 3.5 GHz are available as custom versions.

The housing is fully enclosed and can be entirely temperature-stabilized with external cooling water. Passive repetition rate stability of 3 kHz has been demonstrated for cooling water stable to 0.1°C.

Initial installation and training in customer's application lab are provided. Protected by U.S. patent 6,618,423 and European patents.



typical output spectrum from GIGAJET 30

### applications

- precision optical spectroscopy/frequency metrology
- time-resolved spectroscopy
- THz generation and spectroscopy
- two-photon and SHG microscopy
- see our application notes for details ([www.gigaoptics.com](http://www.gigaoptics.com))

### contact information

**GIGA**OPTICS GmbH  
Blarenstraße 56  
D-78462 Konstanz | Germany  
phone +49 7531 368371  
fax +49 7531 368372  
e-mail: [info@gigaoptics.com](mailto:info@gigaoptics.com)  
<http://www.gigaoptics.com>

France OSYRIS  
<http://www.osyris.com>

Japan Electronics Optics Research, Ltd.  
<http://www.eorjp.com>

Korea Jinsung Laser  
<http://www.jinsunglaser.com>

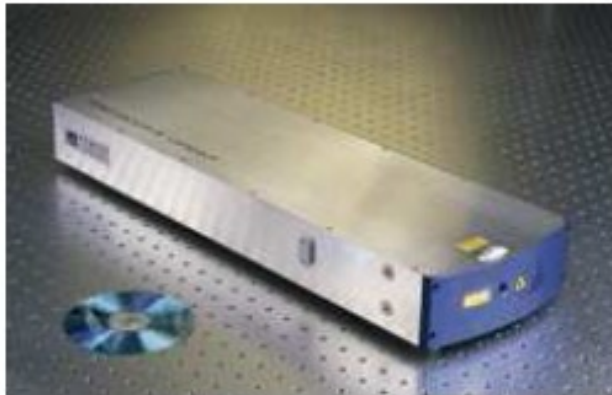
### technical specifications/system requirements

(subject to change without notice)

repetition rate	3 GHz
pulse length	≤ 30 fs <sup>*1</sup>
output power	650 mW <sup>*2</sup> <b>1 nJ/pulse...</b>
central wavelength	810 nm (±10 nm)
beam quality	M <sup>2</sup> ≤ 1.2
dimensions	320x200x107 mm <sup>3</sup>
<sup>*1</sup> after appropriate extracavity compression (not provided)	
<sup>*2</sup> @ 5.5 W pump power in a TEM <sub>00</sub> mode pump beam of 532 nm wavelength (equivalent to a Coherent Verdi™)	
operating temp.	21°C ±5°C
power requirements	no electrical power required
cooling water req.	flow 0.5 – 1.5 l/min. temp. ~20°C, stable to ±0.1°C

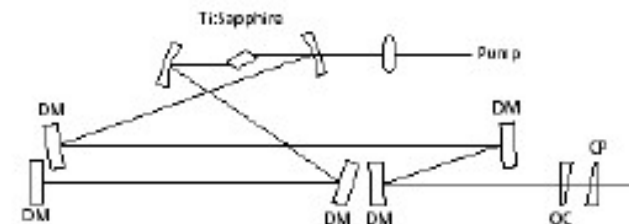
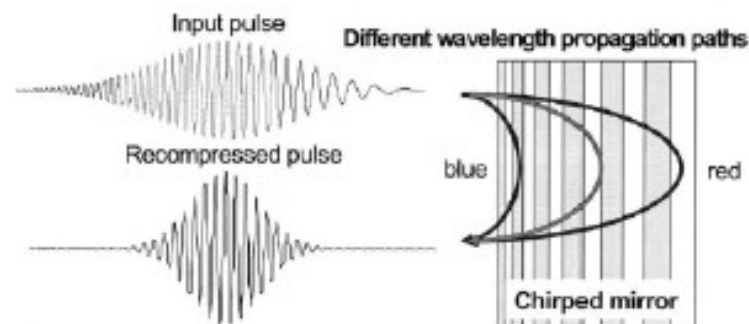
# Un exemple de laser à bocage passif de modes commercial : les plus petites impulsions

GRADUATE SCHOOL



Impulsions de moins de 12 fs !!!!

Utilisation de miroirs à dispersion  
Négative à la place des prismes



Frédéric Druon

# Un exemple de laser à bocage passif de modes commercial : le plus 'puissant'

## Mode-locked Thin-Disk Laser

1  $\mu$ J per pulse with 50 W output power  
 Oscillator only, no amplifier  
**SESAM® Technology**

### Applications

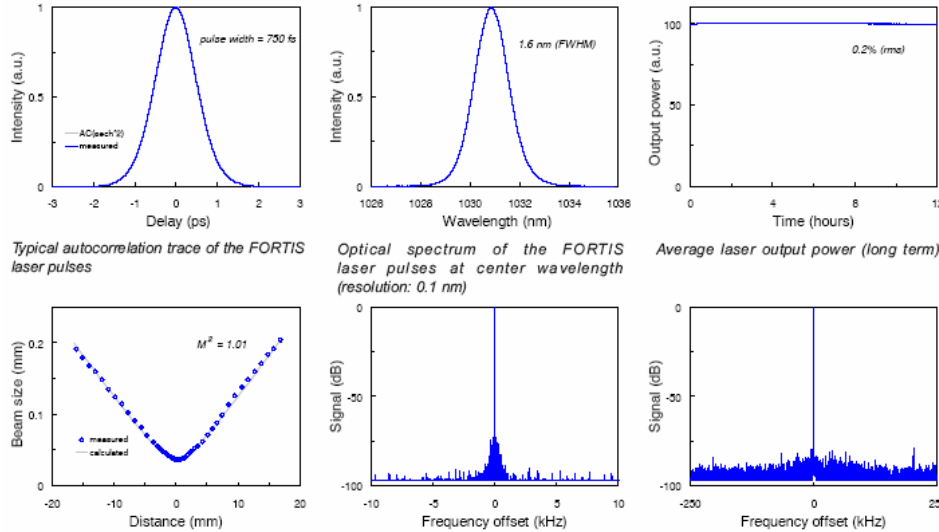
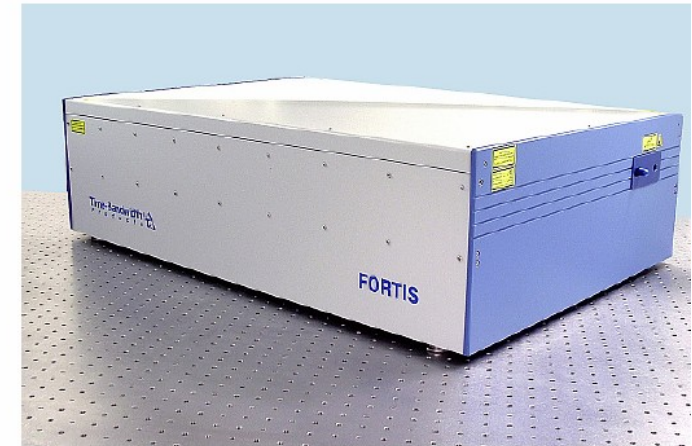
- Extremely high repetition rate material processing and micromachining
- Waveguide fabrication
- RGB pump source
- OPO pumping

### Features

- 50 W output power
- Oscillator-only design
- Turn-key operation
- Low maintenance
- Closed-loop water cooling

### Options

- Second harmonic generation
- UV harmonic generation
- Clock synchronization
- Remote control / RS-232



Typical autocorrelation trace of the FORTIS laser pulses

Optical spectrum of the FORTIS laser pulses at center wavelength (resolution: 0.1 nm)

Average laser output power (long term)

Measured beam size versus propagation distance through a beam focus. The calculated curve shows the dependence for a Gaussian beam with the indicated  $M^2$  value

Typical microwave spectrum of the pulse train, centered at the laser repetition rate (span: 20 kHz, resolution: 3 Hz, vertical scale in dB)

Typical microwave spectrum of the pulse train, centered at the laser repetition rate (span: 500 kHz, resolution: 100 Hz, vertical scale in dB)

The FORTIS laser system provides cutting-edge performance that benefits numerous applications, especially in fields such as micromachining and nonlinear optics. The system can be made to fit your particular application with options such as user-specified repetition rates, frequency conversion with nonlinear crystals, or timing synchronization.

Additional specifications	FORTIS
turn-on time	< 15 min
pointing stability	25 $\mu$ rad / °C
power stability (>1kHz)	0.1% rms
voltage	100 VAC – 240 VAC
frequency	50 Hz – 60 Hz
input power (single phase)	2800 VA
laser head (size, weight)	620 mm x 270 mm x 930 mm, 90 kg
power supply (size, weight)	465 mm x 167 mm x 590 mm, 22 kg
chiller (size, weight)	483 mm x 267 mm x 560 mm, 42 kg

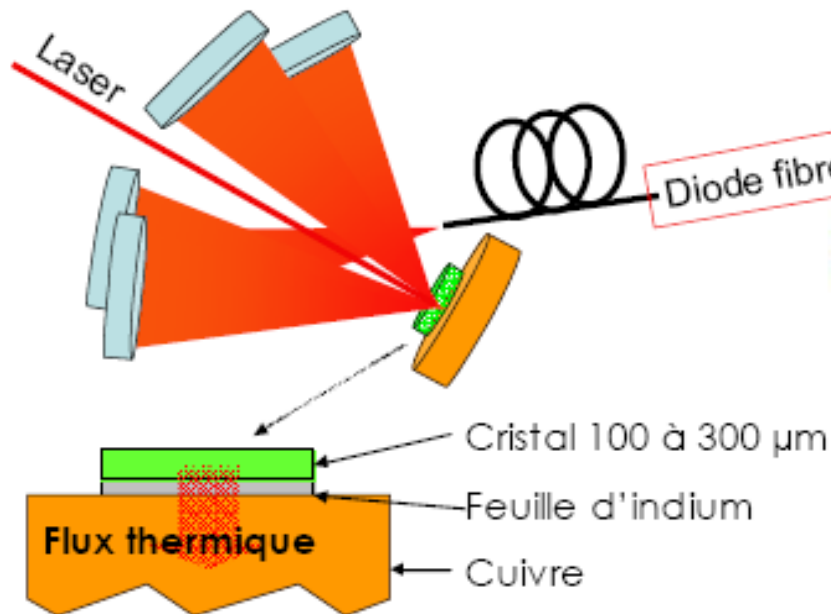


50 W	output power
40 MHz – 60 MHz	repetition rate
1 $\mu$ J	per pulse
< 800 fs	pulse width
1 MW	peak power
1030 nm	wavelength
1.1	$M^2$ ( $TEM_{00}$ )

Made in Switzerland

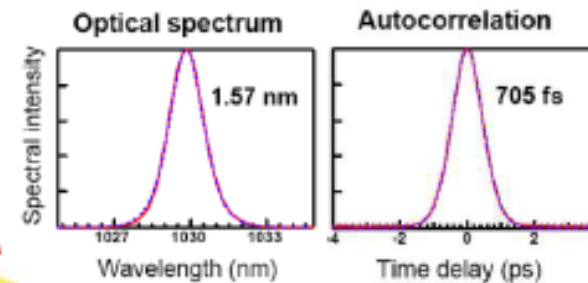


- La technologie « thin disk »



Contact: technologie complexe

- Yb:YAG



**Puissance 80 W**

(370 W de pompe)

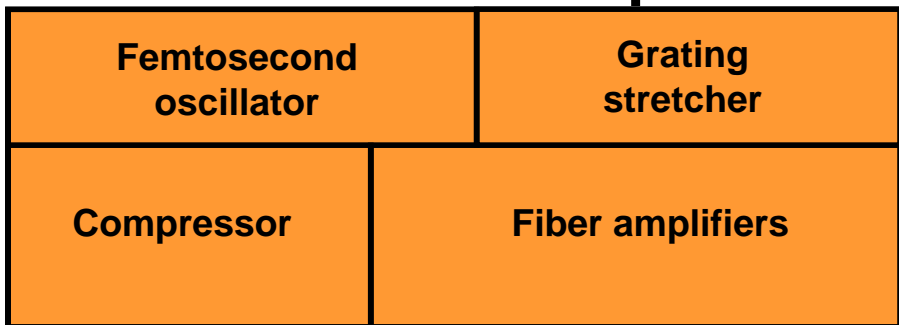
57 MHz, 1,4  $\mu\text{J}$

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

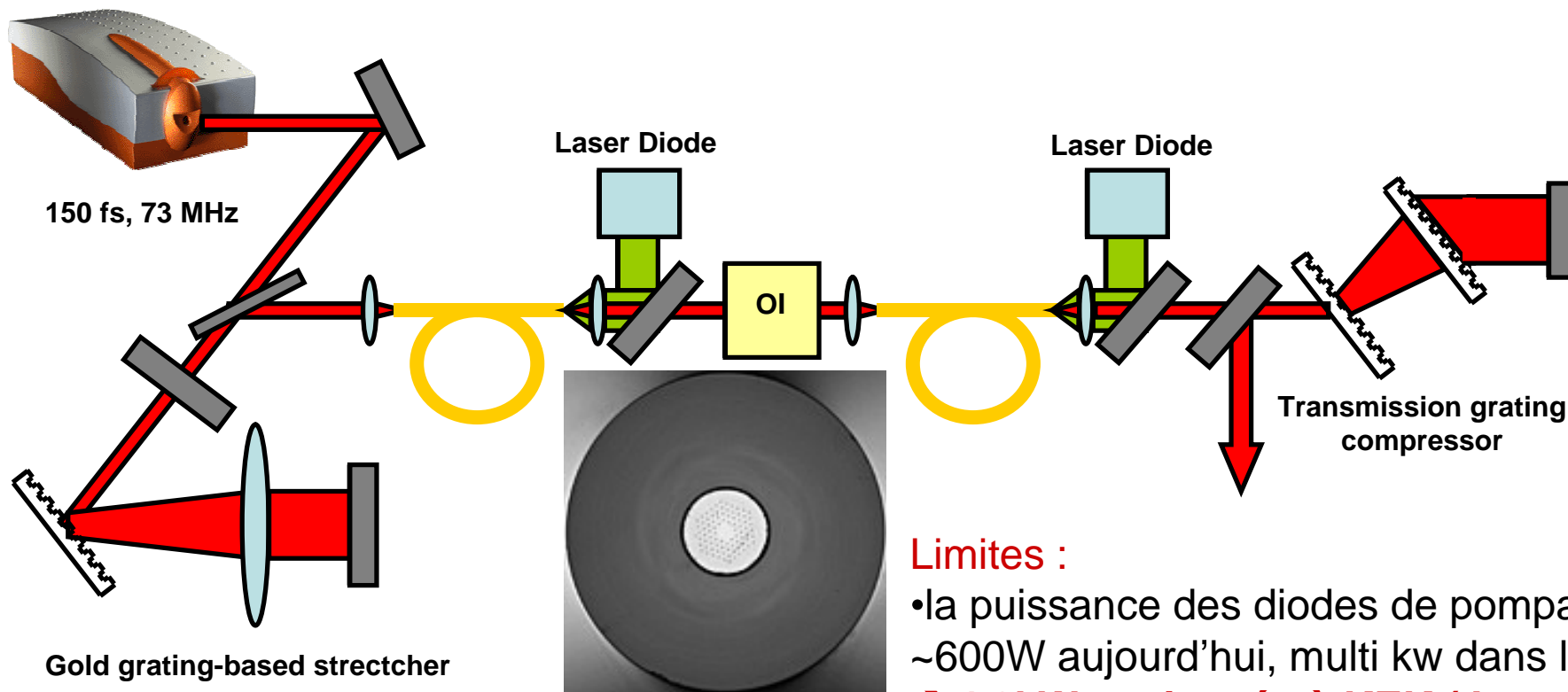
**Efficacité  $\approx$  2 %**

# Le record de puissance moyenne en mode pulsé

*F. Röser et al. Optics letters, 30, p2754, 2005*



- 131 W average power
- 220 fs duration
- 1.8 μJ per pulse
- 73 MHz



**Limites :**

- la puissance des diodes de pompage !  
~600W aujourd'hui, multi kw dans le futur
- ➔ **4.8kW envisagée à KEK (Japon)...**

Ce document à été crée avec Win2pdf disponible à <http://www.win2pdf.com/fr>  
La version non enregistrée de Win2pdf est uniquement pour évaluation ou à usage non commercial.