

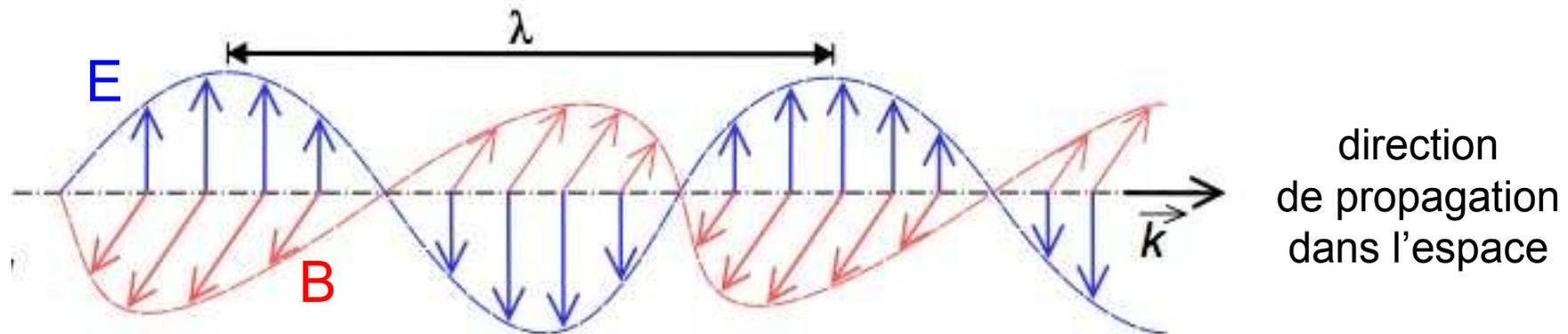
BASES PHYSIQUES DES SOURCES LASERS

Geneviève Bourg-Heckly

XXX^{ème} congrès de la SFLM 19 - 23 janvier 2011

Ne pouvant malheureusement pas être des
vôtres, je confie
ma présentation à mon ami Olivier
et souhaite à tous un excellent congrès 2011!

Nature de la lumière : onde électromagnétique



«photo» prise à un instant t

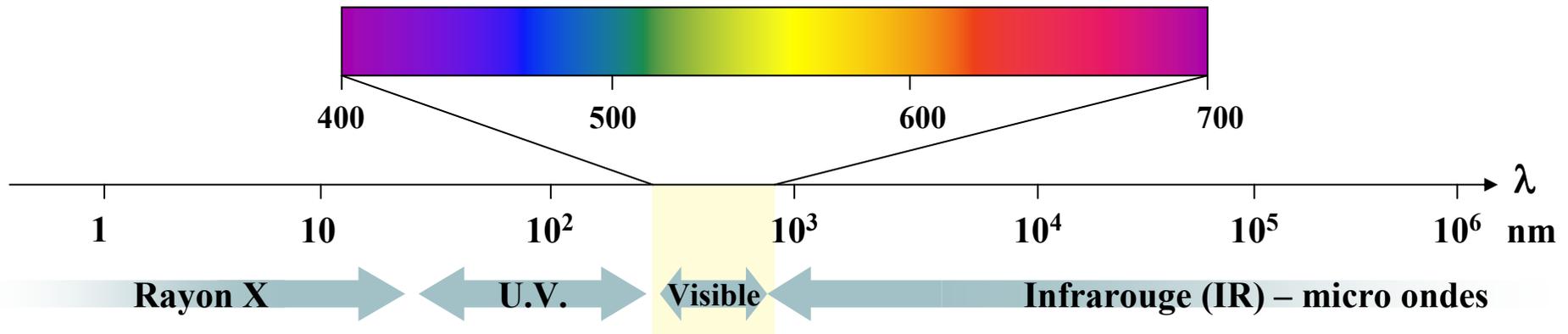
onde électromagnétique = $\left\{ \begin{array}{l} \text{un champ électrique } \mathbf{E} \\ \text{un champ magnétique } \mathbf{B} \end{array} \right.$

- oscillant à une fréquence ν
- se propageant dans le vide à la vitesse $c = 300\,000 \text{ km/s}$

relation entre la longueur d'onde λ et la fréquence ν

$$\lambda = c/\nu$$

Nature de la lumière : onde



$$\nu = c/\lambda$$

toutes les ondes électromagnétiques sont de même nature et ne diffèrent que par leur fréquence

domaine visible

✓ longueurs d'onde : 400 à 750 nm avec $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$

✓ fréquences : $4 \cdot 10^{14}$ à $7,5 \cdot 10^{14}$ Hz

par comparaison:

- radio modulation de fréquence : 100 MHz = 10^8 Hz
- rayons X $\approx 10^{18}$ Hz

Nature de la lumière : particules

- la lumière est composée de particules appelées **photons**, se propageant dans le vide à la vitesse c
- un photon de fréquence ν et de longueur d'onde λ transporte l'énergie E

$$E = h\nu = hc/\lambda$$



- h = constante de Planck = $6,62 \cdot 10^{-34}$ Joules.s
- c = vitesse de la lumière dans le vide

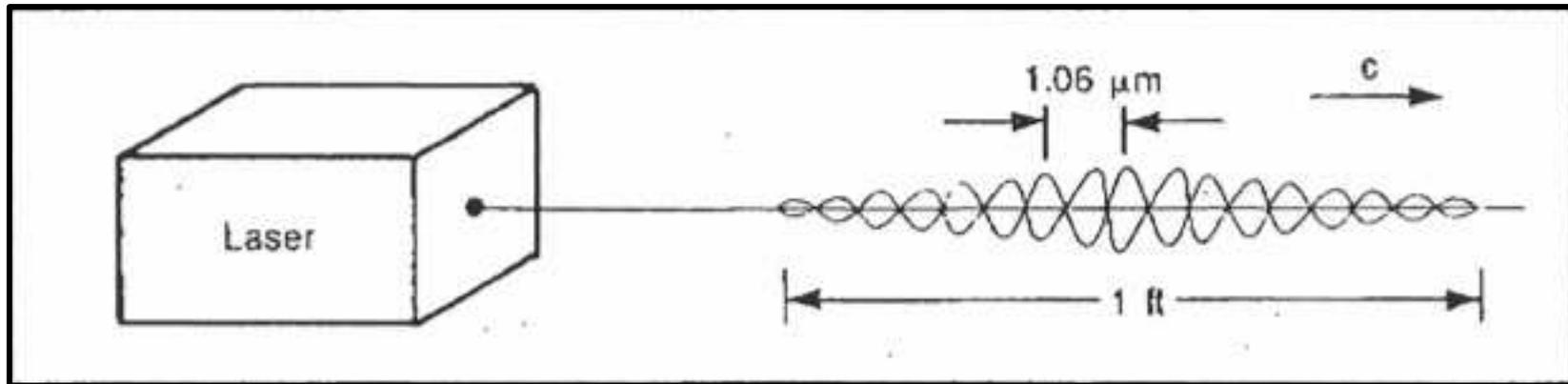
ordres de grandeur : à 500 nm dans le vert,

- ✓ un photon transporte une énergie de $3,6 \cdot 10^{-19}$ Joule
- ✓ un faisceau de lumière d'1 mW (pointeur laser) représente un flux de $2,7 \cdot 10^{15}$ photons par seconde

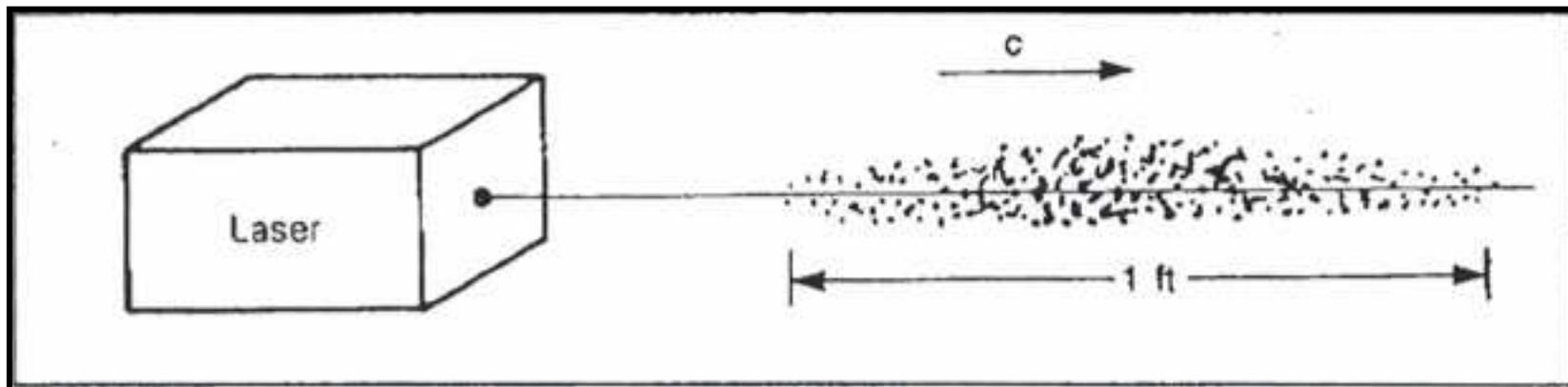
Nature de la lumière : dualité onde - particule

un laser Nd:YAG émettant à 1060 nm, des impulsions d'une nanoseconde, d'une énergie de 1J chacune, peut être vu :

➔ comme un émetteur de paquets d'onde



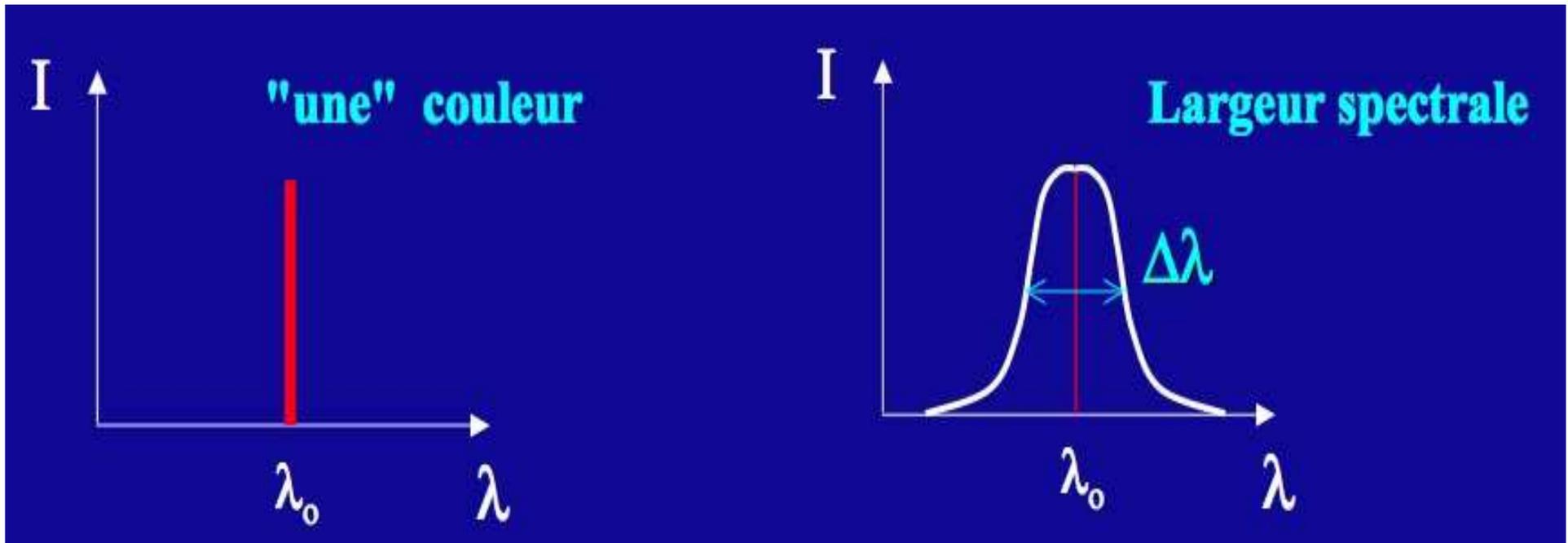
➔ comme un émetteur de photons



Caractéristiques de la lumière laser

largeur spectrale d'une source

qu'entend-on par lumière monochromatique?



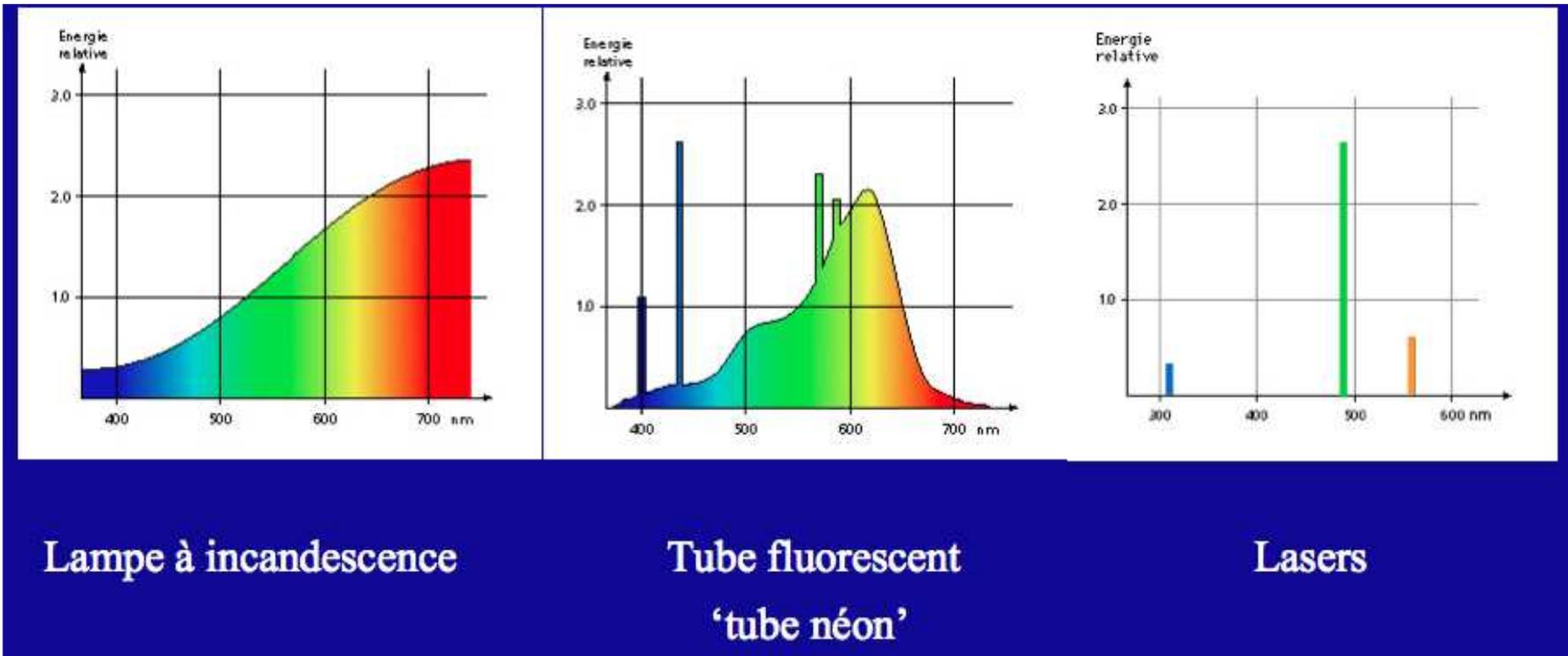
idéal

réalité

toute source lumineuse émet sur une certaine largeur spectrale

Caractéristiques de la lumière laser

monochromatique par rapport aux autres sources

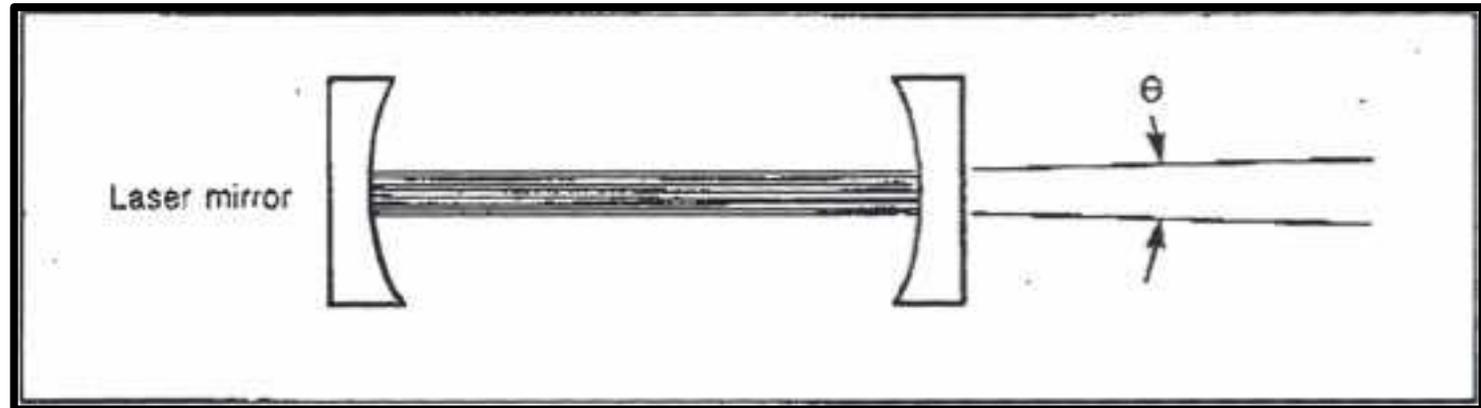


- ✓ spectre visible : $\Delta\lambda = 350 \text{ nm}$;
- ✓ LED de couleur : $\Delta\lambda \geq 100 \text{ nm}$
- ✓ laser Argon : $\Delta\lambda = 0,002 \text{ nm}$
- à nuancer pour les diodes : diode laser 805 nm $\Delta\lambda = 2,5 \text{ nm}$

Caractéristiques de la lumière laser

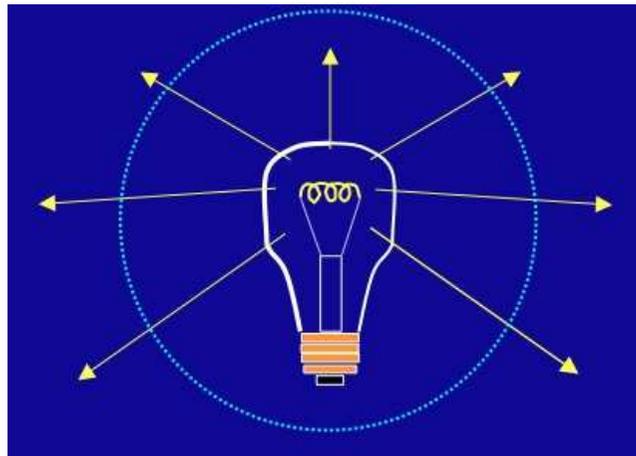
faisceau très directionnel

laser



angle de divergence $\theta \approx 1$ milliradian = $0,06^\circ$

lampe



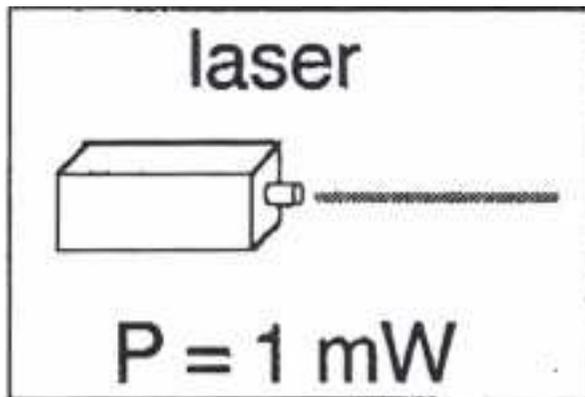
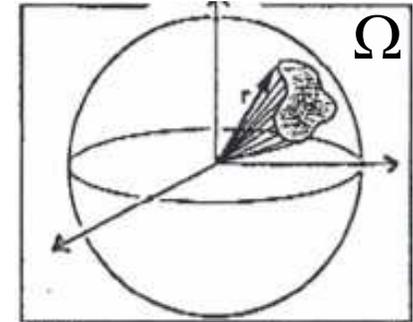
angle de divergence $\theta \approx 360^\circ$

Caractéristiques de la lumière laser

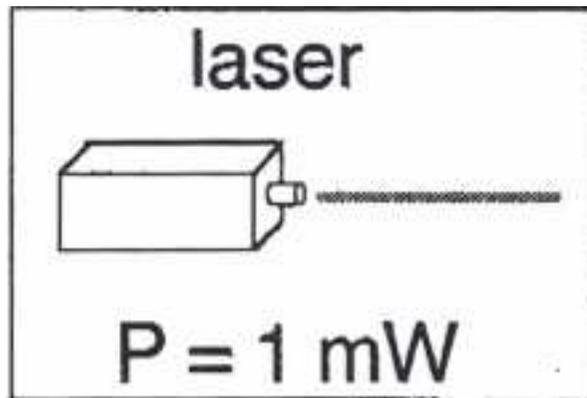
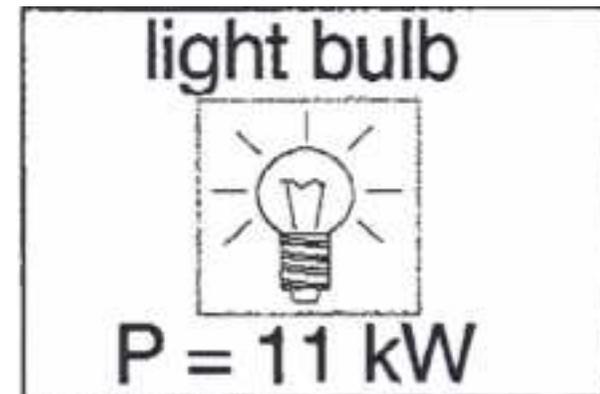
conséquences de la faible divergence

le laser concentre
une grande quantité d'énergie
dans un très petit angle solide Ω

angle solide Ω

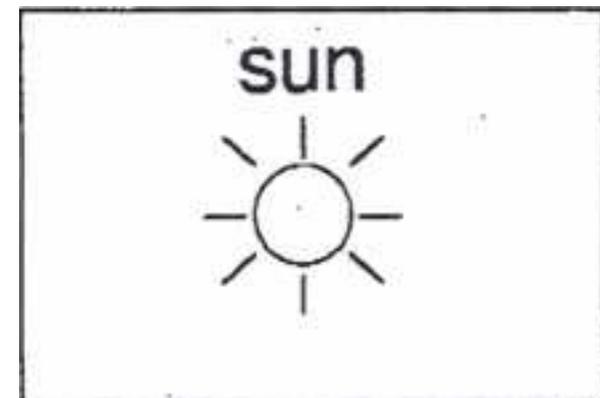


Intensité = P/Ω
équivalente à



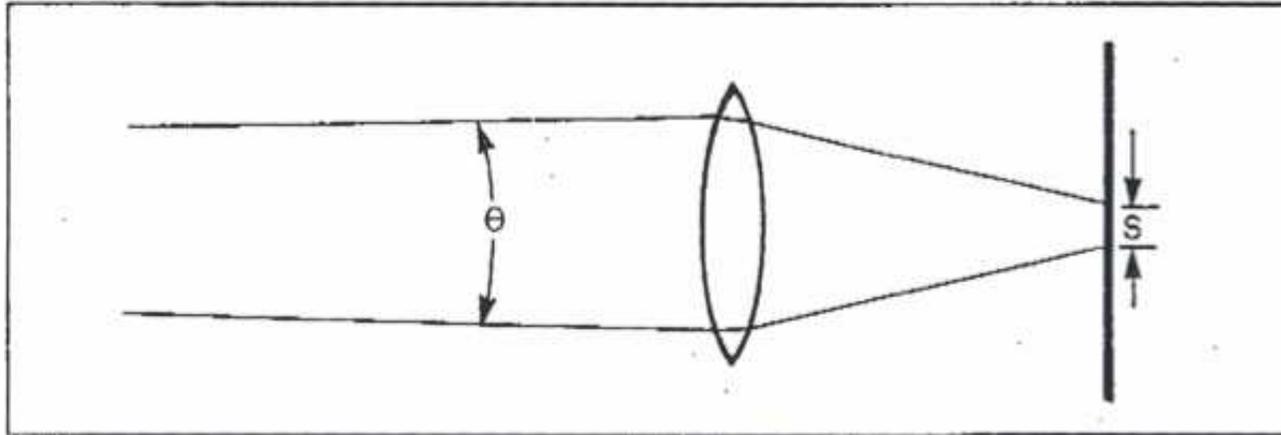
Brillance
 $B = P/\Omega S$

$$B_{\text{laser}} = 100 \times B_{\text{soleil}}$$



Caractéristiques de la lumière laser

avantages de la faible divergence



plus la divergence est faible,
plus la taille de la tache focalisée est petite

conséquences

➔ tache focalisation laser \ll tache focalisation lampe

➔ densité de puissance élevée (W/m^2)

!! faisceau laser de puissance 1mW focalisé
sur tache de $10\ \mu\text{m}$ = $13\text{MW}/\text{m}^2$

Comment obtenir un laser

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LASER

trois conditions

inversion de population

+

émission stimulée



amplificateur de lumière

+

résonateur



LASER

Interaction lumière - matière

trois processus

absorption

émission spontanée



*sources lumineuses
conventionnelles*

émission stimulée

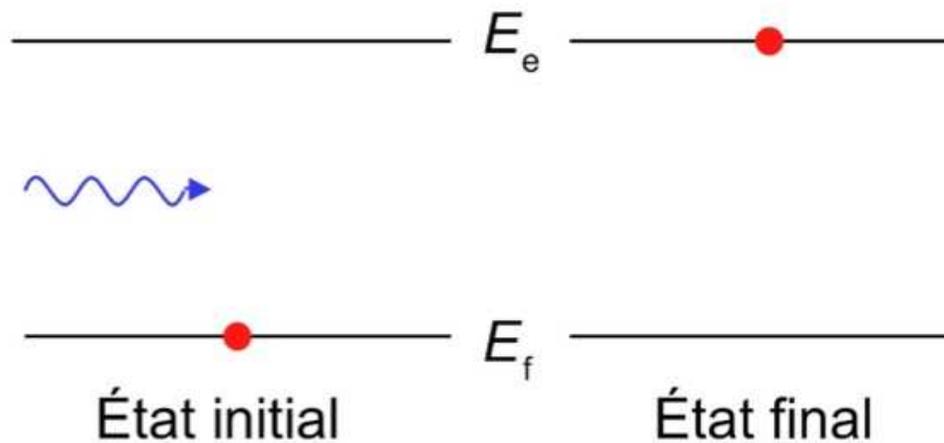


lasers

Interaction lumière - matière

absorption

l'énergie du photon $h\nu$ doit correspondre exactement à la différence d'énergie entre les deux niveaux

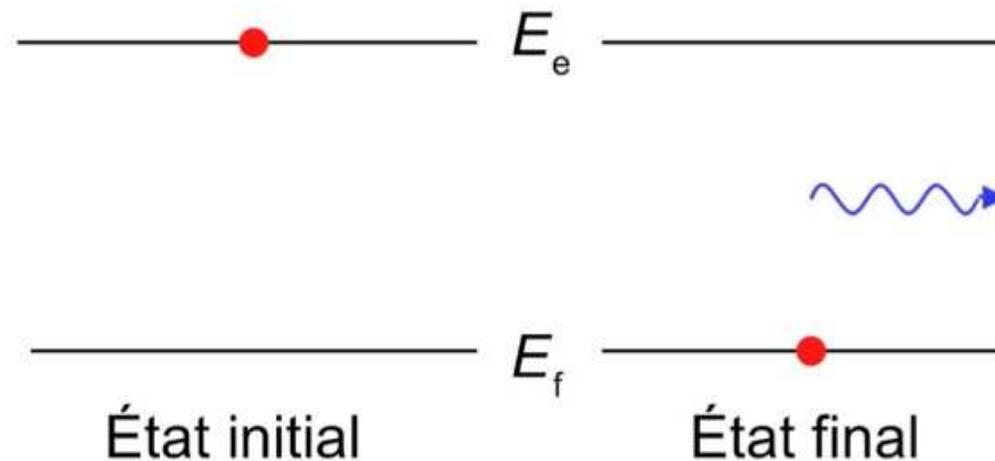


$$E_e - E_f = h\nu$$

Interaction lumière - matière

un atome dans un état excité peut perdre spontanément son énergie et revenir à l'état fondamental E_f en émettant un photon

1. par émission spontanée



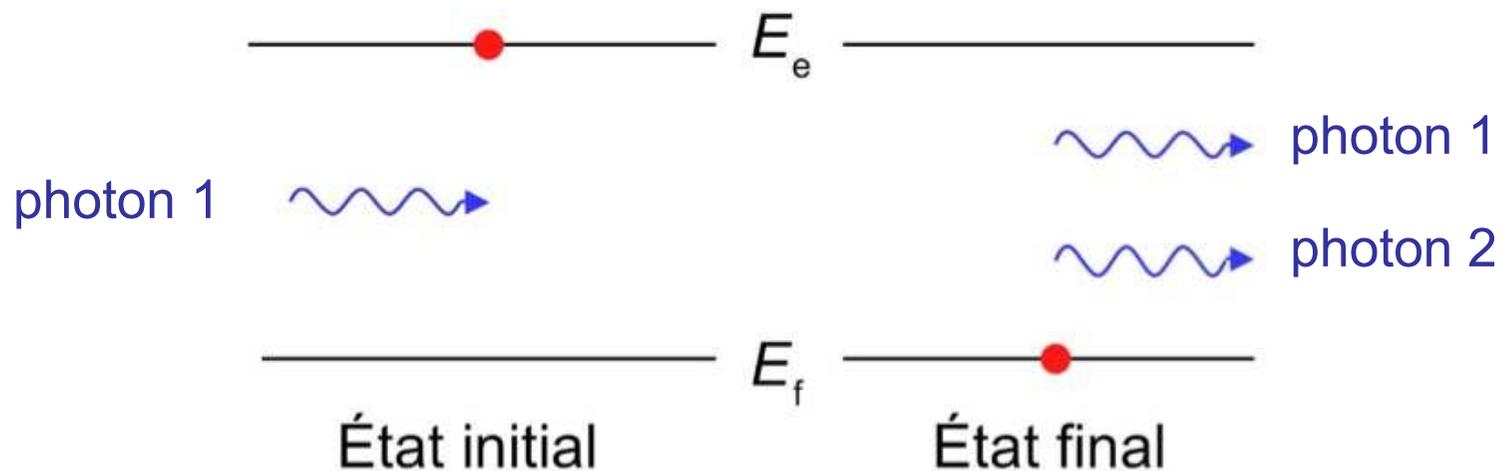
$$E_e - E_f = h\nu$$

le photon peut être émis dans n'importe quelle direction

Interaction lumière - matière

un atome dans un état excité peut perdre son énergie et revenir à l'état fondamental E_f en émettant un photon

2. par émission stimulée



$$E_e - E_f = h\nu$$

les photons 1 et 2 ont

✓ *même fréquence*

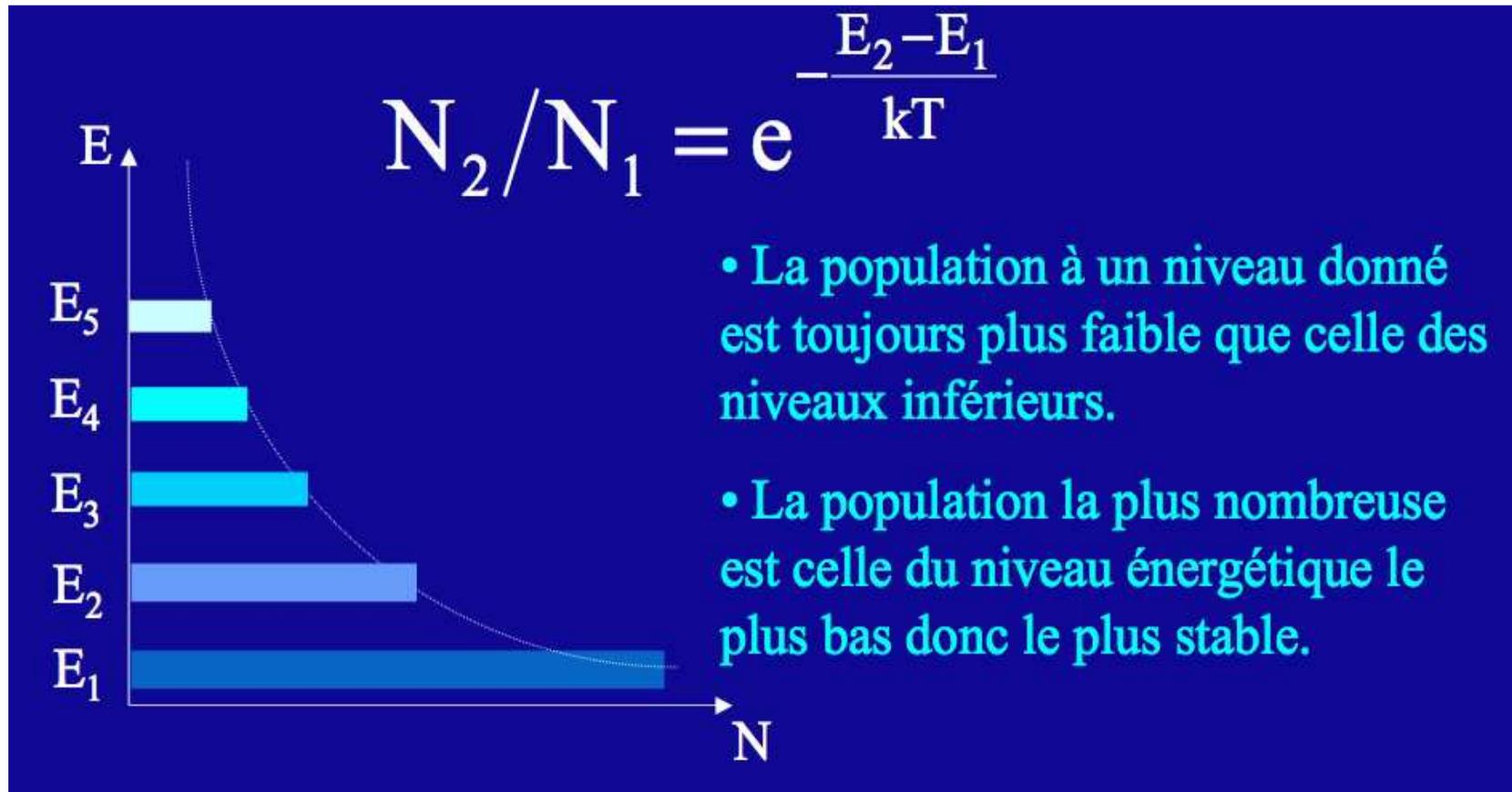
✓ *même direction*

✓ *même phase*

Répartition des atomes dans les différents niveaux d'énergie

combien d'atomes N_j dans le niveau E_j ?

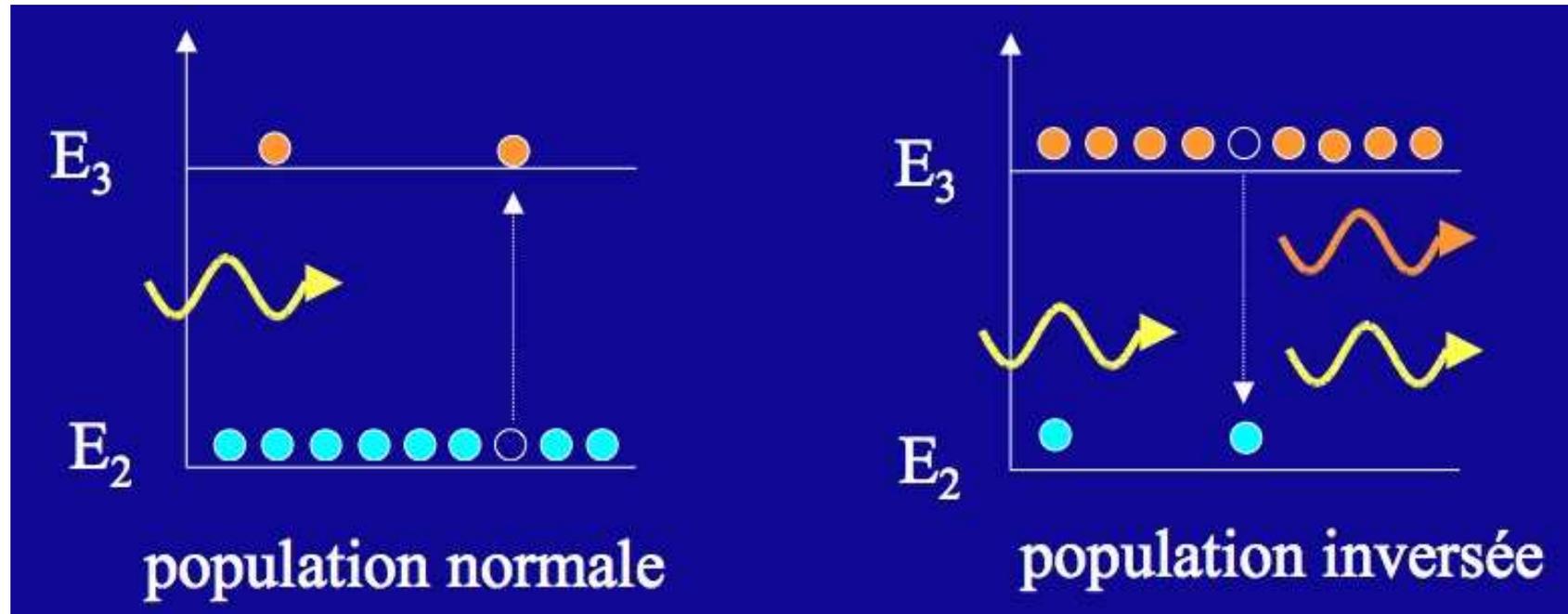
réponse dans les conditions habituelles : loi de Boltzmann



$$E_j > E_i \rightarrow N_j < N_i$$

Inversion de population

$$N_j > N_i \text{ bien que } E_j > E_i$$



l'inversion de population est un état hors équilibre

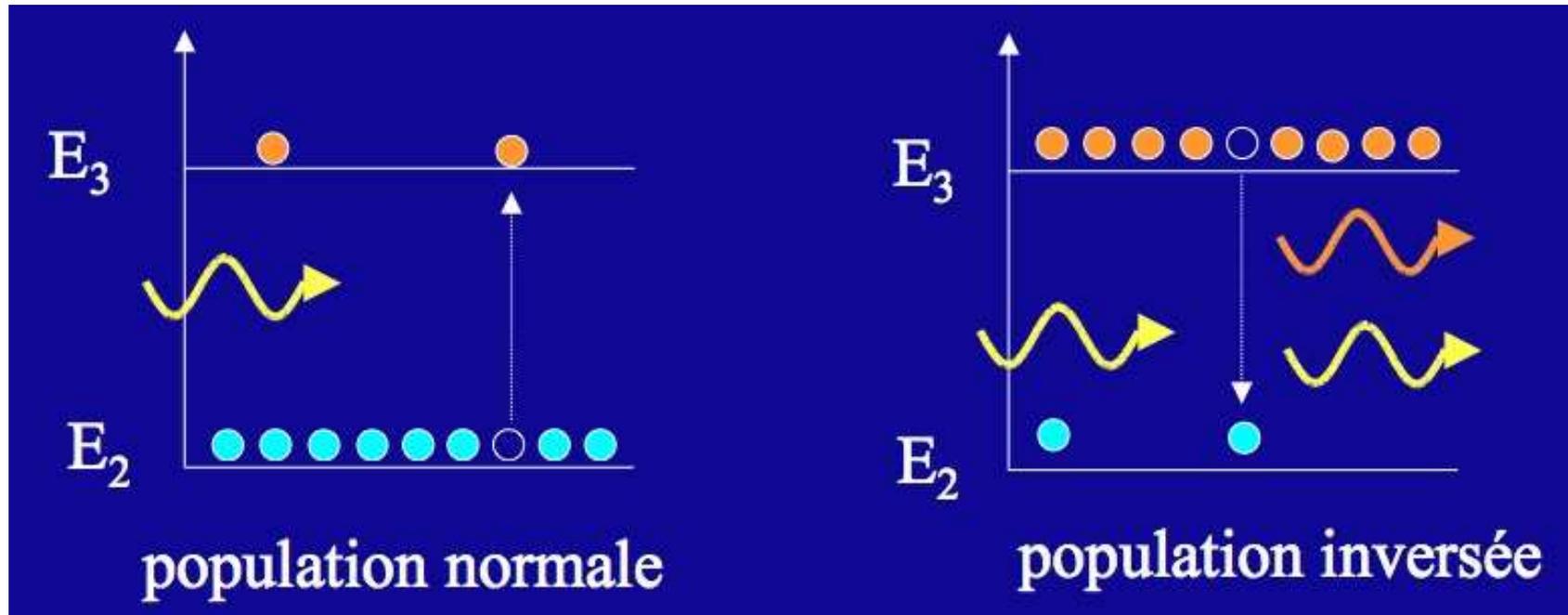


difficile à réaliser
ne dure pas longtemps

nécessité d'une source extérieure d'énergie
pour créer et maintenir l'inversion = POMPAGE

Inversion de population

milieu en inversion de population = milieu actif



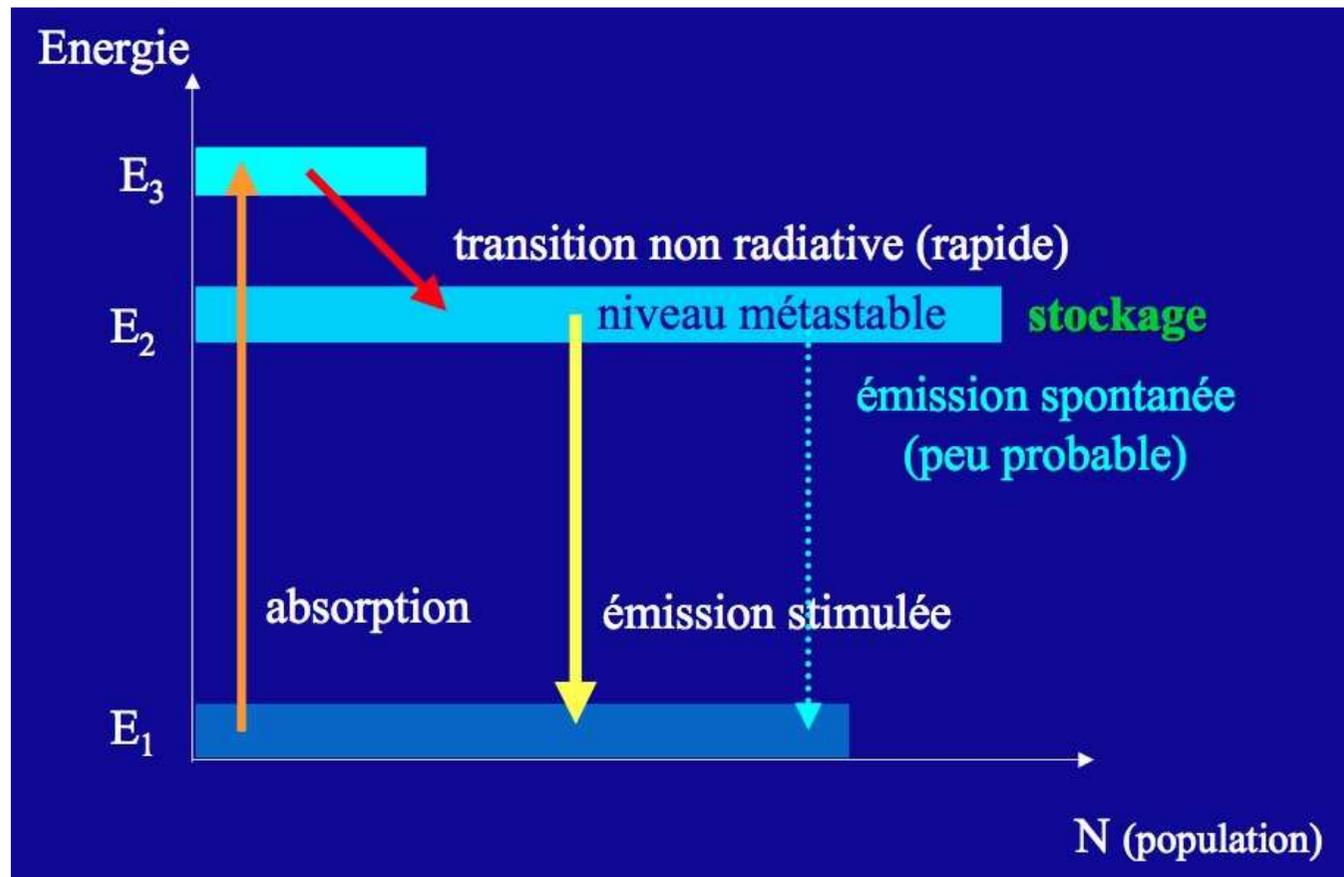
absorption

émission stimulée

l'inversion de population permet
l'amplification de la lumière

Méthodes de pompage

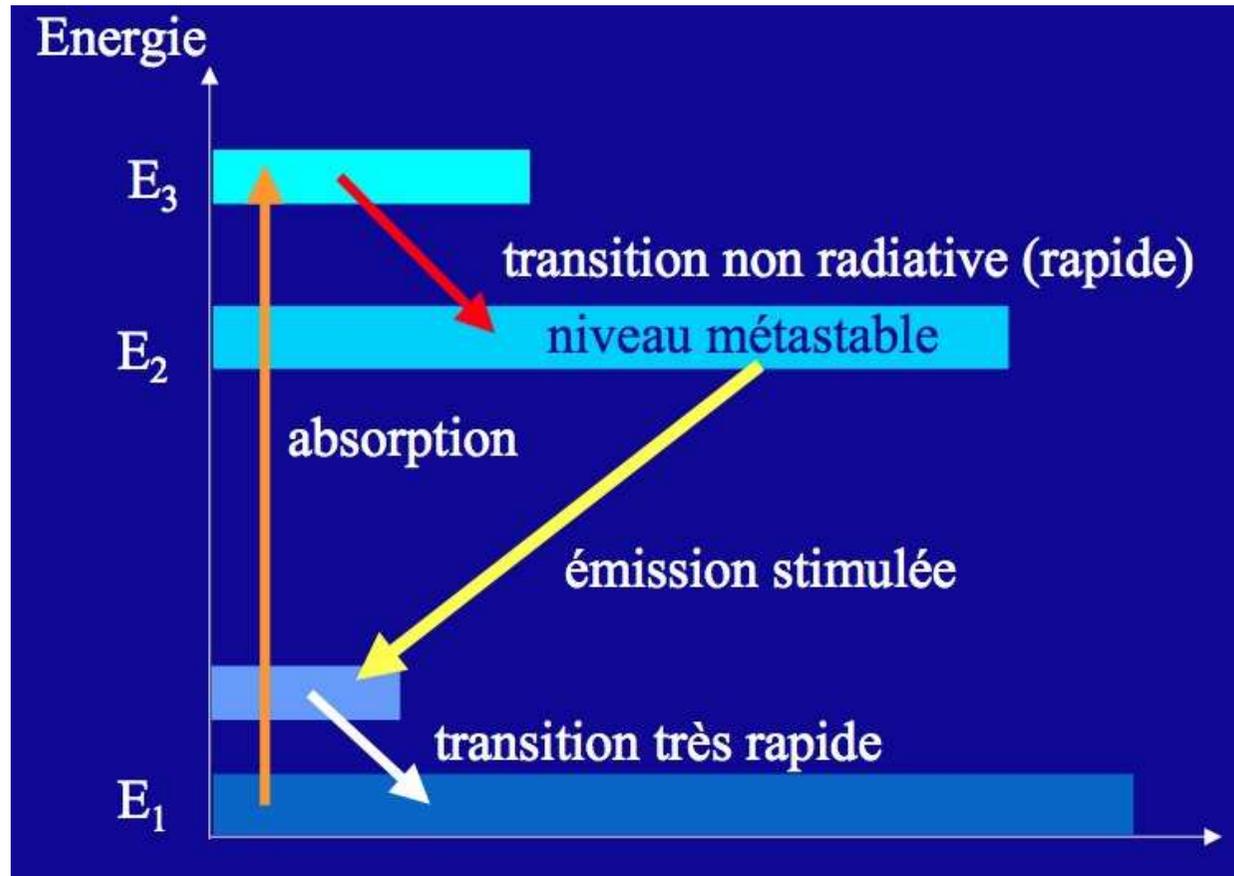
ystème à trois niveaux



niveau métastable = longue durée de vie
le premier laser : Rubis!

Méthodes de pompage

système à quatre niveaux



le plus employé : Nd:YAG, Er:YAG, CO₂, Argon ...

Méthodes de pompage

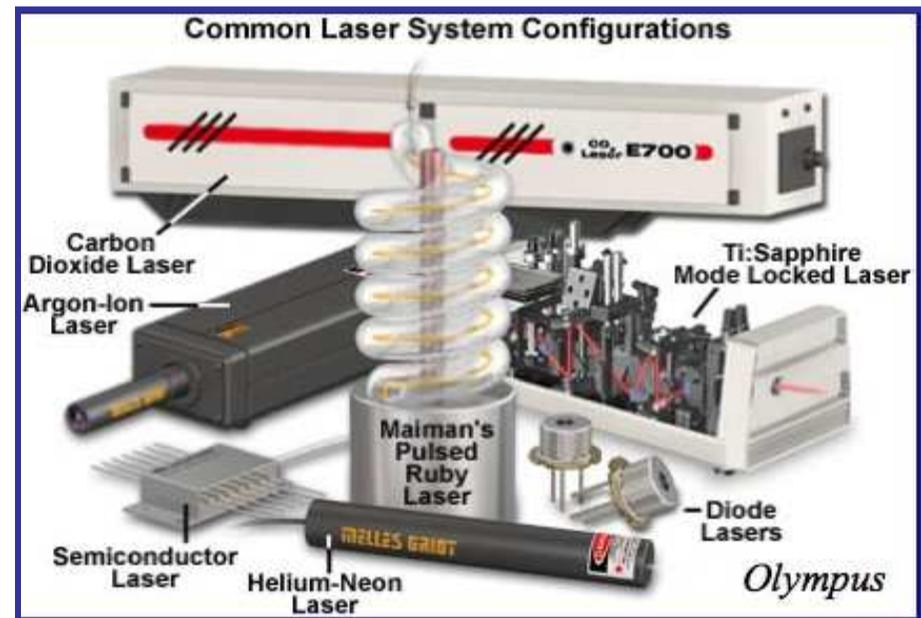
quelques techniques de pompage

!! décharge électrique : lasers à gaz (Argon, He-Ne, CO₂ ...)

!! lampe flash : Nd:YAG pulsé

!! diode laser : lasers état solide (Nd:YAG ...)

!! courant : diode-laser

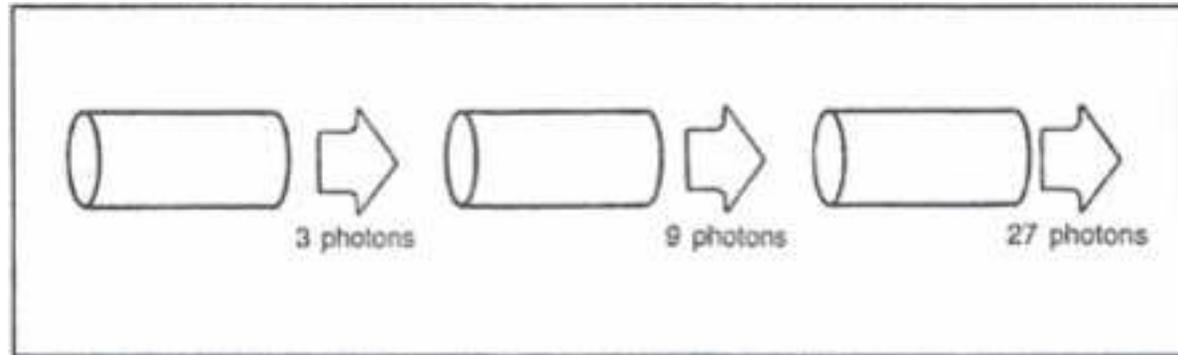


De l'amplificateur au laser :

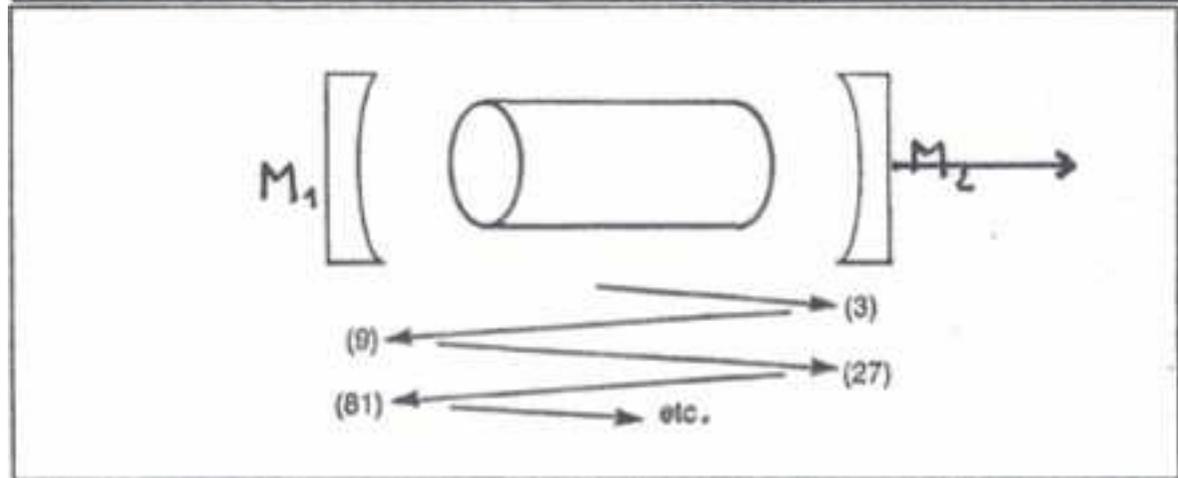
le rôle du résonateur ou cavité

pourquoi un résonateur?

amplificateur
un seul passage

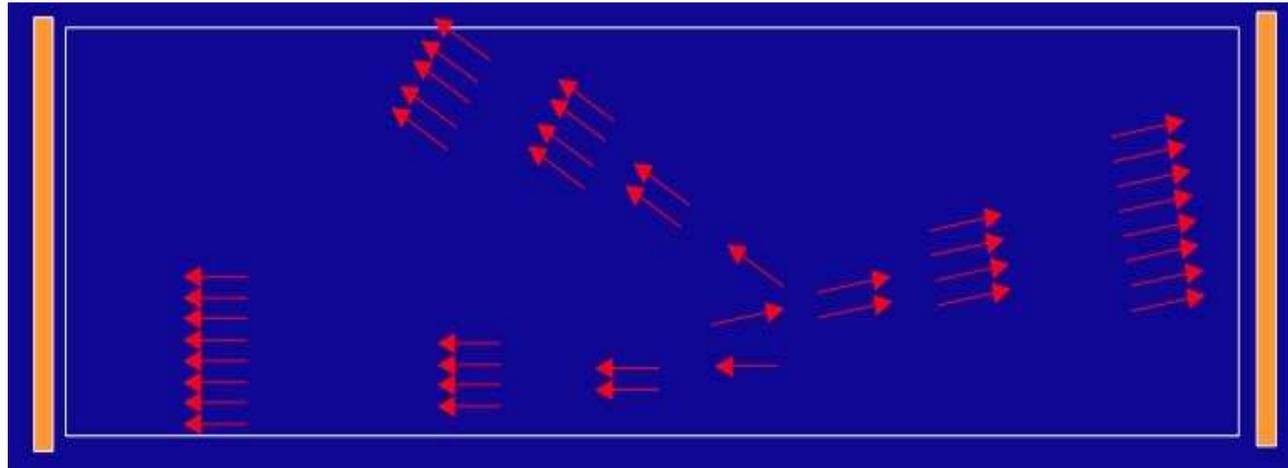


résonateur
- Miroir M_1 100%
- Miroir M_2 de sortie
partiellement réfléchissant

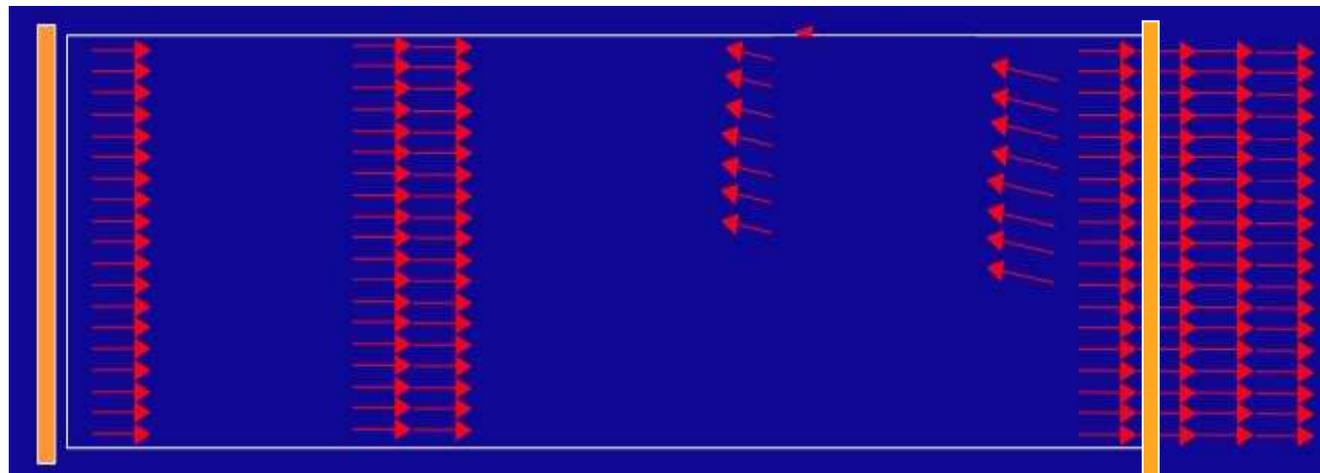


les miroirs permettent aux photons d'effectuer de nombreux allers-retours à travers le milieu actif, simulant de plus en plus d'émissions à chaque passage

Le rôle du résonateur ou cavité



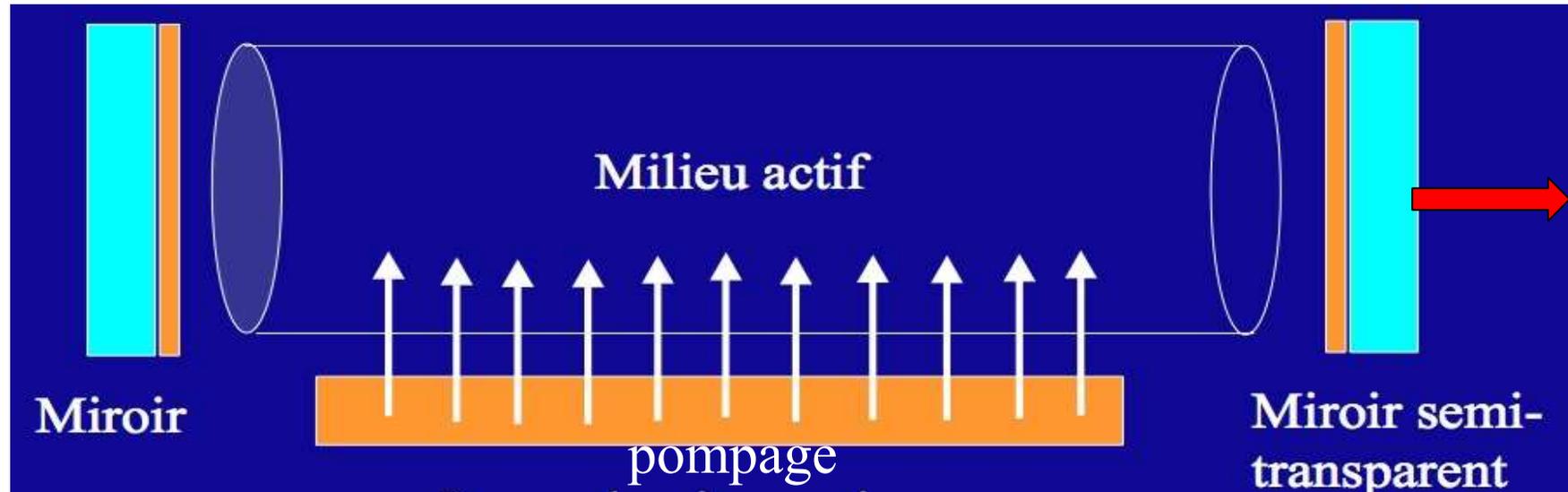
- ✓ démarrage sur l'émission spontanée
- ✓ la cavité sélectionne la direction d'émission



faisceau
laser

le faisceau laser est la « fuite » de la puissance lumineuse intracavité par le miroir de sortie

Les trois éléments de tout laser



laser = milieu actif + système de pompage + résonateur

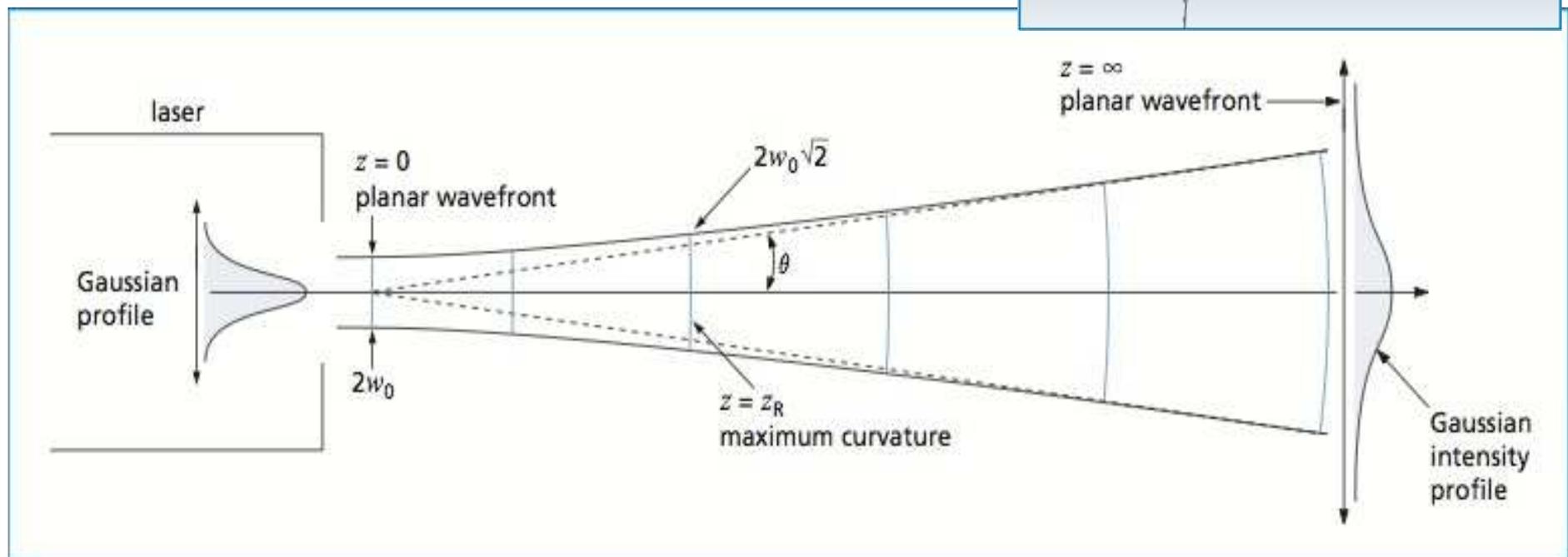
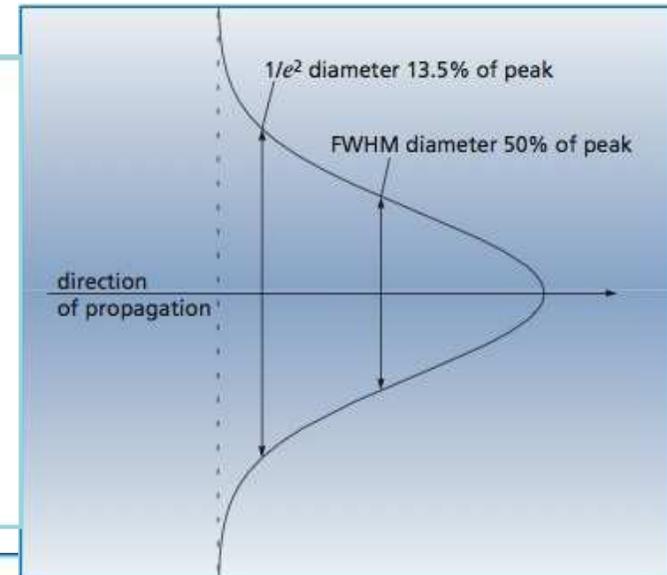
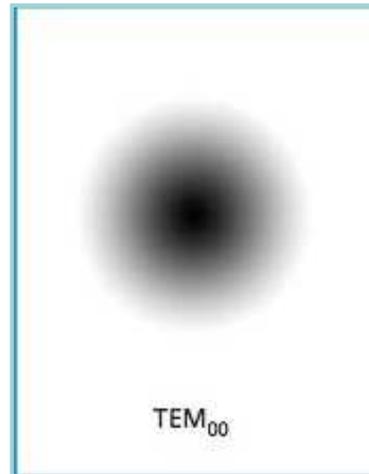
ces trois éléments sont toujours présents

du laser industriel de plusieurs kW

... à la diode laser de 5mW dans un lecteur de CD

Propagation dans l'espace d'un faisceau laser mode gaussien TEM00

$$I = I_0 \exp - \frac{2r^2}{w^2}$$



Propagation dans l'espace d'un faisceau laser

non uniformité du faisceau laser



nécessité de développer
pièces à main et diffuseurs spécifiques avec
profils homogènes



diffuseur frontal



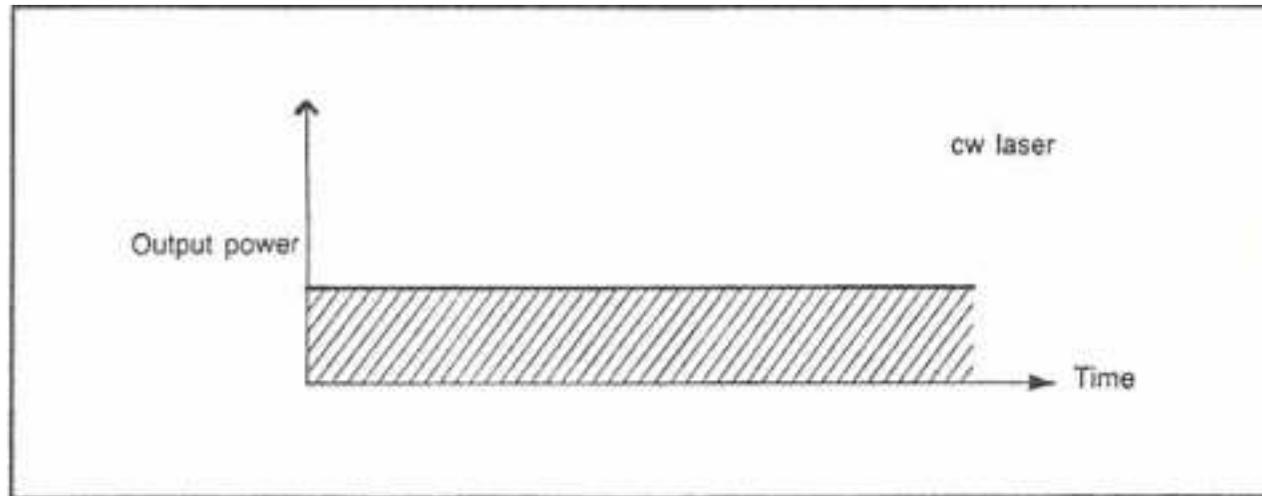
diffuseur cylindrique



ballonnet

exemple : diffuseurs développés par Medlight (Suisse)

Modes de fonctionnement d'un laser : continu



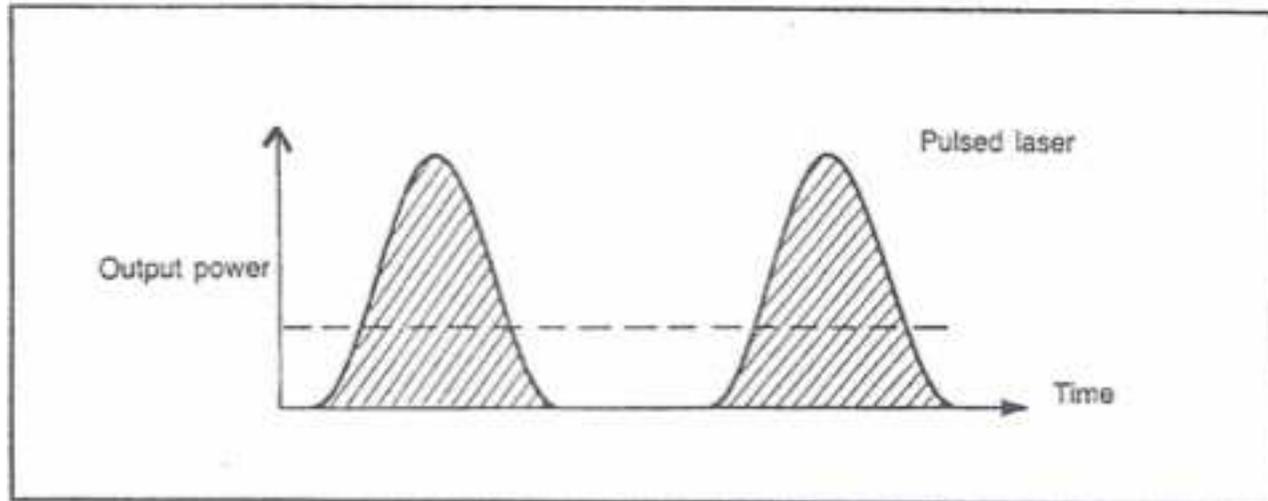
le flux d'énergie s'écoule de façon constante

**Puissance P = énergie émise par le laser par seconde
mesurée en Joules par seconde = Watts**

d'une fraction de mW ... à quelques kW!

lasers continus : Nd:YAG, CO₂, diode-laser, Argon, He-Ne ...

Modes de fonctionnement d'un laser : pulsé



le laser émet des impulsions à intervalles réguliers

caractérisé par 3 paramètres

- ✓ durée d'impulsion τ (s)
- ✓ quantité d'énergie dans une impulsion \mathcal{E} (Joules)
- ✓ taux de répétition f = nombre d'impulsions émises par seconde (Hz)

Modes de fonctionnement d'un laser : pulsé

deux types de puissance

!! **Puissance moyenne P_m**
= taux moyen d'écoulement
du flux d'énergie par seconde

$$P_m = f \times \varepsilon$$

!! **Puissance crête ou Puissance pic P_p**
= taux d'écoulement du flux d'énergie
durant l'émission de l'impulsion

$$P_p = \varepsilon / \tau$$

Er:YAG

$\varepsilon = 300 \text{ mJ}$, $\tau = 0,2 \text{ ms}$, $f = 10 \text{ Hz}$



$$P_m = 30 \text{ W}; P_p = 1,5 \text{ KW}$$

Nd:YAG

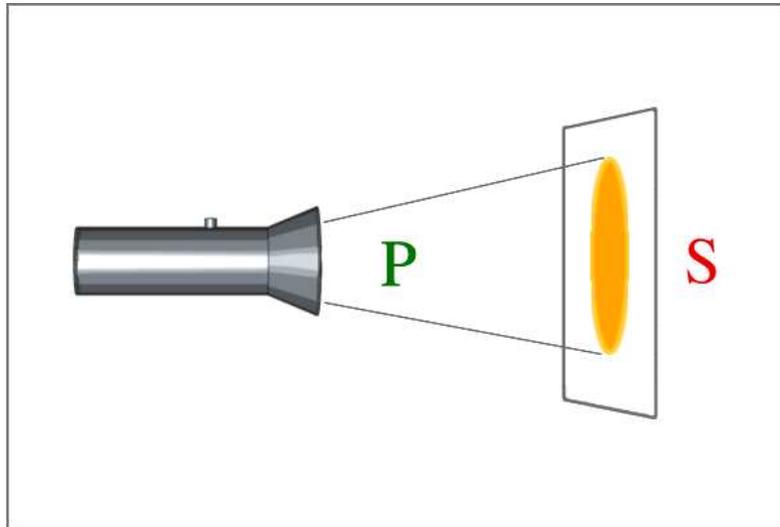
$\varepsilon = 100 \text{ mJ}$, $\tau = 20 \text{ ns}$, $f = 10 \text{ Hz}$



$$P_m = 1 \text{ W}; P_p = 5 \text{ MW}$$

Paramètres d'irradiation

Vitesse à laquelle l'énergie est délivrée au tissu



$$\text{Irradiance} = \frac{\text{Puissance}}{\text{Surface}}$$

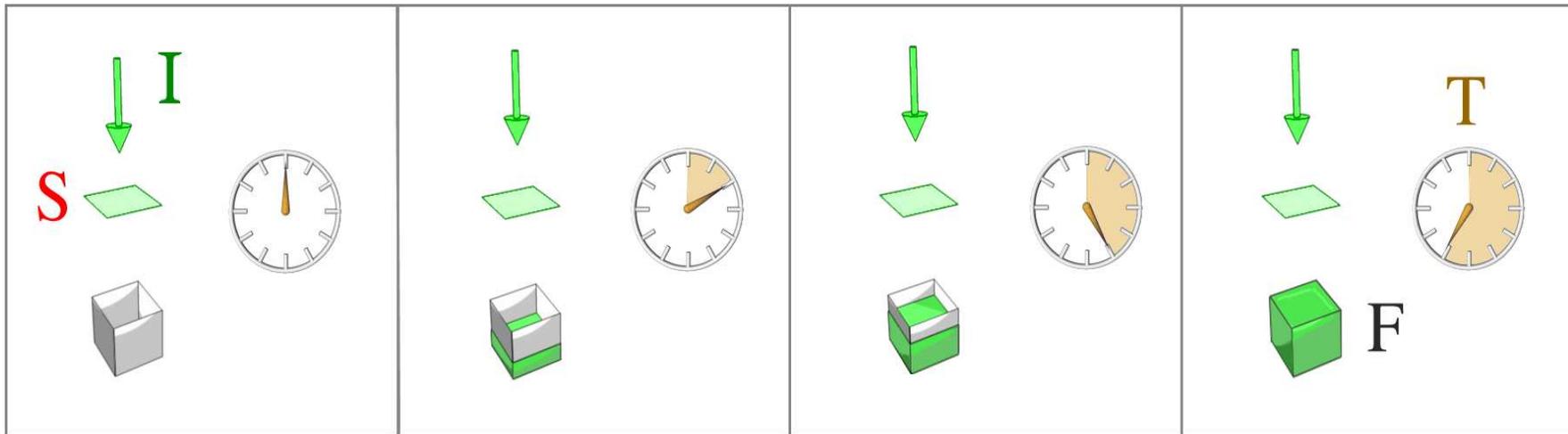
$$I = \frac{P}{S}$$

Irradiance

= puissance par unité de surface (W/cm²)

Paramètres d'irradiation

Energie totale délivrée au tissu



$$\text{Fluence} = \frac{\text{Energie}}{\text{Surface}} \quad F = \frac{E}{S}$$

Fluence
= énergie totale par unité de surface délivrée au tissu durant le traitement (Joules/cm²)

Paramètres d'irradiation

Relation entre irradiance I et fluence F

$$F = I \times T$$

$$\text{Irradiance} = \frac{\text{Power}}{\text{Area}} \Rightarrow \frac{\text{Power}}{\text{Area}} \times \text{Time}$$

$$\text{Power} = \frac{\text{Energy}}{\text{Time}} \Rightarrow \frac{\text{Energy}}{\text{Time} \times \text{Area}} \times \text{Time} = \frac{\text{Energy}}{\text{Area}}$$

$$\text{Irradiance} \times \text{Temps} = \text{Fluence}$$

Paramètres d'irradiation

tableau récapitulatif

<i>Définition</i>	Nom employé	Symbole	Unité	Notation	Commentaire
<i>Surface tissulaire irradiée</i>	Surface	S	Centimètre carré	cm^2	
<i>Débit d'énergie</i>	Puissance	P	Joules par seconde	W	
<i>Débit d'énergie par unité de surface</i>	Irradiance	I	Watts par centimètre carré	W/cm^2	$I = P / S$
<i>Durée de l'irradiation</i>	Durée du traitement	T	Secondes	s	
<i>Energie par unité de surface</i>	Fluence	F	Joules par centimètre carré	J/cm^2	$F = I \times T$

RELATION ENTRE FLUENCE ET IRRADIANCE

$$F = I \times T$$