

'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

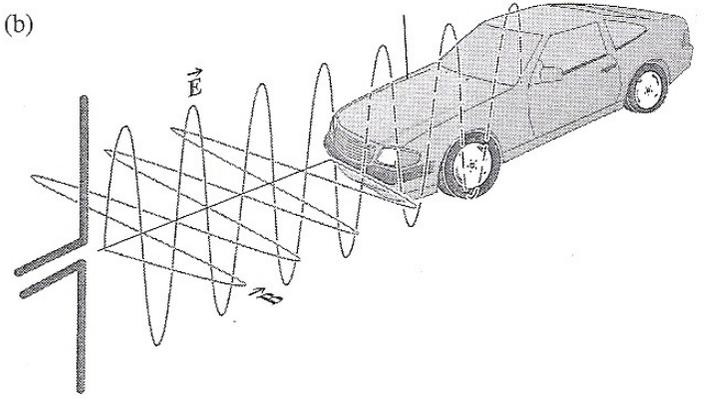
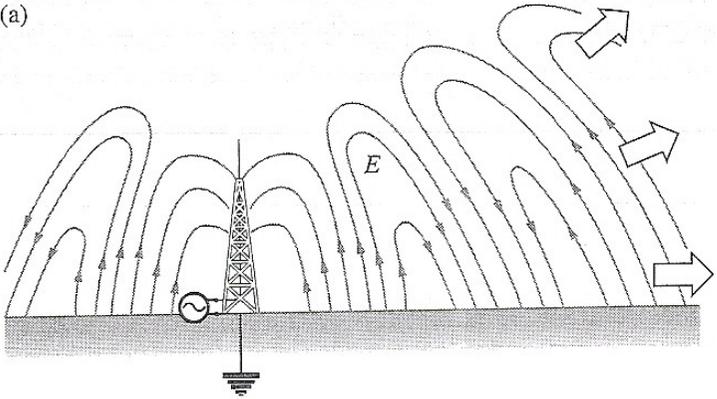
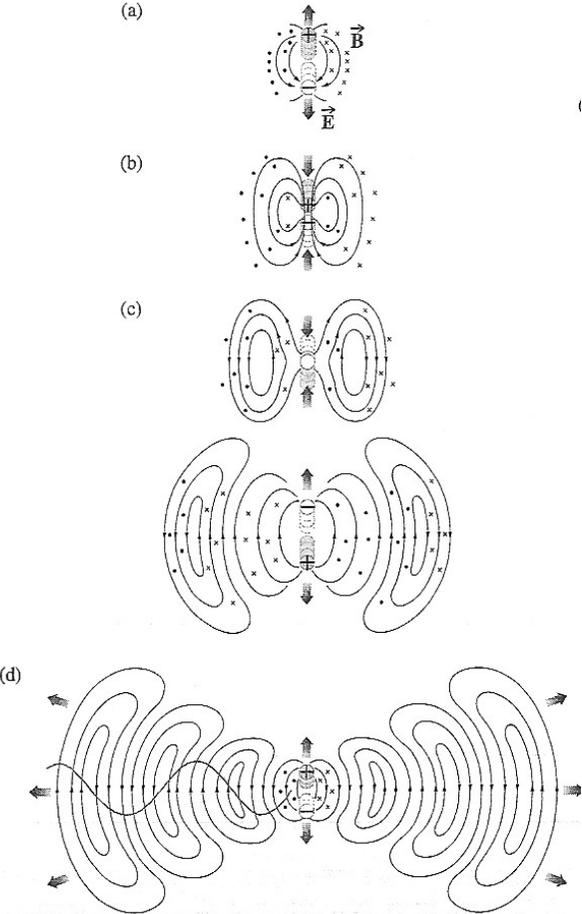


Figure 3.32 The \vec{E} -field of an oscillating electric dipole.

Champ Électromagnétique (continu !)

Champ électrique oscillant

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



et

Champ magnétique oscillant

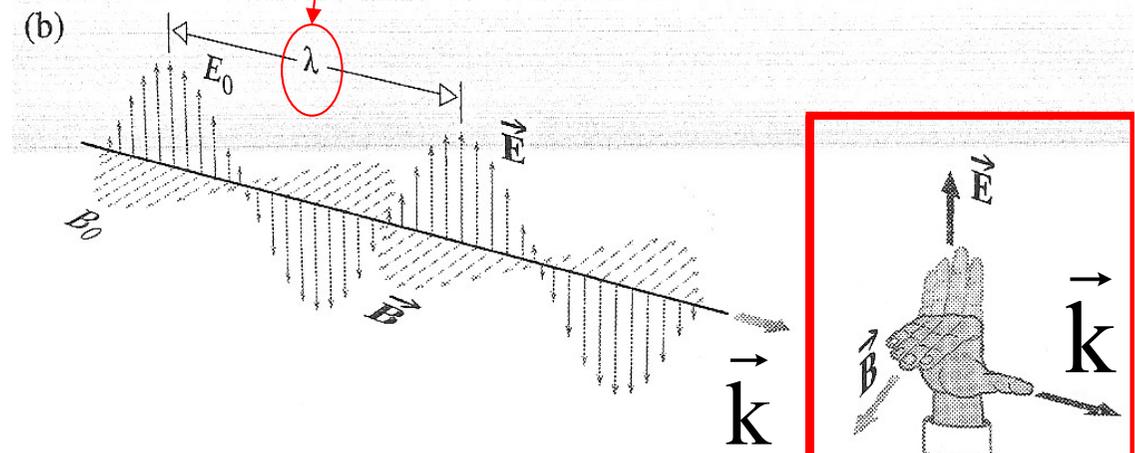
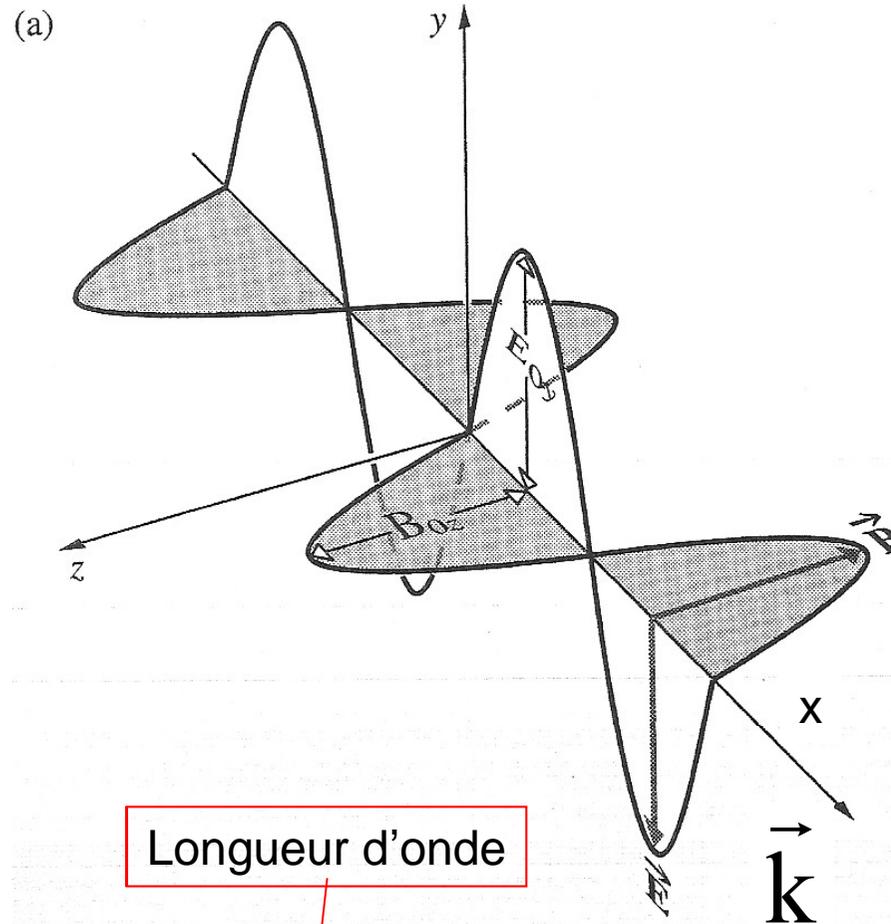
B : perpendiculaire à E dans le vide
et les milieux isotropes

Longueur d'onde λ

Fréquence $\nu = c/\lambda$

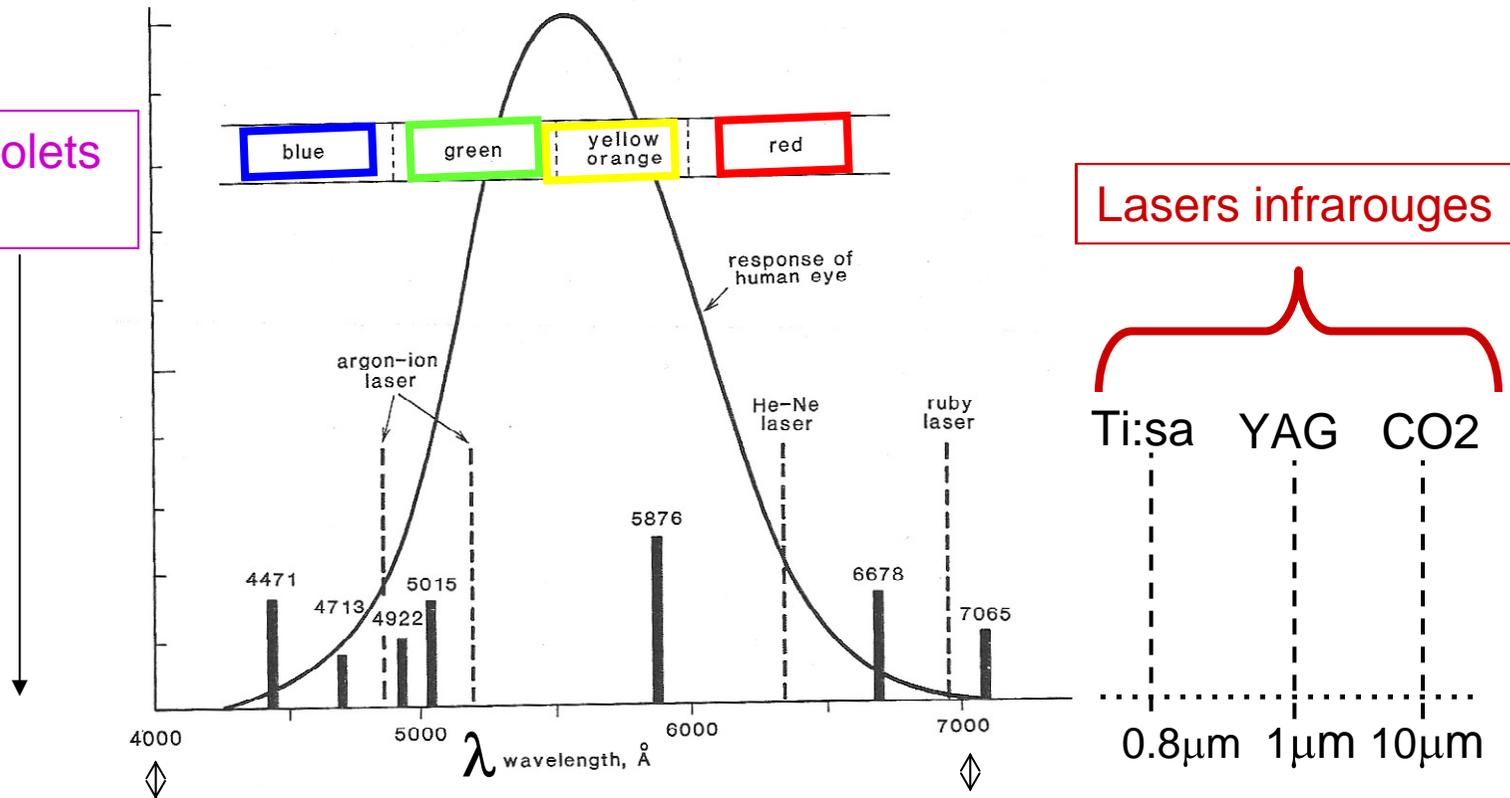
Vecteur d'onde \vec{k}

et $k = 2\pi/\lambda$



Longueur d'onde / puissance / photons

Lasers ultraviolets
eximères



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

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

Dualité onde-corpuscule :

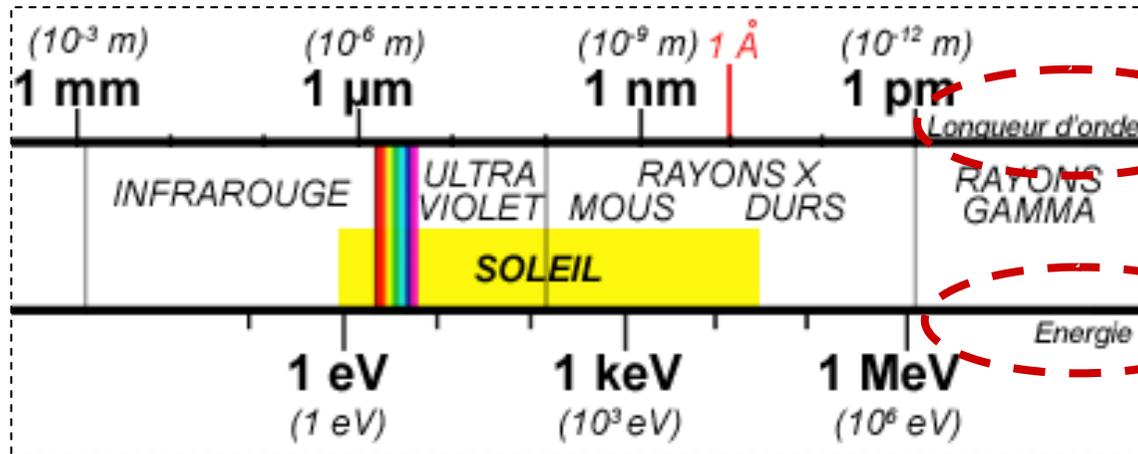
Une onde elm peut être vue comme un ensemble de photons d'énergie $h\nu$



- Flux de photons = nb de photons qui traverse une surface / unité de temps [en 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 Wm^{-2}]

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

λ 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

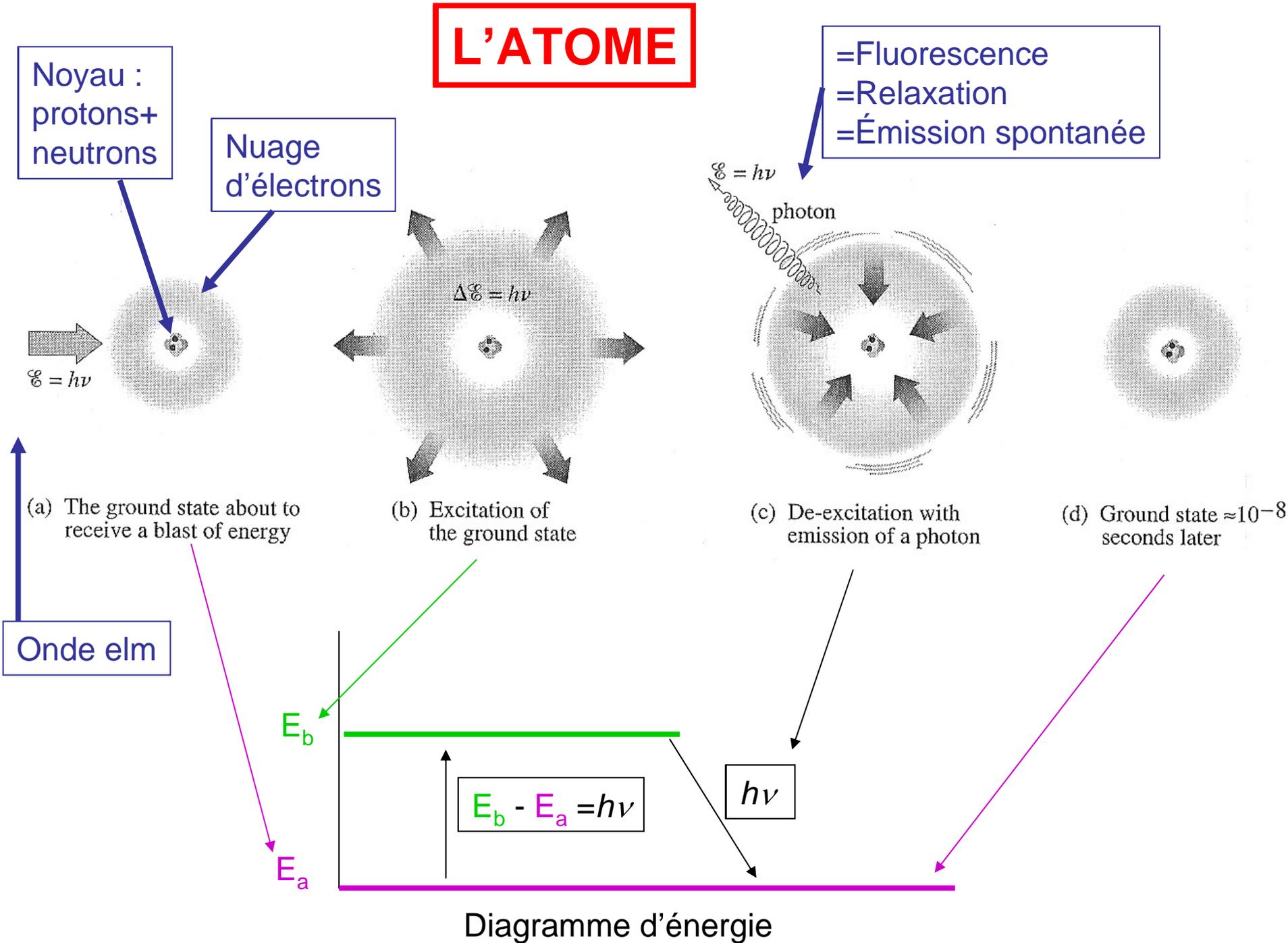
E_b

E_a

$E_b - E_a = h\nu$

$h\nu$

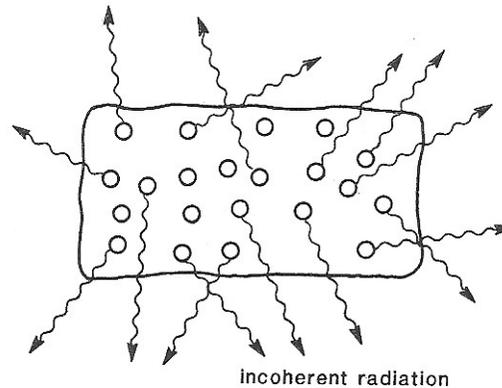
Diagramme d'énergie



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 $N=n_b(t)+n_a(t)$

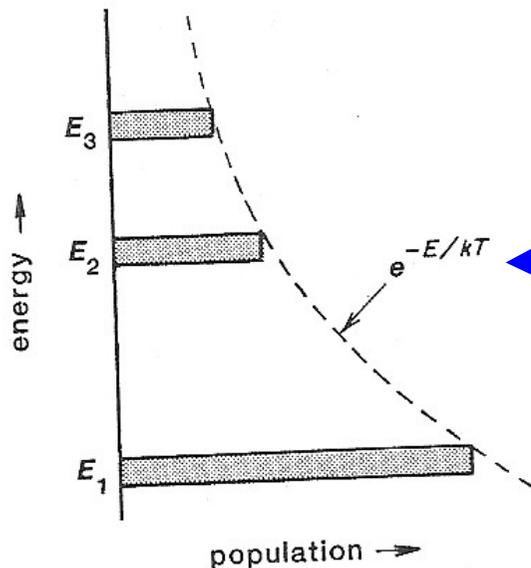
Mesure de l'intensité de la fluorescence

en fonction de t donne $n_b(t)$

⇒ On trouve une exponentielle

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

τ est la durée de vie du niveau b



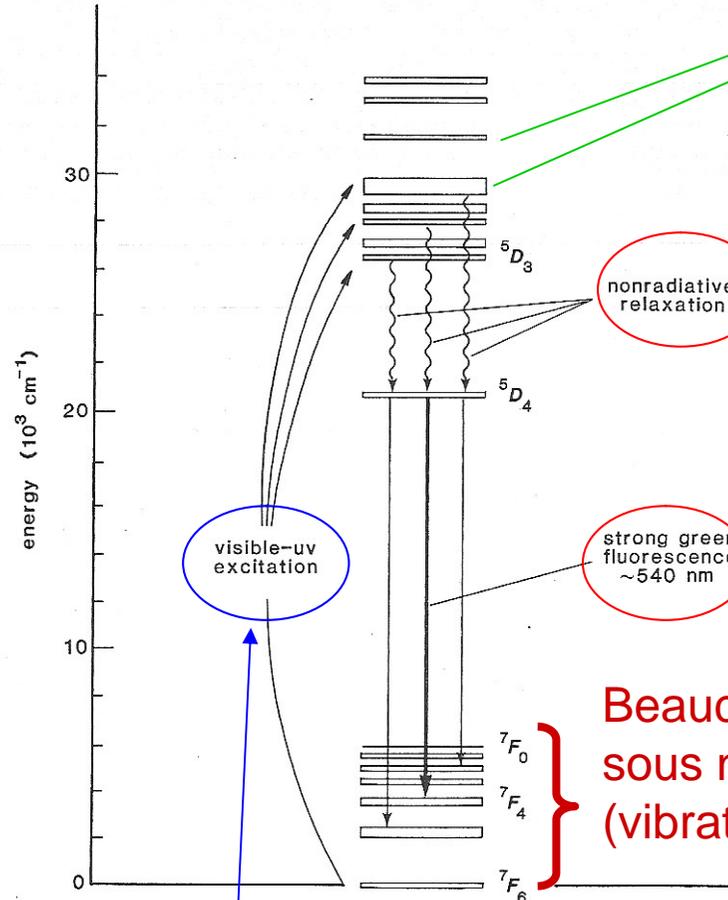
Note : les niveaux peuvent aussi être peuplés grâce à l'agitation thermique :

Loi de Boltzman

Un petit peu plus sur les diagrammes d'énergies



ion chrome Cr³⁺ SEUL



Les niveaux ont des largeurs différentes :

- Largeur 'naturelle' (Heisenberg)
 - $\tau \Delta E > h/2\pi \Rightarrow$ plus τ petit, plus ΔE 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

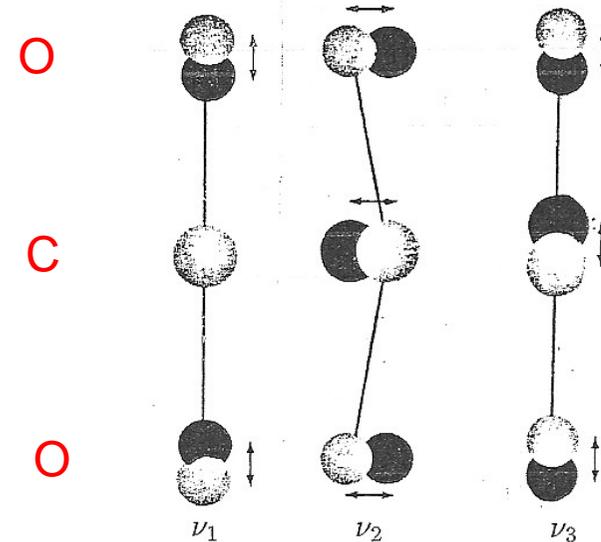


Un petit peu plus sur les sous structures des niveaux atomiques

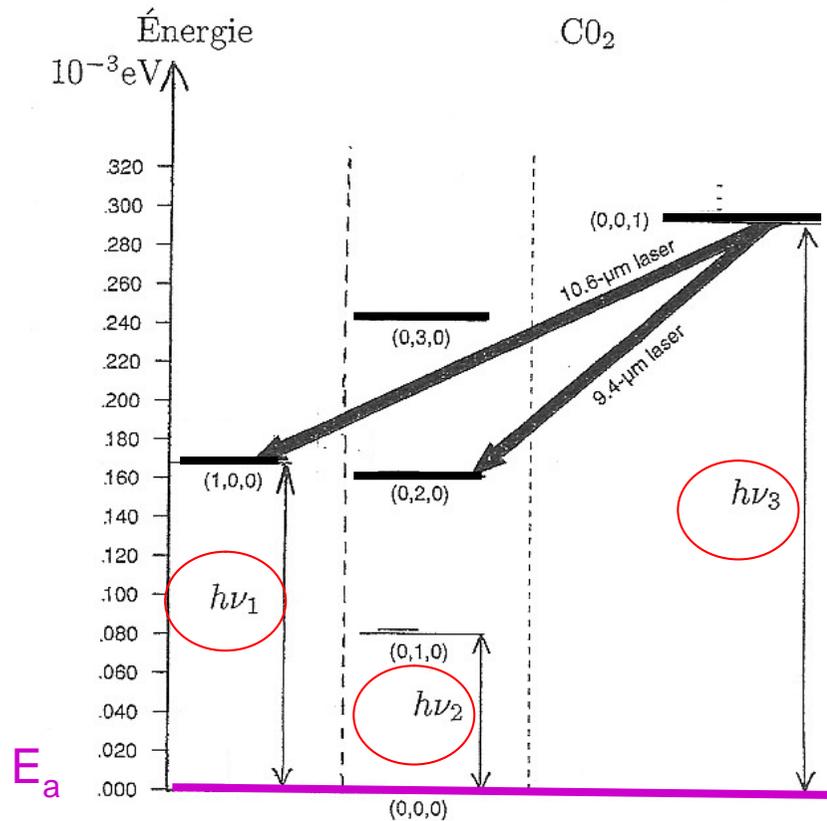
Ex. : atome/molécule d'un gaz :

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

Ex. : CO2



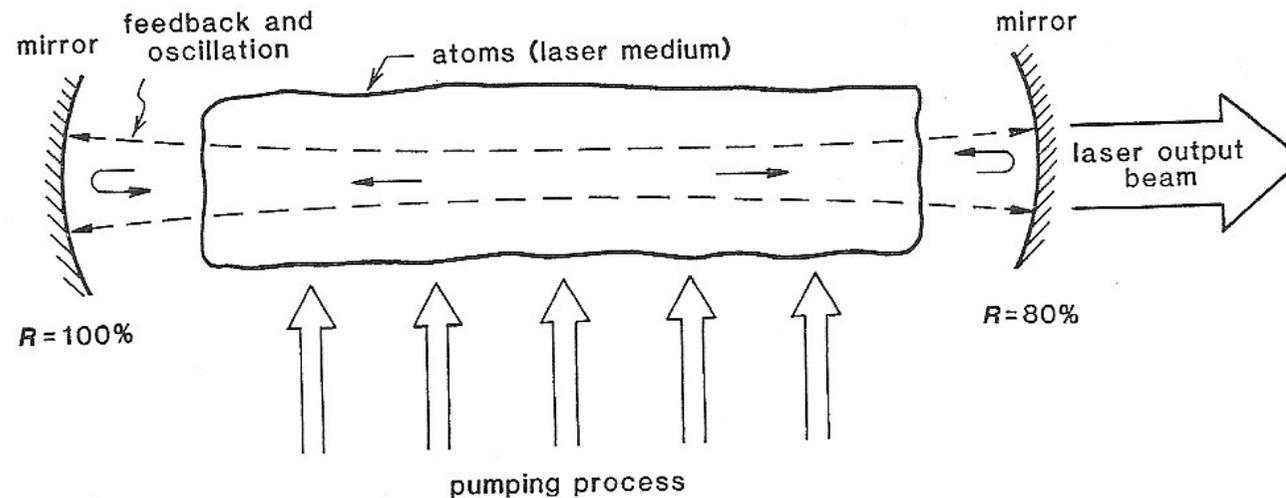
3 degrés élémentaires de vibration
Énergies : $h\nu_1, h\nu_2, h\nu_3$



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)

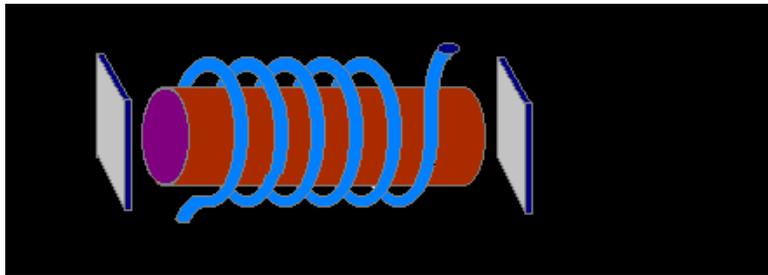
à qqes dizaines de W (lasers de pompage pour les oscillateurs femtosecondes)

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 :

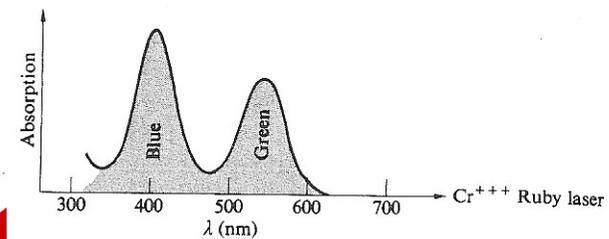


Rubis= Al_2O_3 (transparent)+ions Cr^{3+}
=couleur rouge

Quand les ions 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)

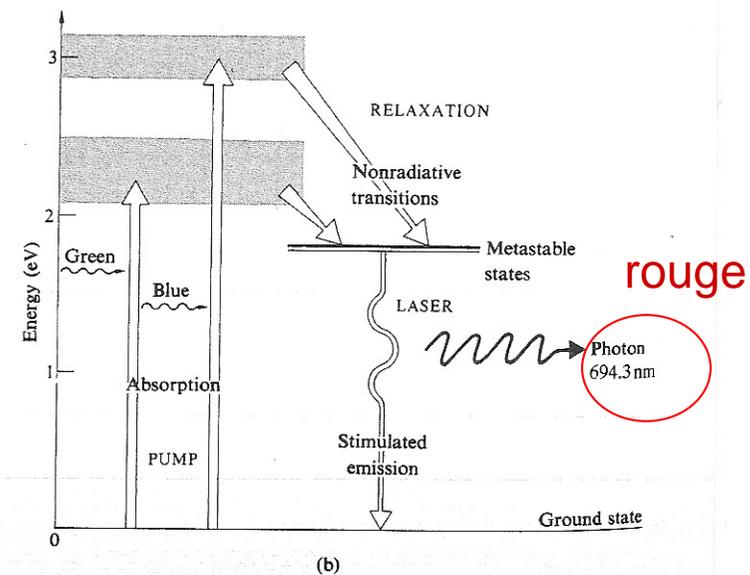


Figure 13.7 Ruby-laser energy levels.

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



• 'Q-switch'

• Durée des pulses :

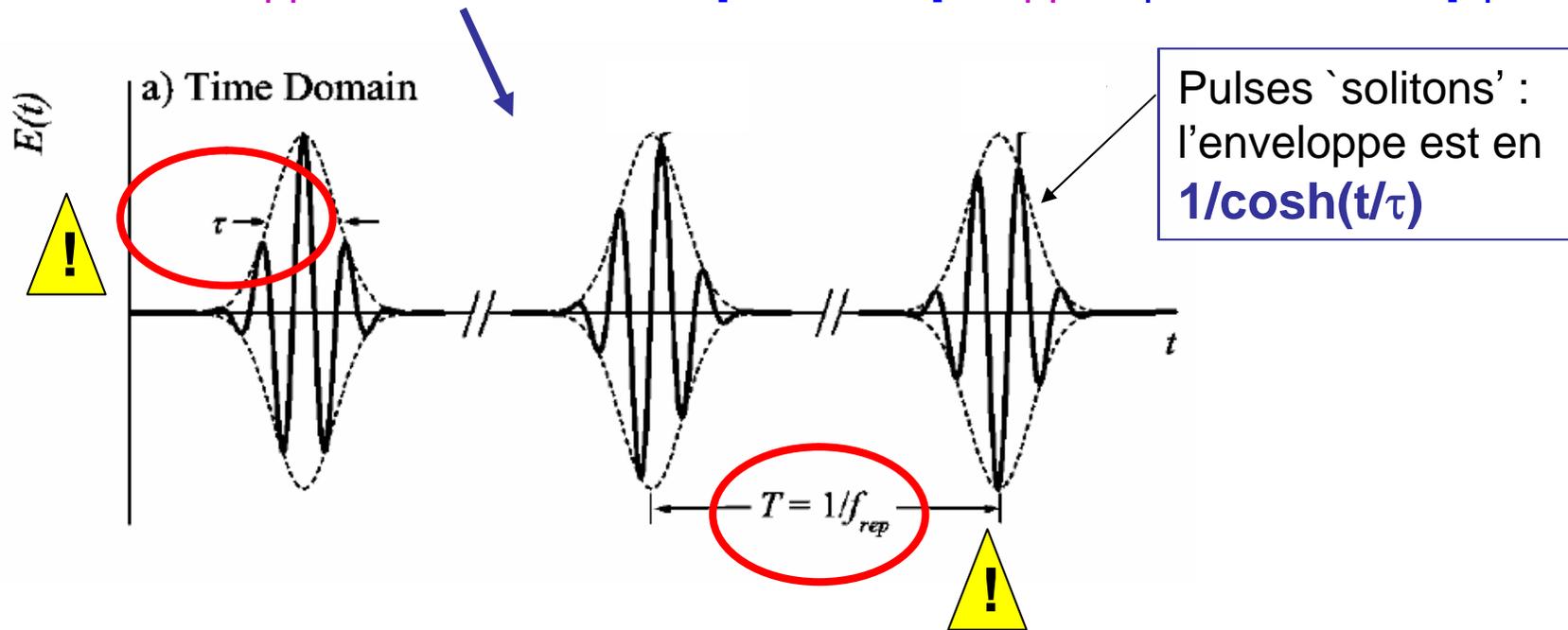
~ nano seconde [$1\text{ns} = 10^{-9}\text{s}$] et pulses ~ gaussiens



• 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)

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

$P_{\text{crête}} = E/\tau$ (en Watts)

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

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

$P_{\text{crête}} = 100\text{ MégaW !!!}$

Avantage de pulses courts pour la chirurgie ou l'usinage

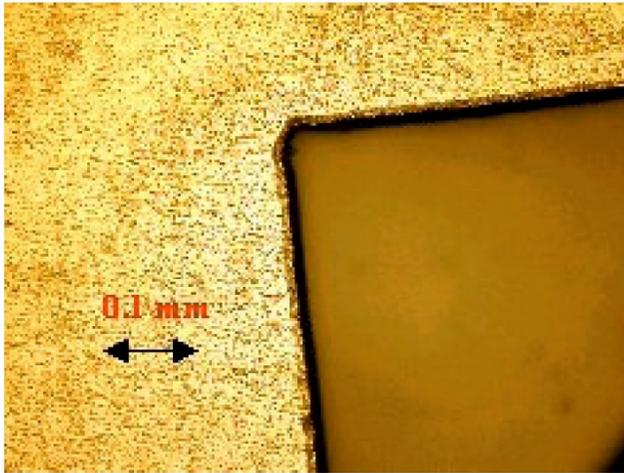


Figure 4a : Exemple d'usinage femtoseconde de l'acier

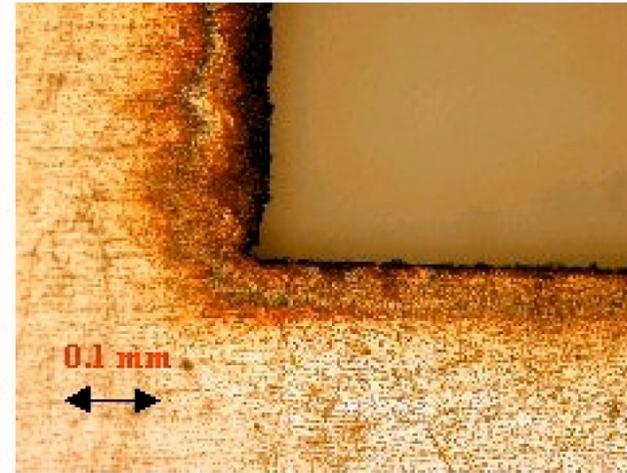


Figure 4b : Exemple d'usinage nanoseconde

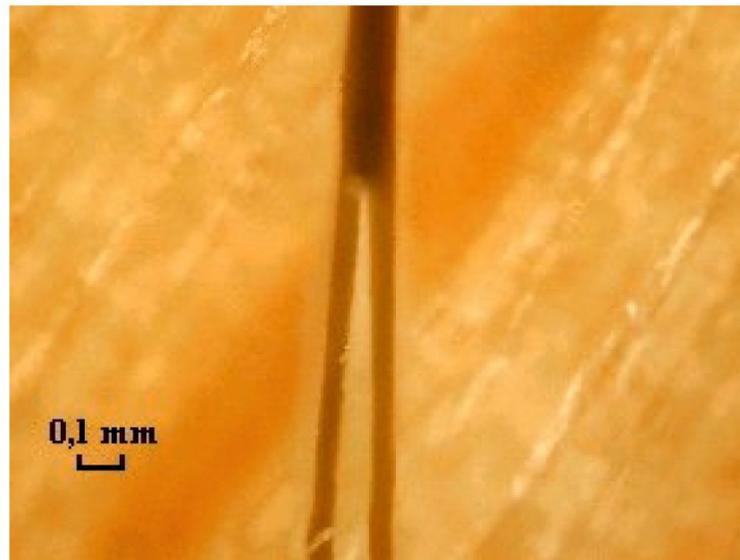


Figure 2 : face d'un échantillon de hêtre avec 2 sillons débouchants formant un angle de 3° .

(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)

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

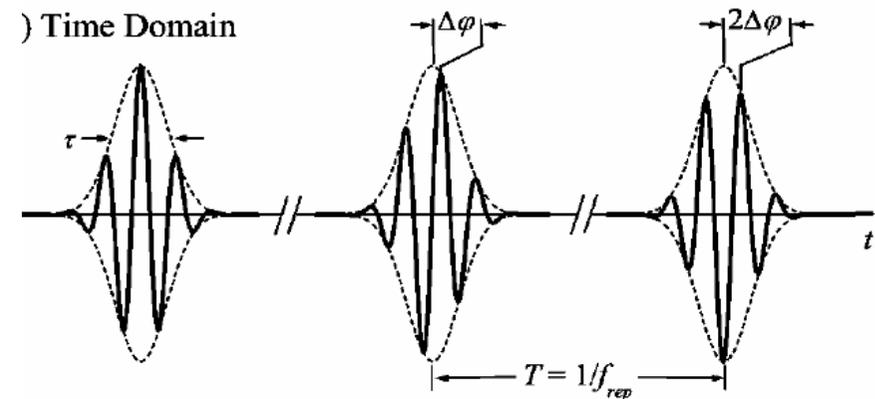
• **Techniques de stabilisation**

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

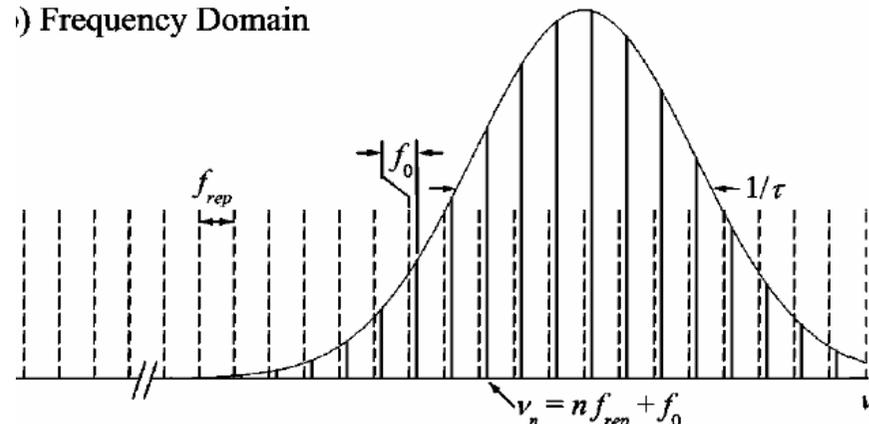
$$\Delta\nu \sim 25\text{mHz} \Rightarrow \Delta\nu/\nu \sim 10^{-16} \text{!!!!!!!!!!!!}$$

Mode pulsé : **peigne de fréquences**

(cf. prix Nobel 2005 : T. Hansh)



) Frequency Domain

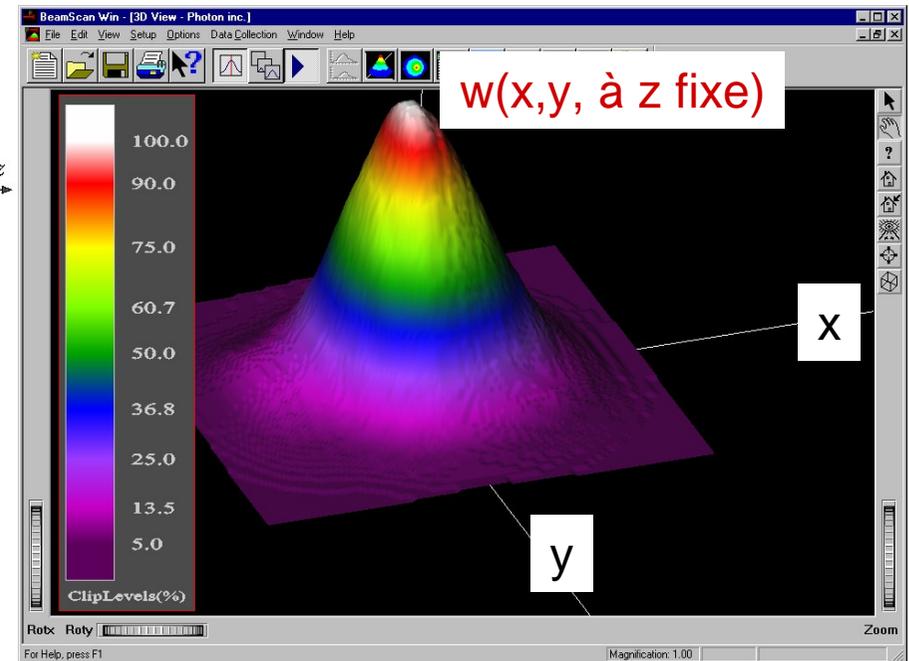
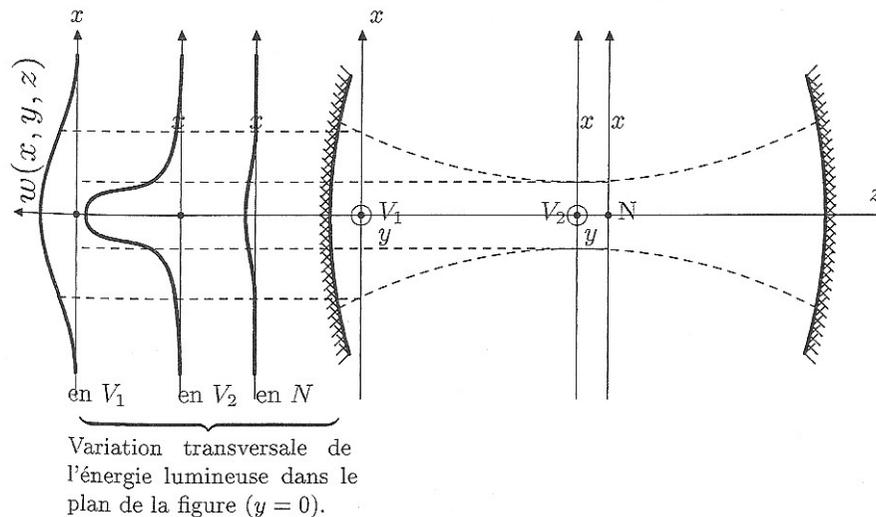


Forme de l'intensité des faisceaux lasers = modes transverses (elle est la même pour les modes pulsés et continus)

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 :

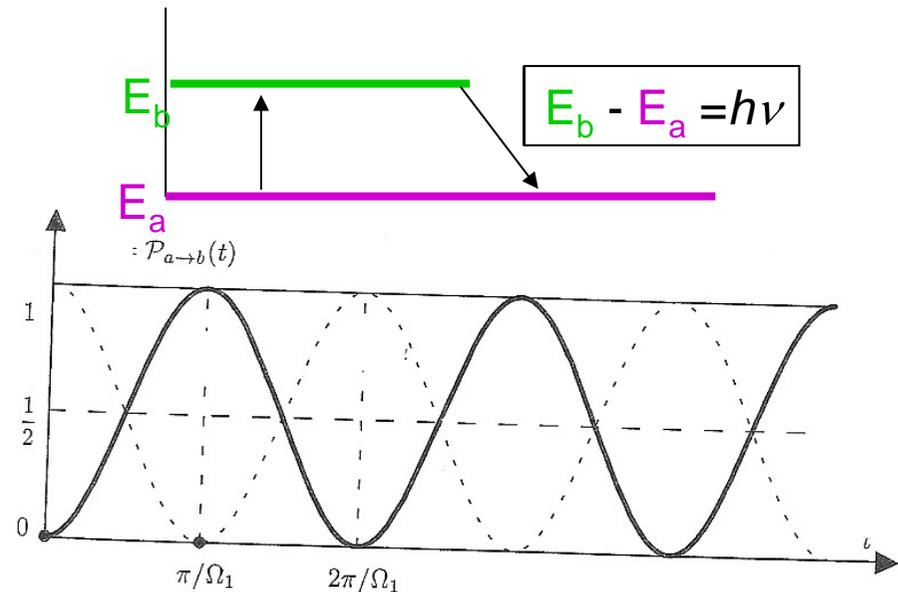
- un atome à 2 niveaux + une onde elm de fréquence ν

- 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 Ω proportionnelle à l'amplitude du champ

Une onde elm de fréquence ν 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 ν **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.

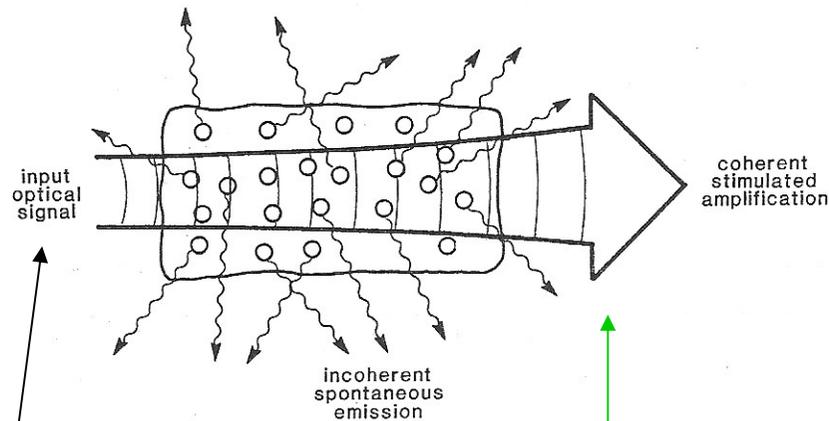
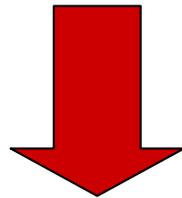
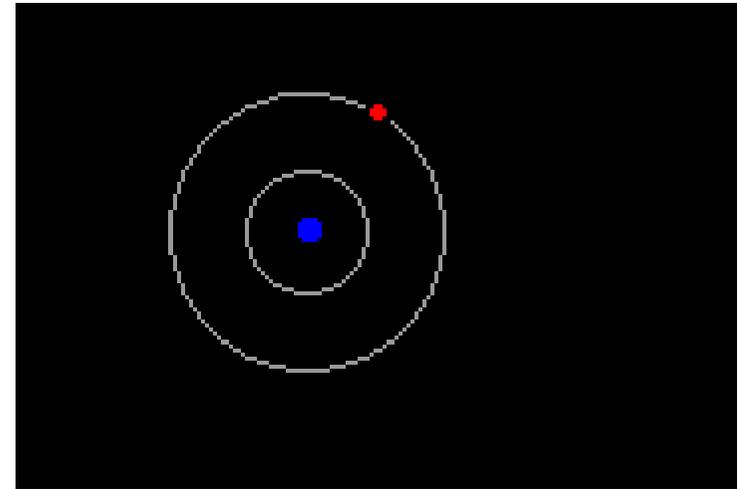


Notion hyper importante : l'émission stimulée

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

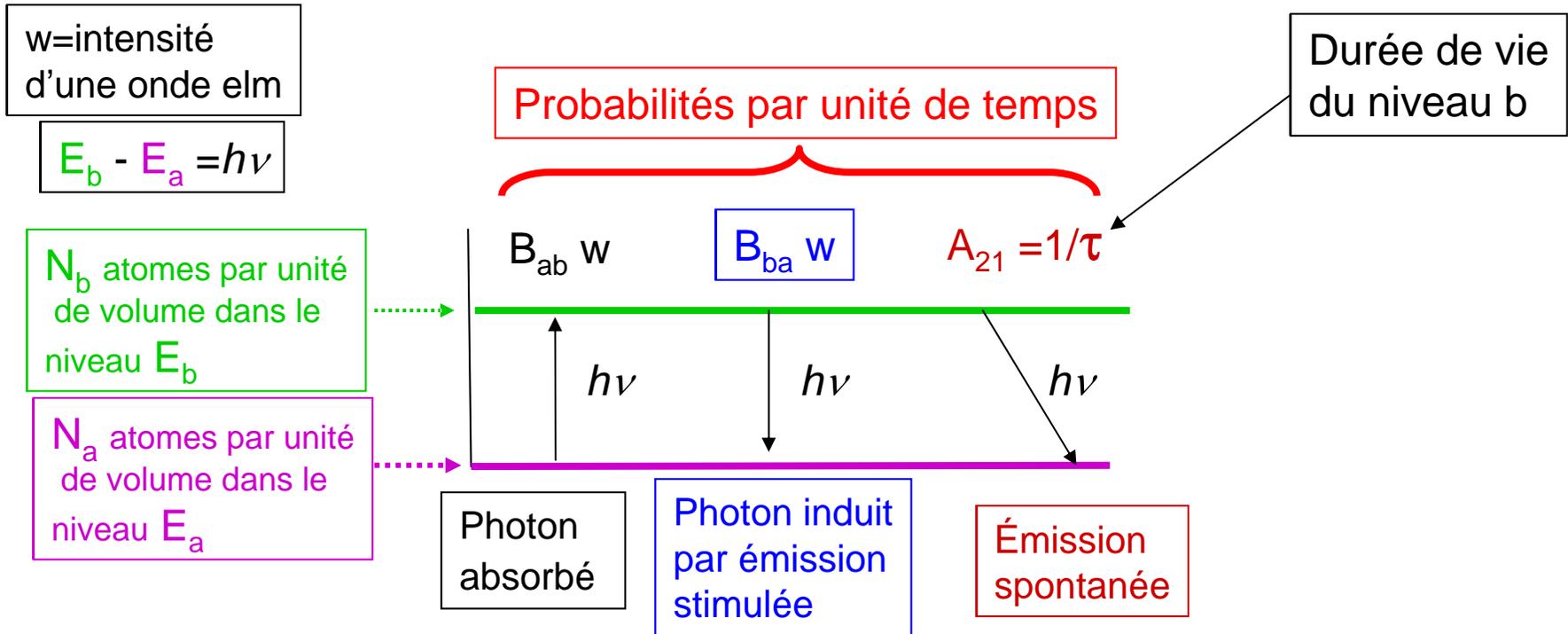
MAIS pour calculer la puissance en sortie, il faut prendre en compte l'émission spontanée

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



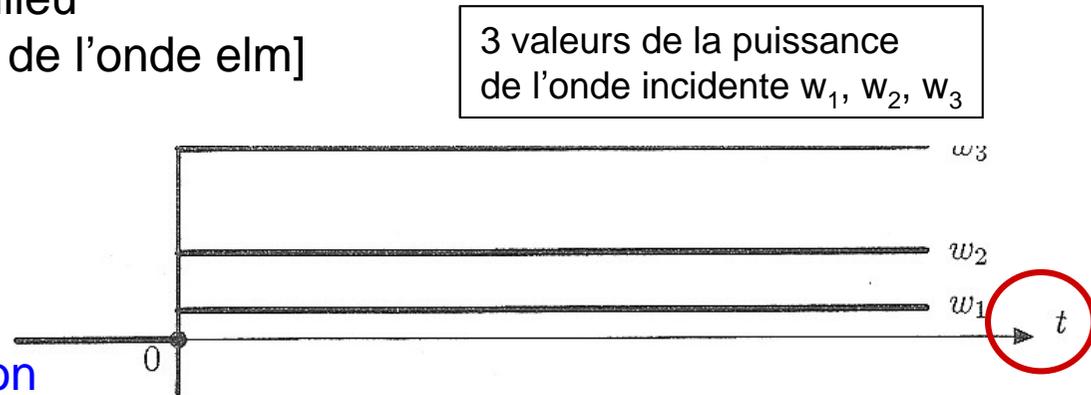
$$\begin{cases} \frac{dN_b(t)}{dt} = -A_{ba} N_b(t) - B_{ba} w N_b(t) + B_{ab} w N_a(t) \\ \frac{dN_a(t)}{dt} = +A_{ba} N_b(t) + B_{ba} w N_b(t) - B_{ab} w N_a(t) \end{cases}$$

[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

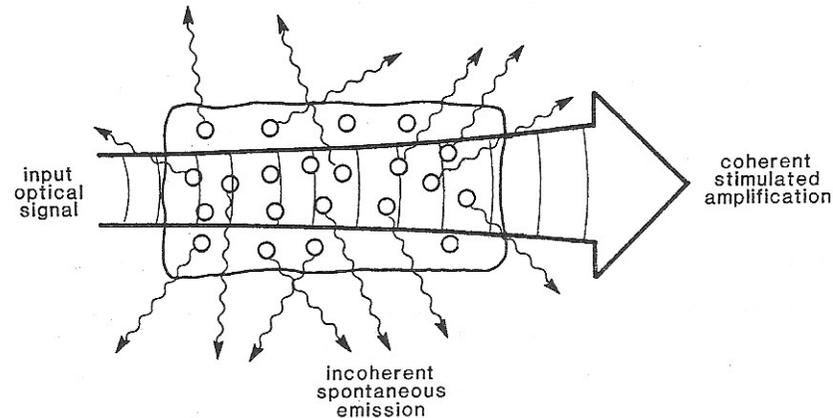
$$D(t) = N_b(t) - N_a(t)$$

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... :

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

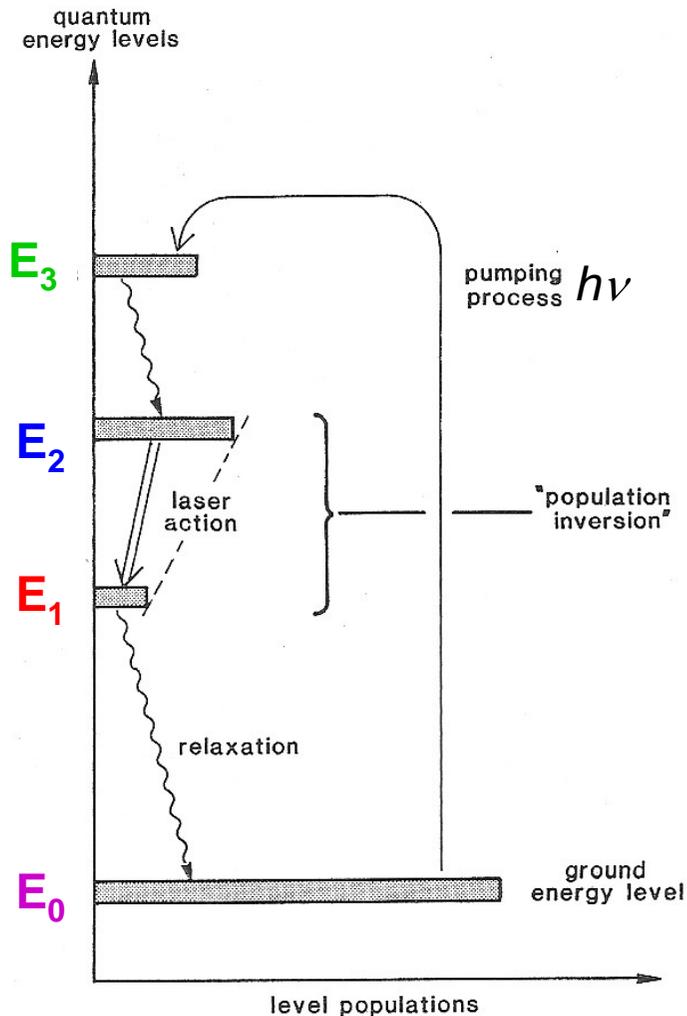
Variation de la puissance le long de l'axe de propagation z

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**

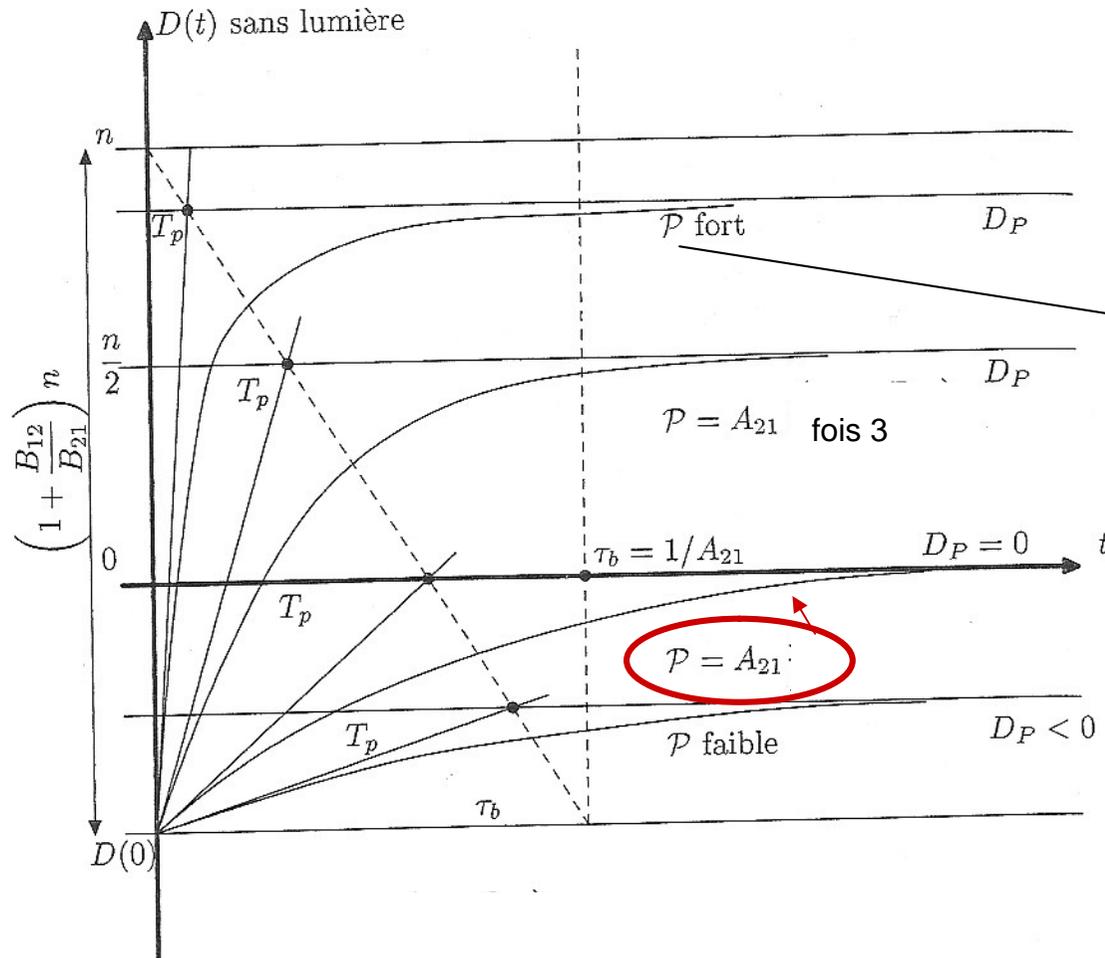
Note :

- **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_{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:

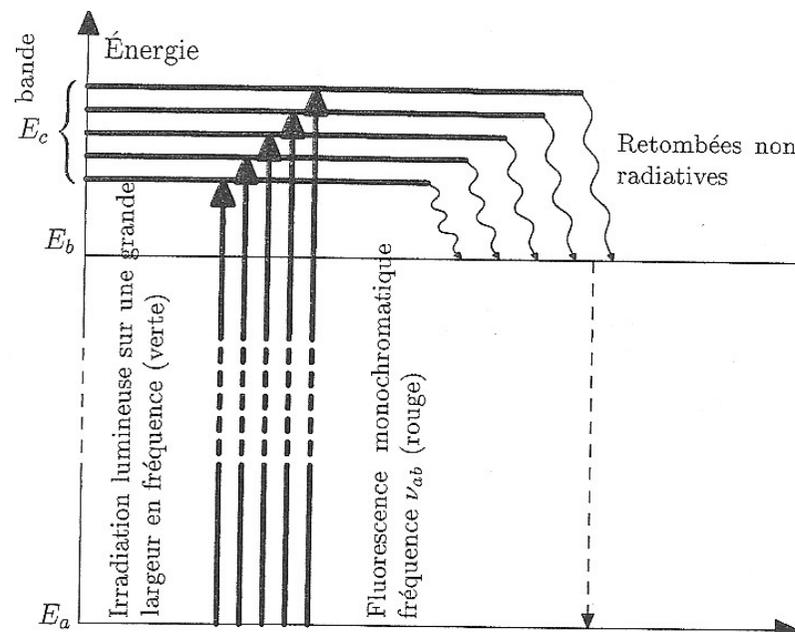


Facteur de pompage :
 Nb de transitions $0 \rightarrow 3$ par
 unité de temps induite
 par l'onde pompe
 [proportionnel à la puissance
 de l'onde pompe]

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

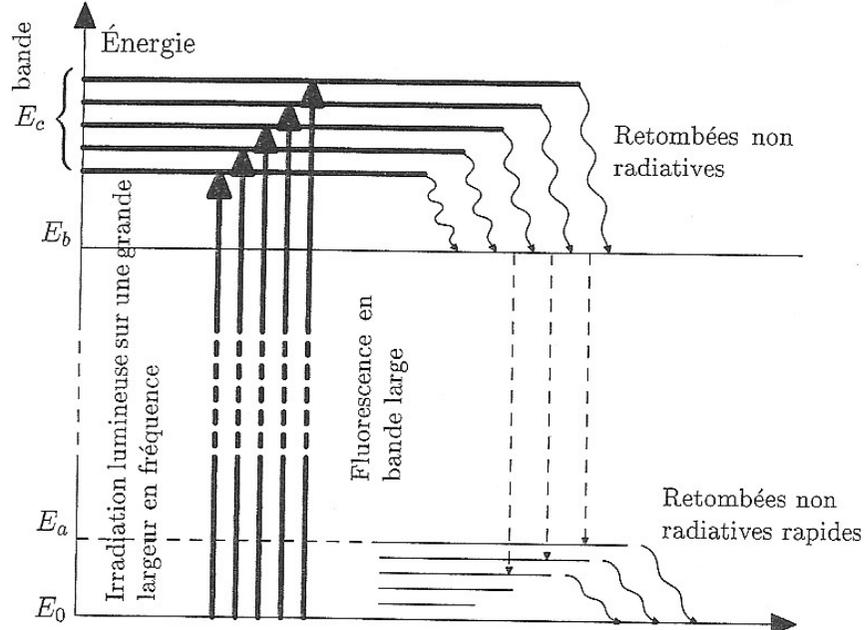
Exemple : système à 3 niveaux
Le rubis

(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

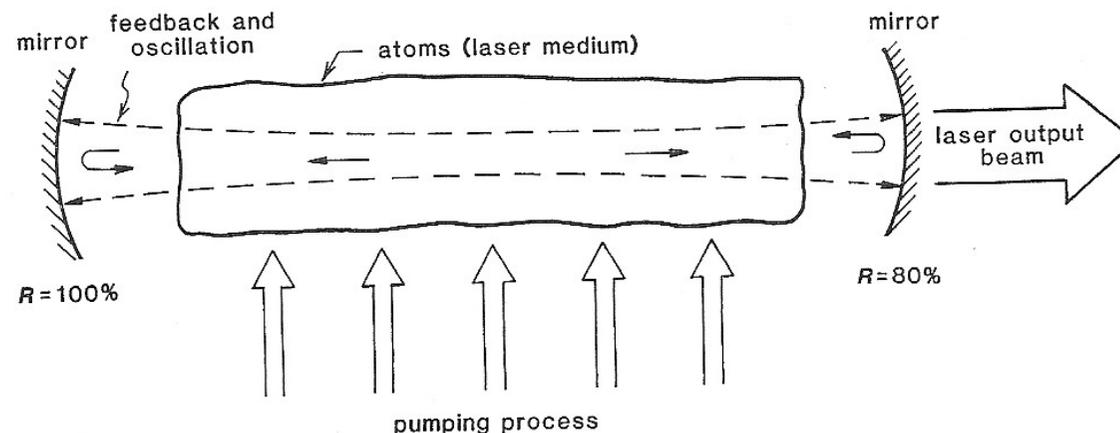
- **Comment obtenir un signal laser ?**

- 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.

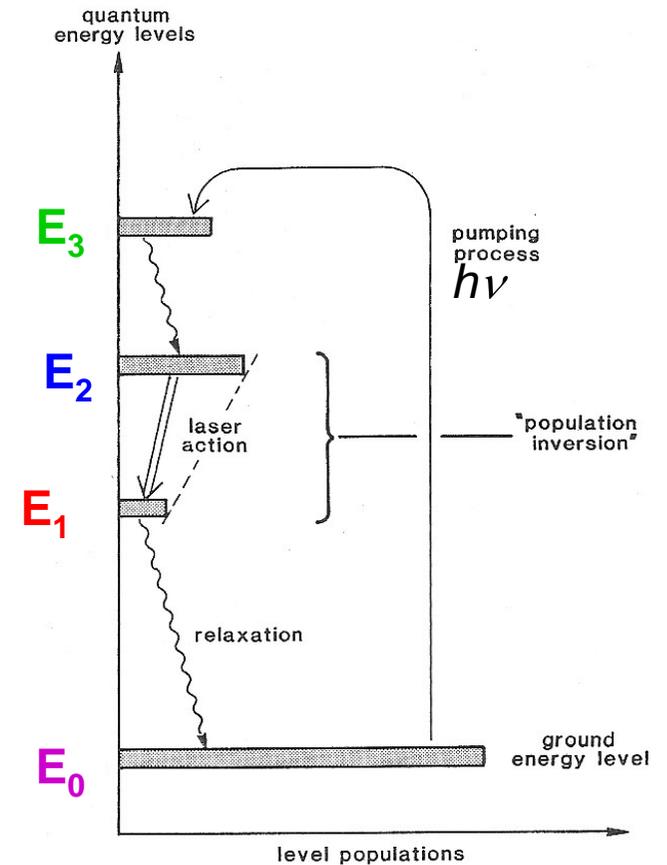
Modification des équations d'Einstein dans la cavité

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)



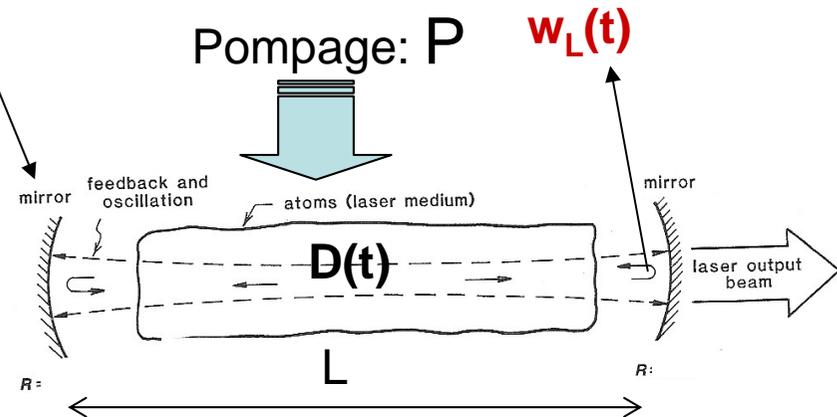
MAIS il faut une condition pour que l'onde laser soit amplifiée :

• 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 τ_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 τ_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 $w_L(t)=0$

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

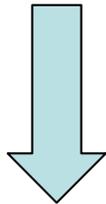
- $w_r \ll w_L(t)$ régime fort : l'émission stimulée dépeuple le niveau 2
→ contribution négative : $dD(t)/dt < 0$ → $D(t)$ diminue
- $w_r \gg w_L(t)$ régime faible : Pompage efficace car $dD(t)/dt > 0$

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

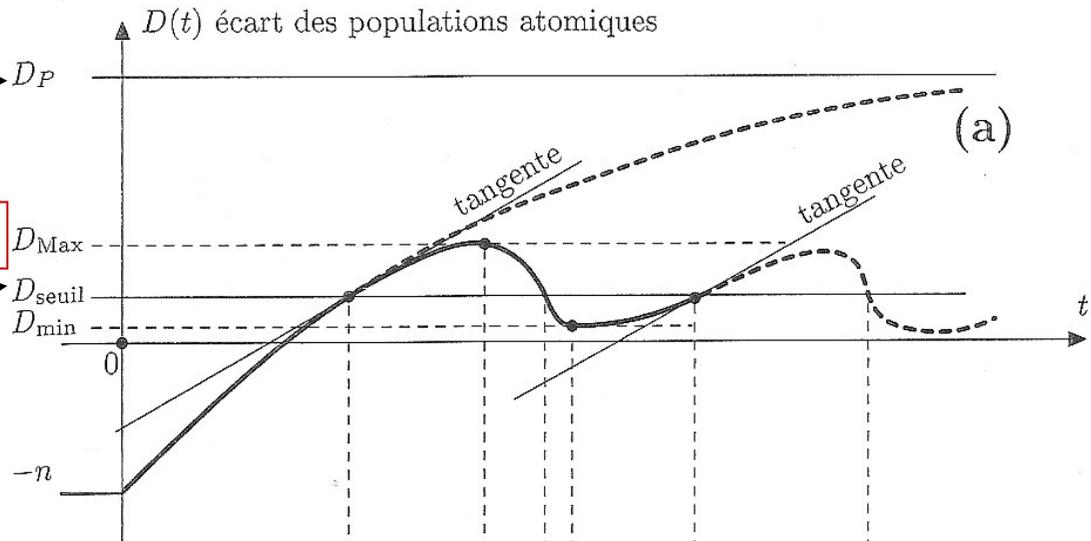
Valeur que l'on atteindrait s'il n'y avait pas de cavité (= si on avait $w_L=0$)

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

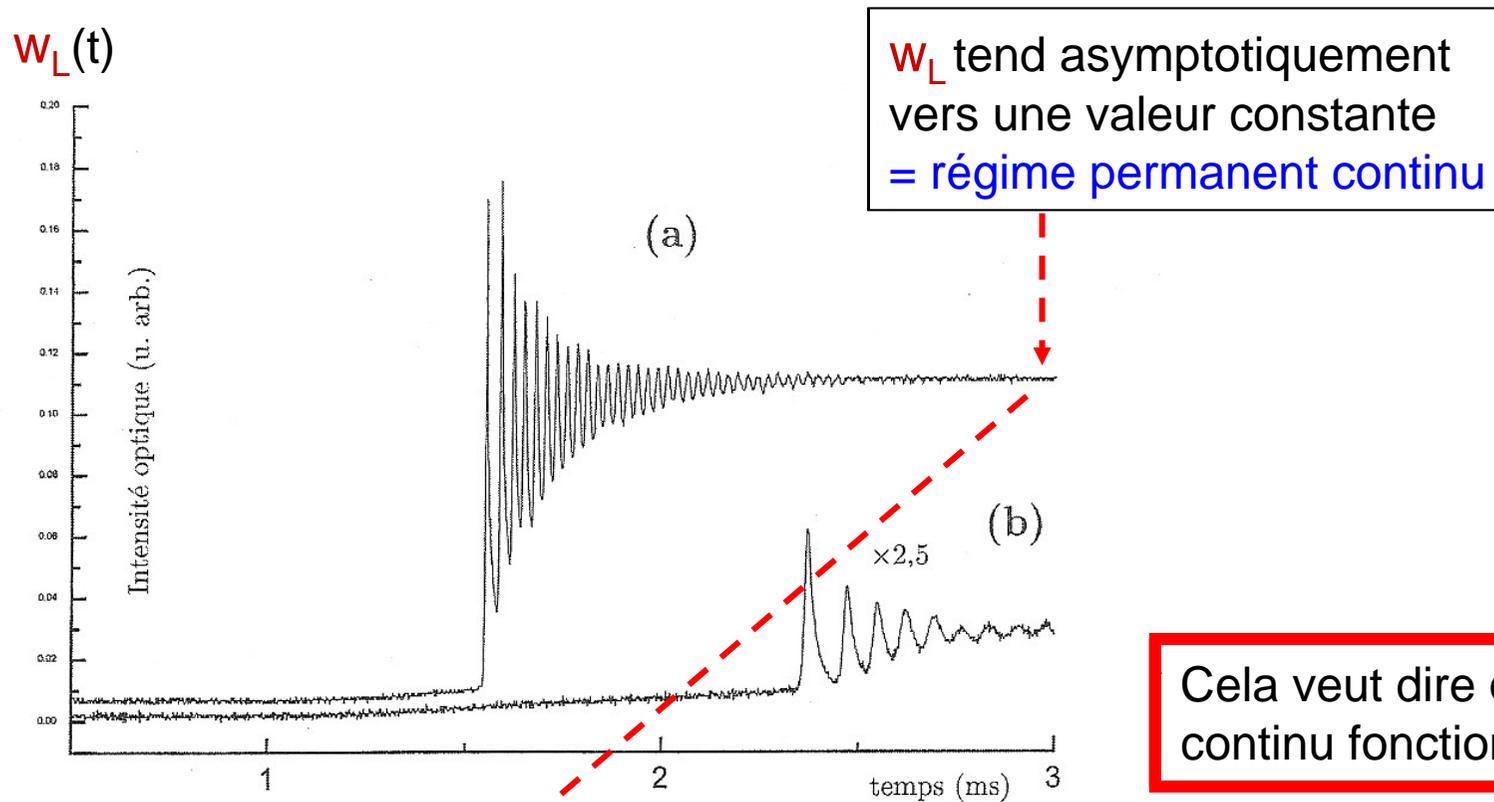
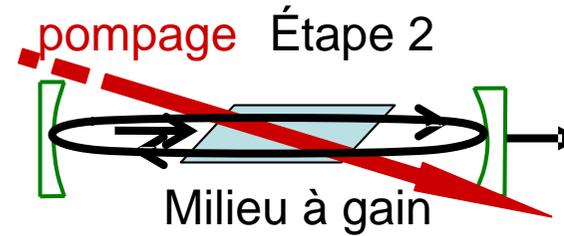
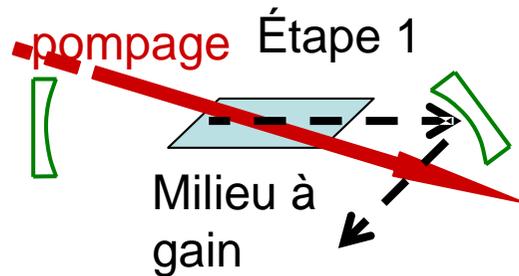


FIG. 11.2 - Démarrage d'un laser à fibre dopée au Nd^{+++} ; (a) pompage fort

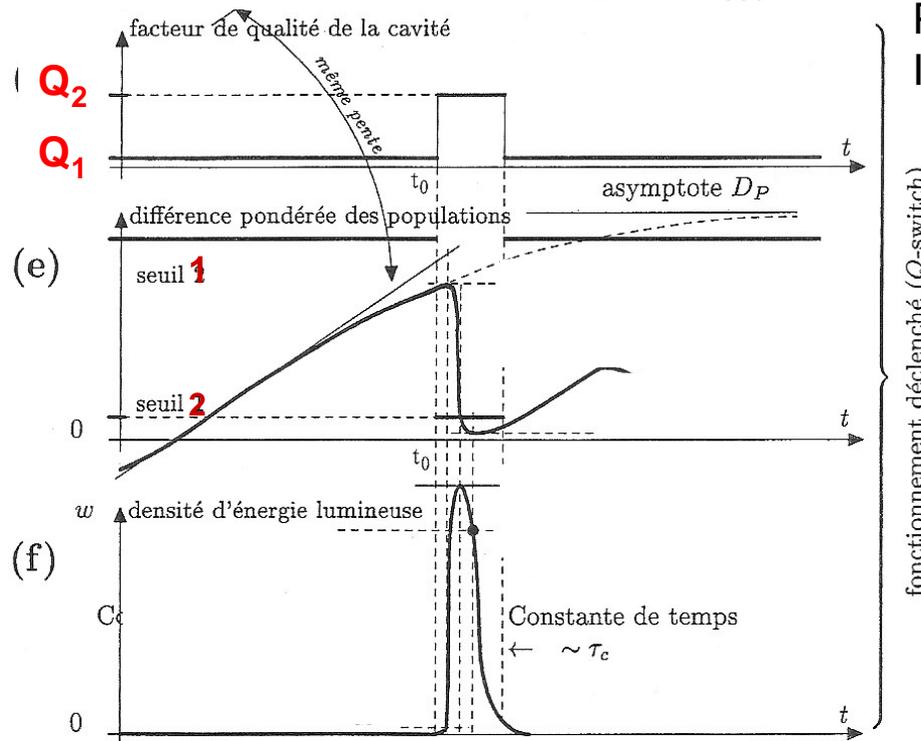
$$\left\{ w_L(t) = \text{constante} \Rightarrow \frac{dw_L(t)}{dt} = \left(\frac{D(t)}{D_{seuil}} - 1 \right) \frac{1}{\tau_c} w_L(t) = 0 \Rightarrow D(t) = D_{seuil} \right.$$

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

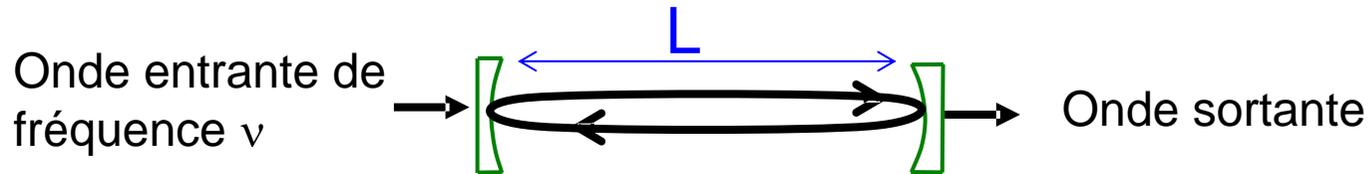


Évidemment, il y a des méthodes plus rapides qu'un tilt de miroir pour basculer de Q_1 à Q_2 !
 \Rightarrow modulateur électrooptique
 \Rightarrow On obtient des pulses de l'ordre de la nanoseconde au minimum

Laser pulsés : le blocage de modes

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

Retour aux cavités :



Résonance dans la cavité

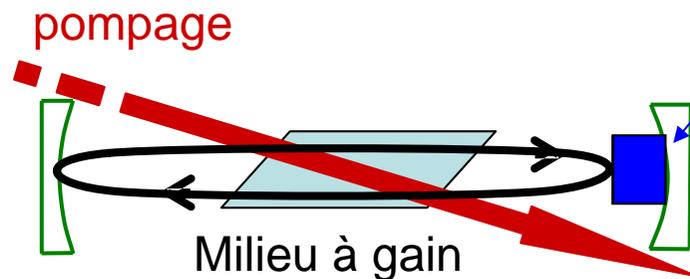
[=interférence constructive entre l'onde entrante et l'onde qui circule à l'intérieur]

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

Donc, dans le cas du laser, seules les fréquences ν_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 !



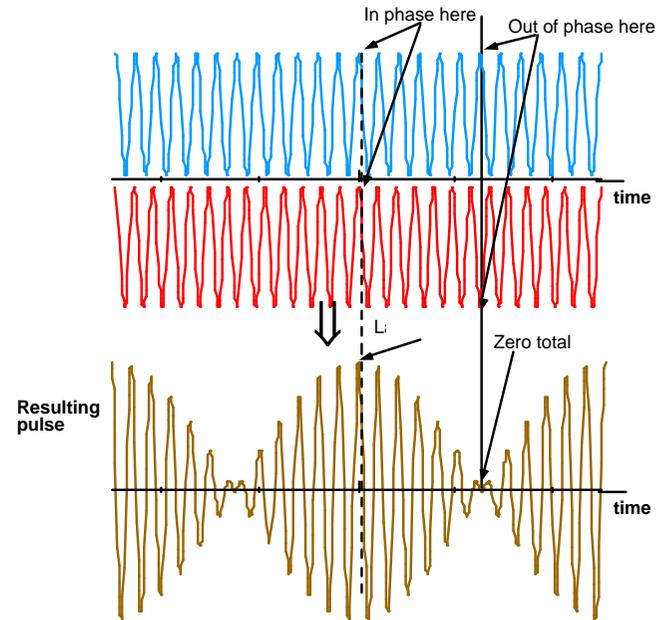
Absorbeur saturable qui ne transmet le faisceau que si l'énergie du pulse est très grande = si beaucoup de modes oscillent en phase

Comment cette superposition apparaît-elle ?

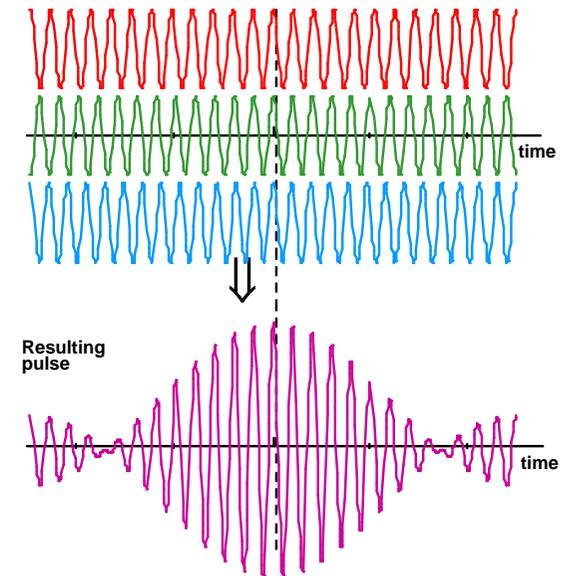
A partir du bruit !!!!!

Exemples de superpositions de modes longitudinaux

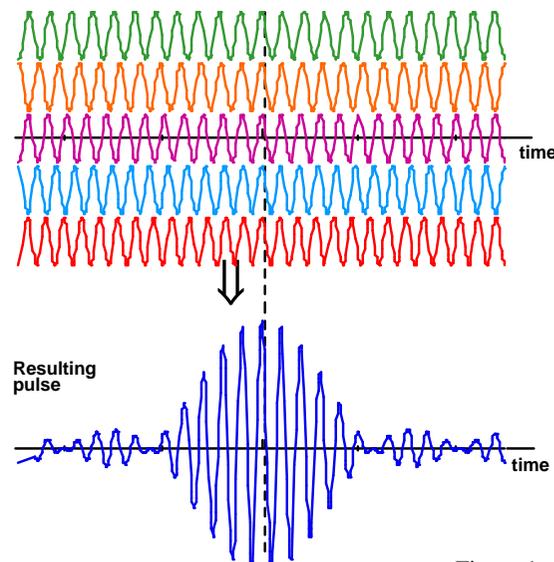
SUM OF 2 FREQUENCY COMPONENTS



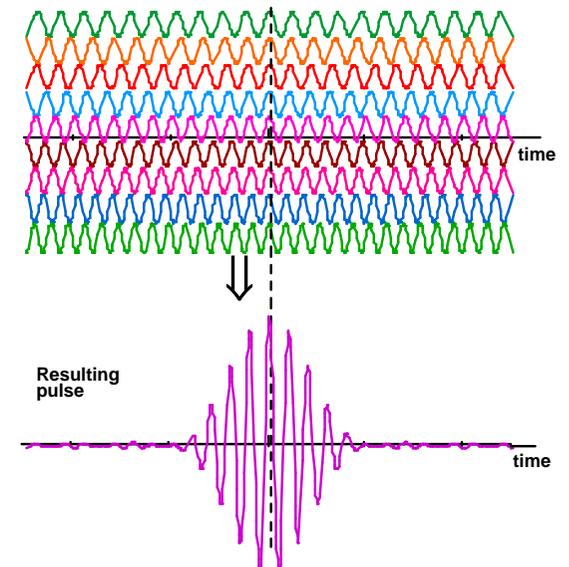
SUM OF 3 FREQUENCY COMPONENTS



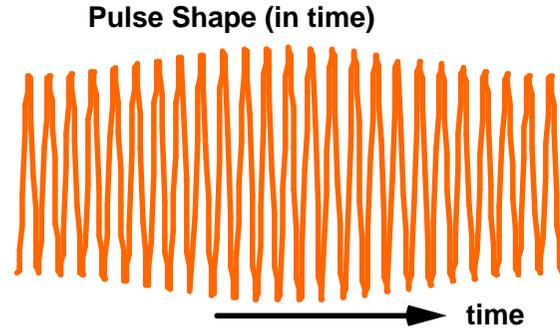
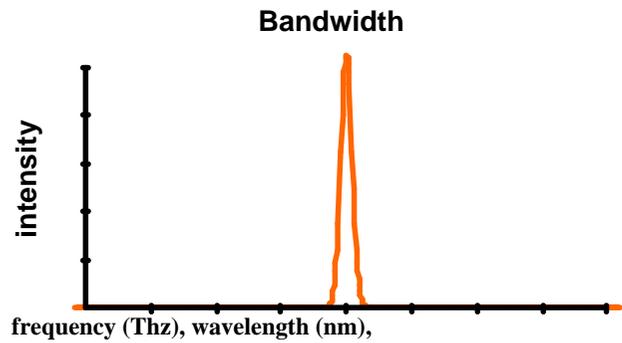
SUM OF 5 FREQUENCY COMPONENTS



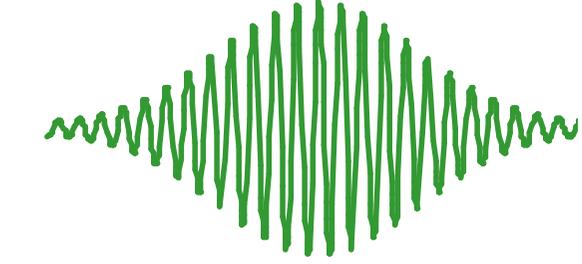
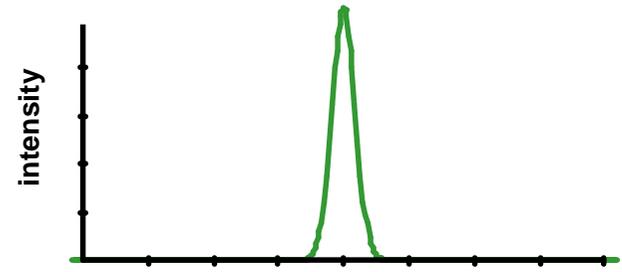
SUM OF 9 FREQUENCY COMPONENTS



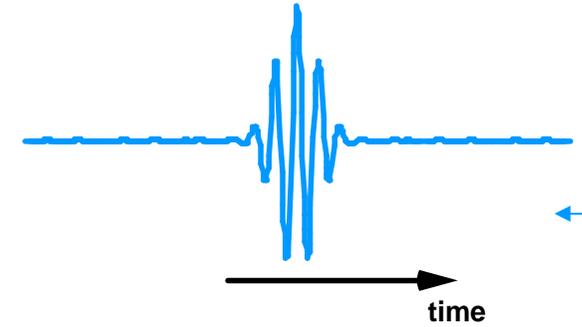
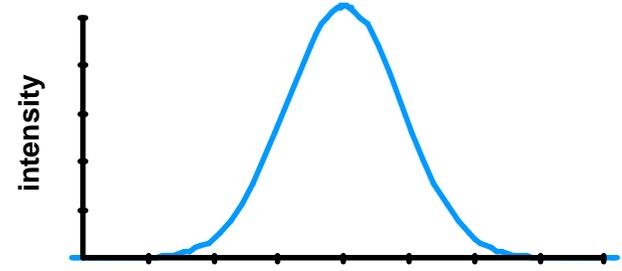
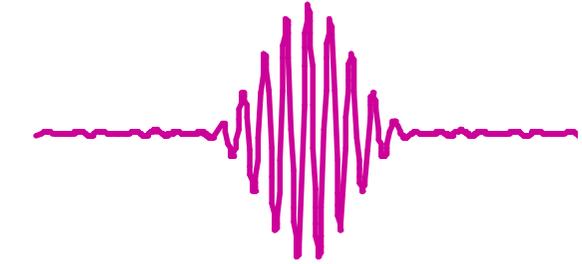
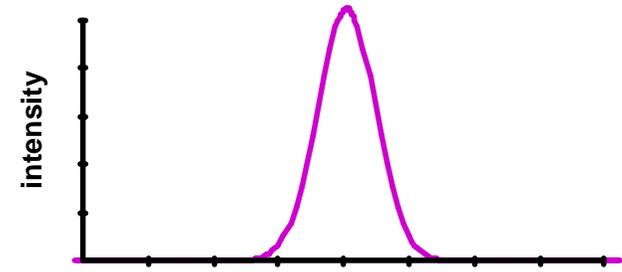
RELATIONSHIP BETWEEN BANDWIDTH AND PULSELENGTH



Laser continu



Laser pulsé

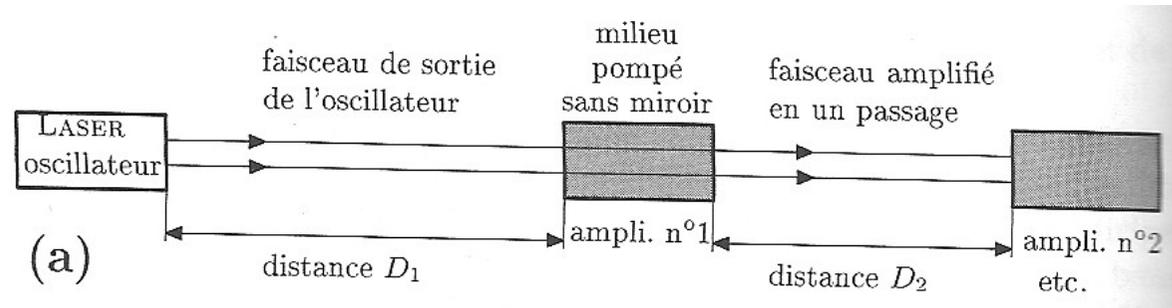


Superposition d'un très grand nombre de modes

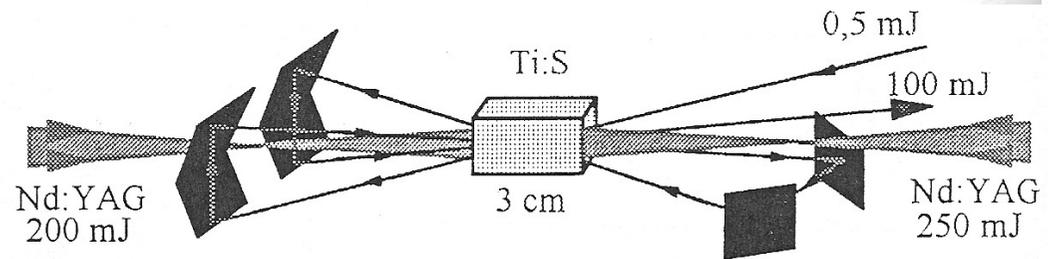
Axe des fréquences ou des longueurs d'ondes

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



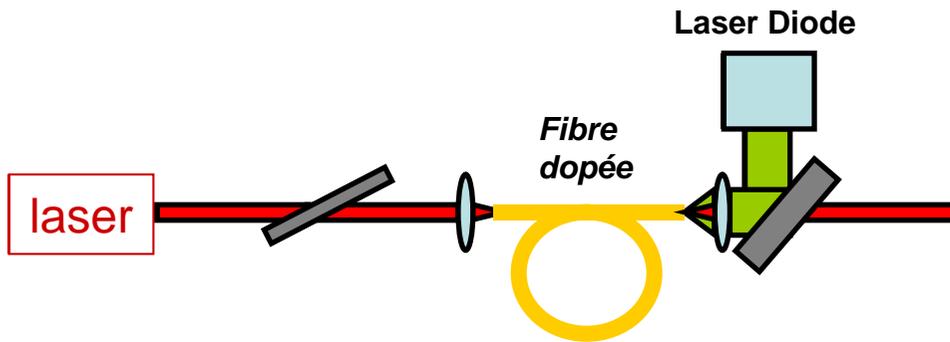
On amplifie des faisceaux pulsés à des niveaux extrêmes (cf. laser MégaJoule !)
MAIS on doit limiter la cadence à cause des **effets thermiques**, il faut laisser refroidir les milieux à gain...

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)

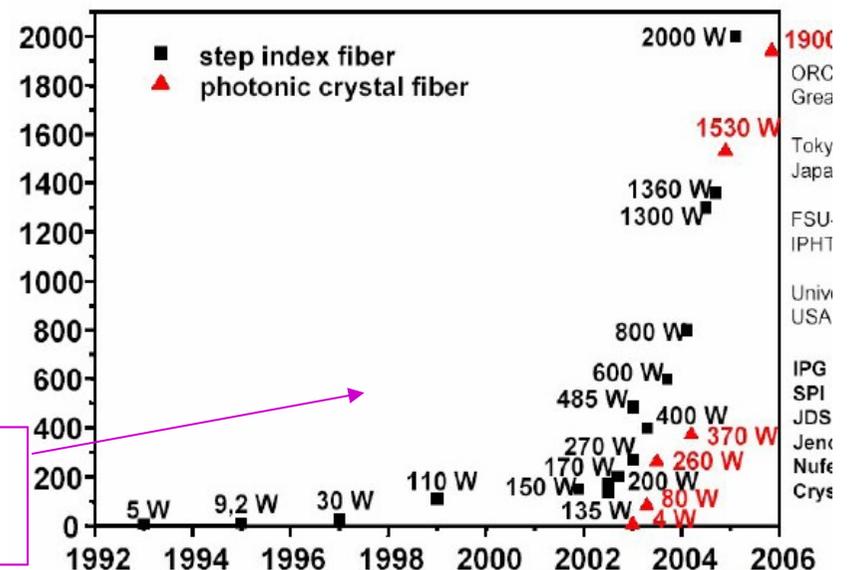


Fibre dopée et pompée :

- 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

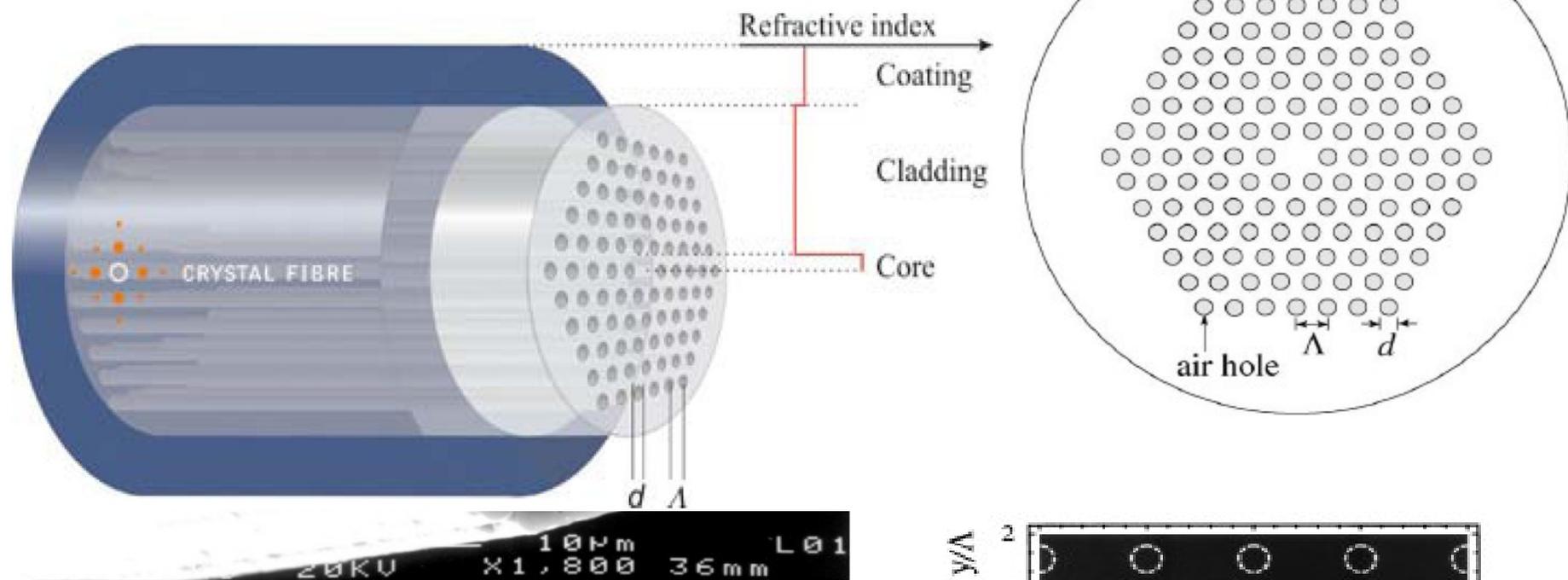


Fig. 1. Scanning electron micrograph of the photonic crystal fiber.

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

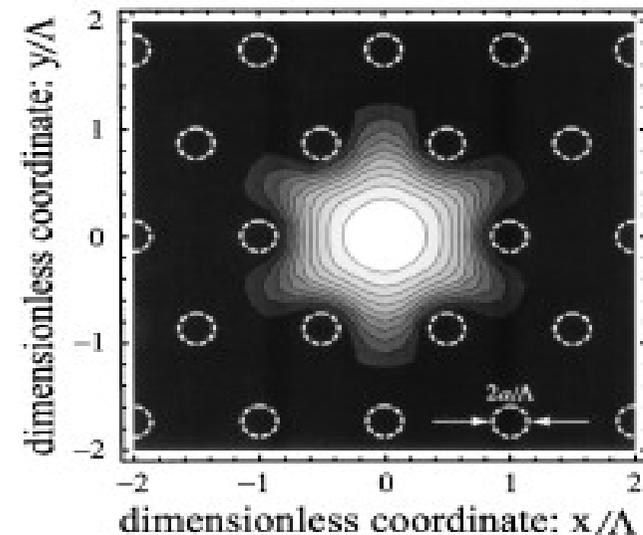
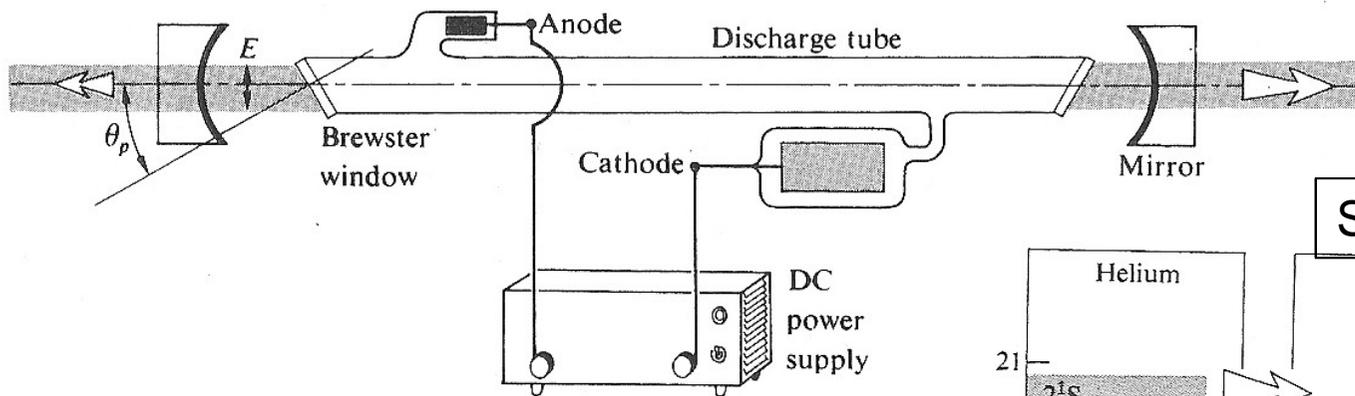


Fig. 2. Transverse intensity distribution for the x-polarized guided mode of the photonic crystal fiber described in Fig. 1 for $\lambda = 632.8 \text{ nm}$.

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

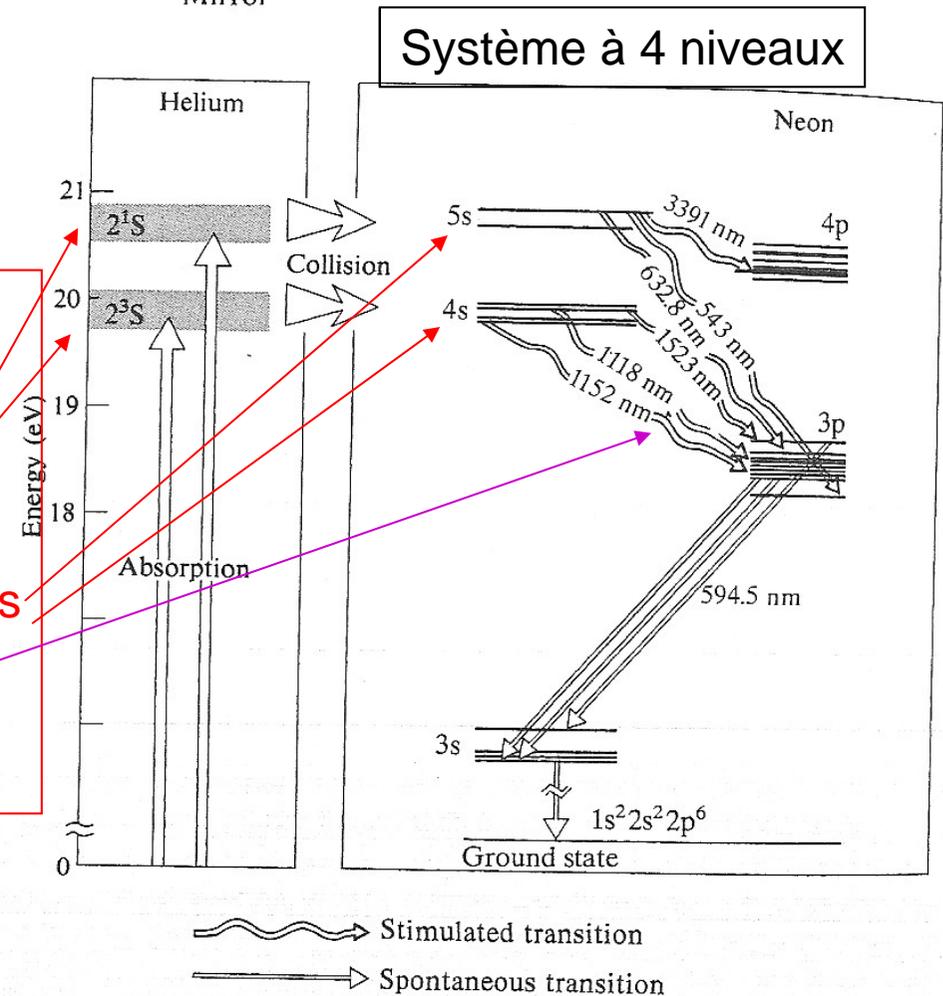
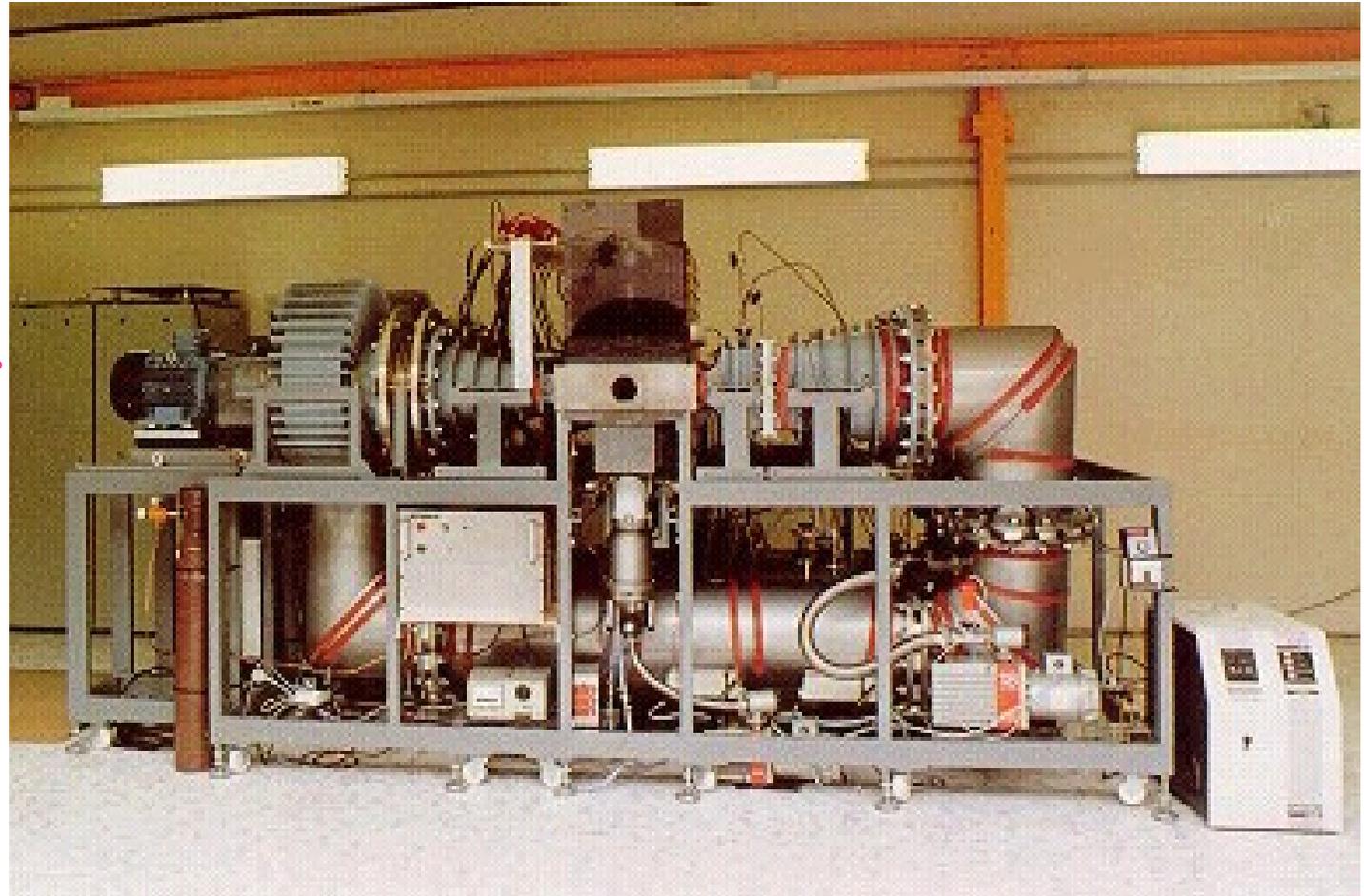


Figure 13.17 He-Ne laser energy levels.

Le (plus gros ?) laser à gaz commercial

laser
convertible
to CO_2
[→BNL]



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

SOPRA

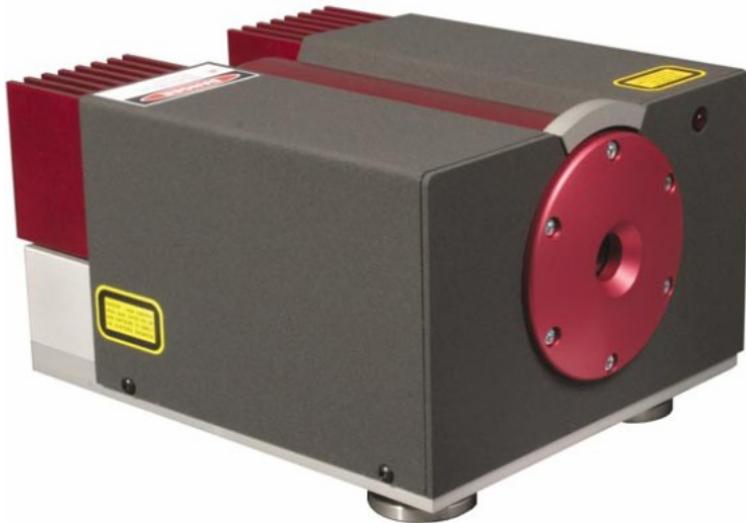
France

Hyper stable Nd:YAG laser

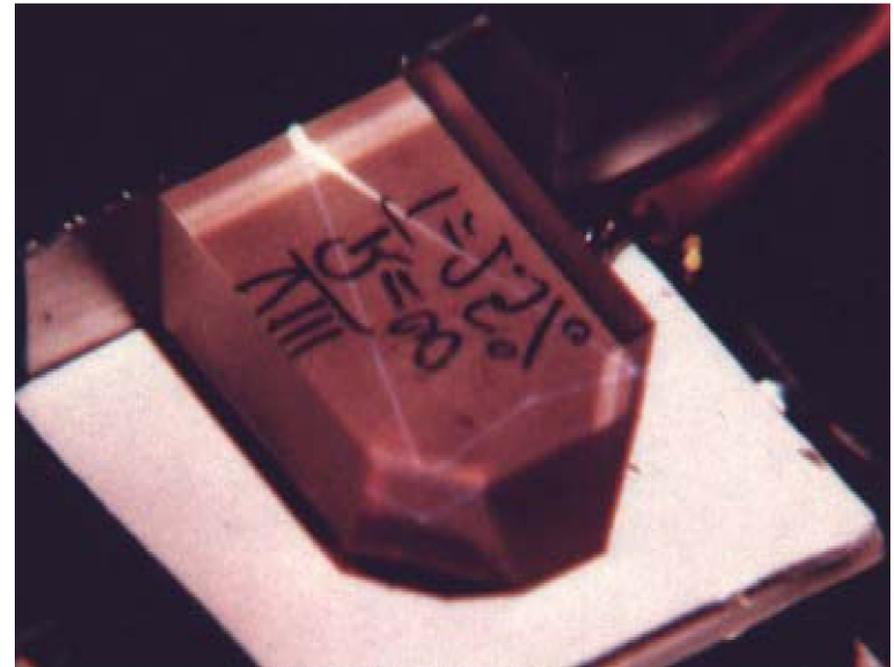


ULTRASTABLE, CW, SINGLE-FREQUENCY LASERS

▶ 946 nm ▶ 1064 nm ▶ 1319 nm

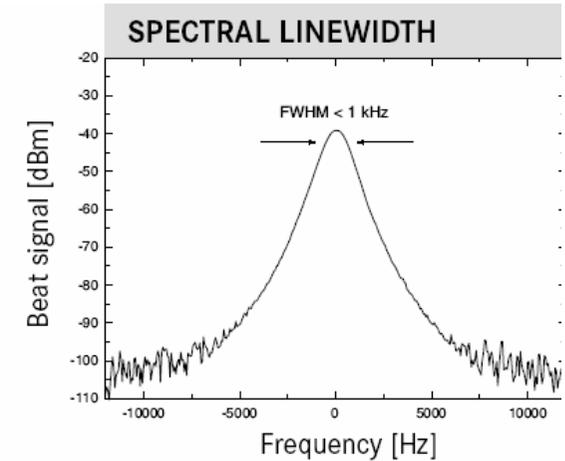


NPRO=Non-Planar-Ring-Laser



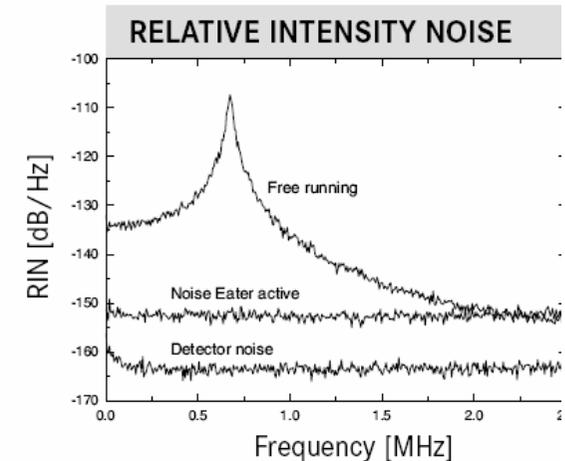
GENERAL FEATURES

- ▶ 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 ₀₀ ($M^2 \dagger < 1.1$) |
| 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 |



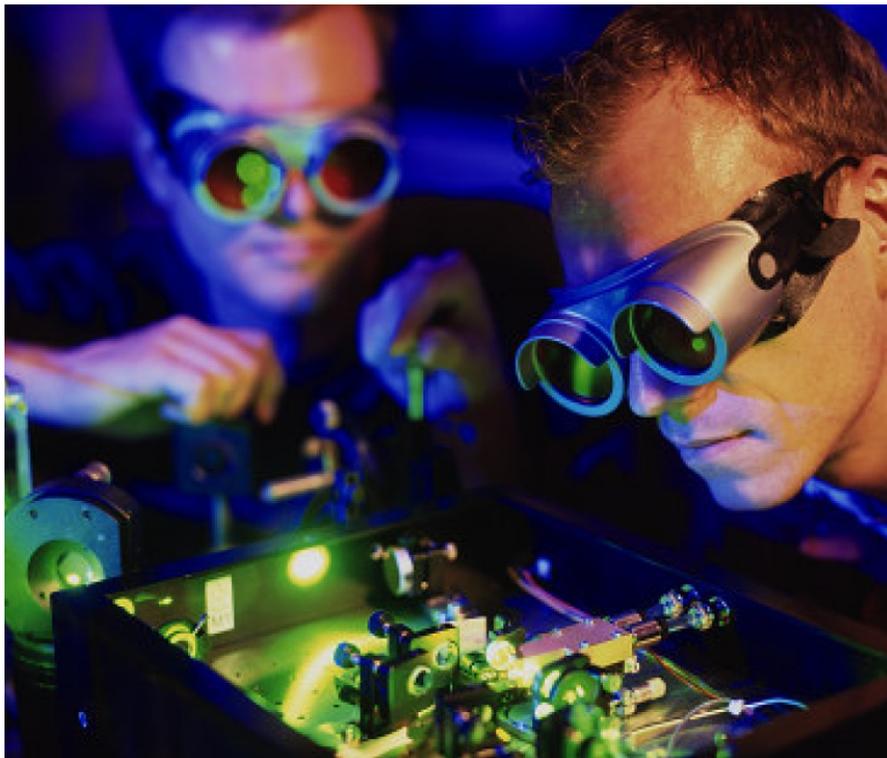
Un exemple de laser Q-switch commercial

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:YVO₄, 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 Specifications¹ | |
| Wavelength | 1064 nm |
| Pulse Repetition Rate ² | 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 ₀₀ |
| Beam Divergence | <6 mrad |
| Beam Diameter | 0.25 mm @ 1/e ² |
| Static Alignment Tolerances ⁴ | |
| Beam Position | ±0.2 mm |
| Fiber Length | ±2 mrad |

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



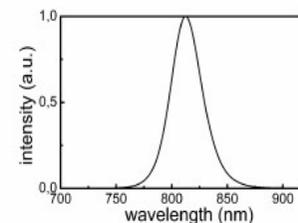
GIGAJET 30 femtosecond oscillator

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)

technical specifications/system requirements

(subject to change without notice)

| | |
|--|--|
| repetition rate | 3 GHz |
| pulse length | $\leq 30 \text{ fs}^{*1}$ |
| output power | 650 mW ^{*2} 1 nJ/pulse... |
| central wavelength | 810 nm ($\pm 10 \text{ nm}$) |
| beam quality | $M^2 \leq 1.2$ |
| dimensions | 320x200x107 mm ³ |
| *1 after appropriate extracavity compression (not provided) | |
| *2 @ 5.5 W pump power in a TEM ₀₀ mode pump beam of 532 nm wavelength (equivalent to a Coherent Verdi™) | |
| operating temp. | 21°C $\pm 5^\circ\text{C}$ |
| power requirements | no electrical power required |
| cooling water req. | flow 0.5 – 1.5 l/min. temp. $\sim 20^\circ\text{C}$, stable to $\pm 0.1^\circ\text{C}$ |

contact information

GIGAOPTICS GmbH
Blarenstraße 56
D-78462 Konstanz | Germany
phone +49 7531 368371
fax +49 7531 368372
e-mail: info@gigaoptics.com
<http://www.gigaoptics.com>

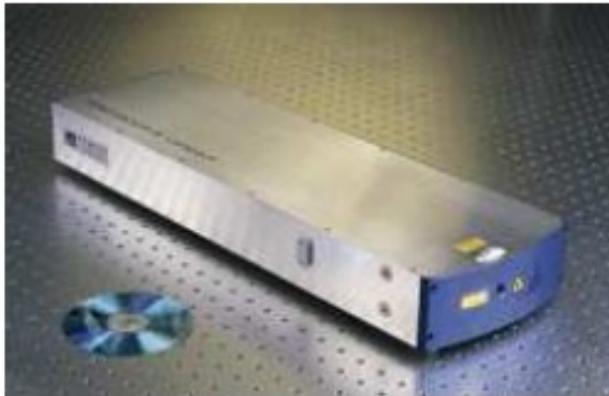
France OSYRIS
<http://www.osyris.com>

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

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

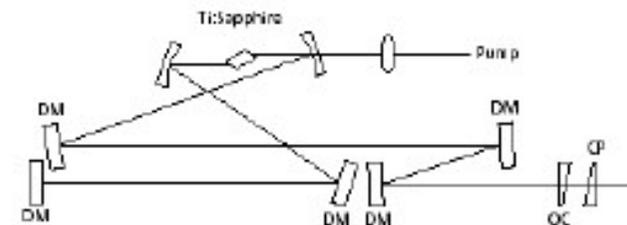
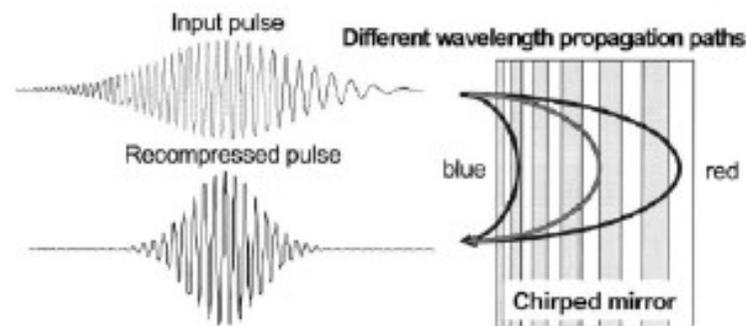
Un exemple de laser à bocage passif de modes commercial : les plus petites impulsions

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 μ J per pulse with 50 W output power
 Oscillator only, no amplifier
SESAM® Technology

Applications

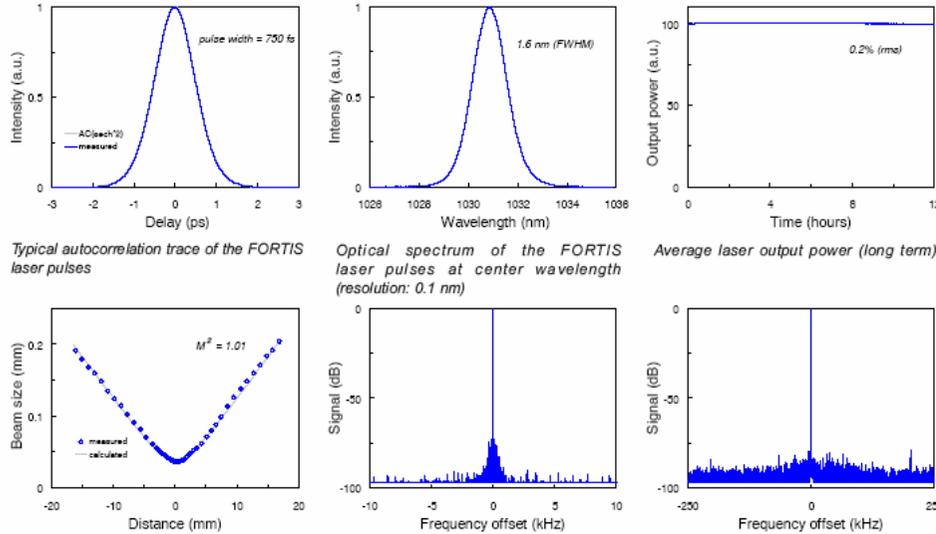
- Extremely high repetition rate material processing and micromachining
- Waveguide fabrication
- RGB pump source
- OPO pumping

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.

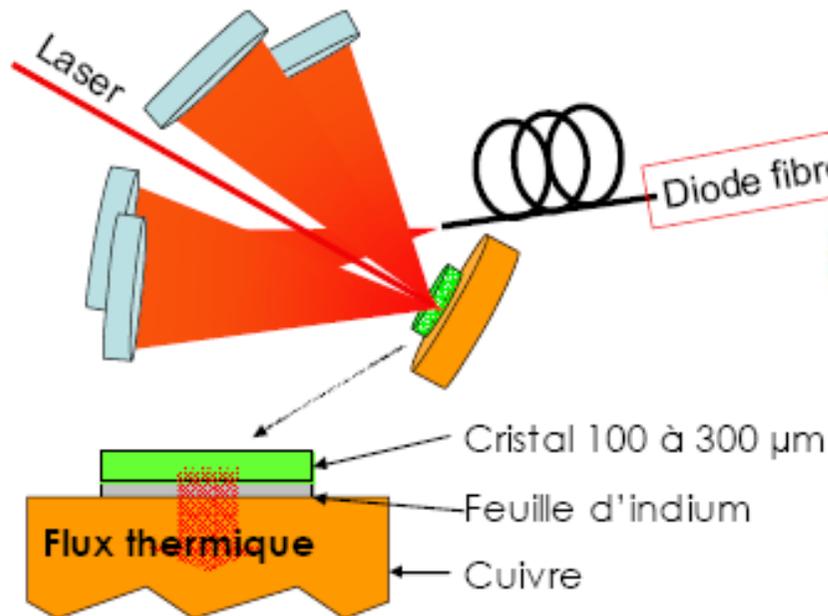
| Additional specifications | FORTIS |
|-----------------------------|---------------------------------|
| turn-on time | < 15 min |
| pointing stability | 25 μ rad / °C |
| power stability (>1kHz) | 0.1% rms |
| voltage | 100 VAC – 240 VAC |
| frequency | 50 Hz – 60 Hz |
| input power (single phase) | 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 μ J | per pulse |
| < 800 fs | pulse width |
| 1 MW | peak power |
| 1030 nm | wavelength |
| 1.1 | M^2 (TEM_{00}) |

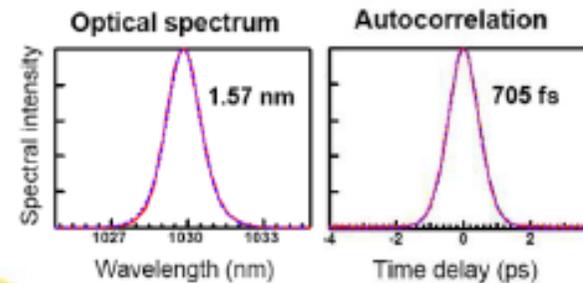
Made in Switzerland

- La technologie « thin disk »



Contact: technologie complexe

- Yb:YAG



Puissance 80 W

(370 W de pompe)

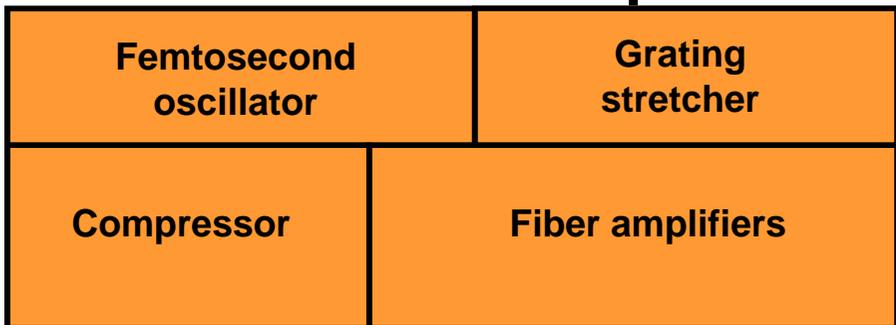
57 MHz, 1,4 μJ

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

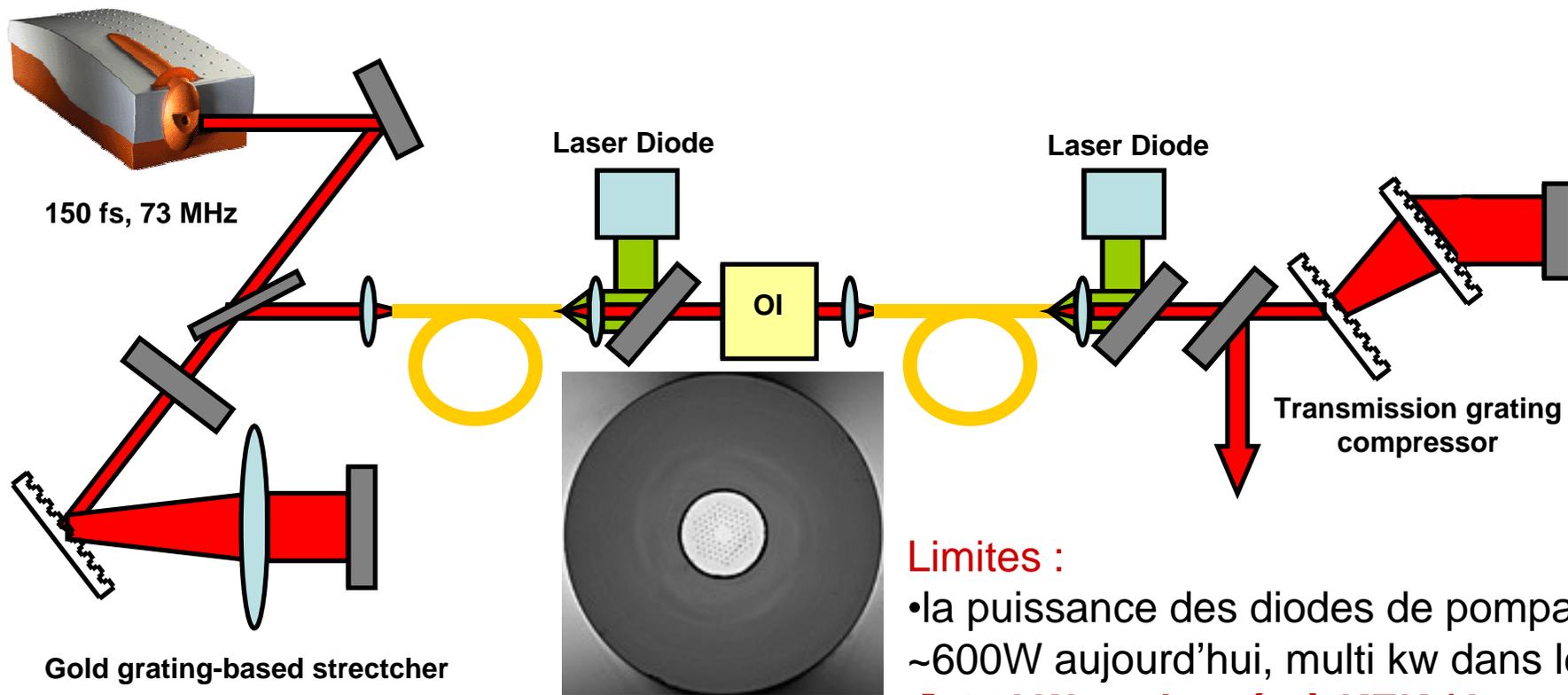
Efficacité \approx 2 %

Le record de puissance moyenne en mode pulsé

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



- 131 W average power
- 220 fs duration
- 1.8μJ 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.