

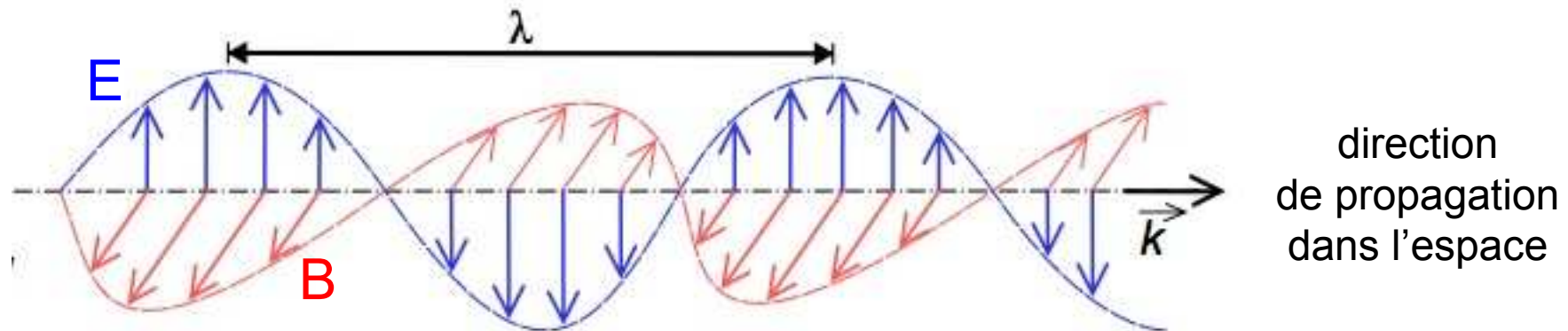
# BASES PHYSIQUES DES SOURCES LASERS

Geneviève Bourg-Heckly

XXX<sup>ème</sup> 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  $t$

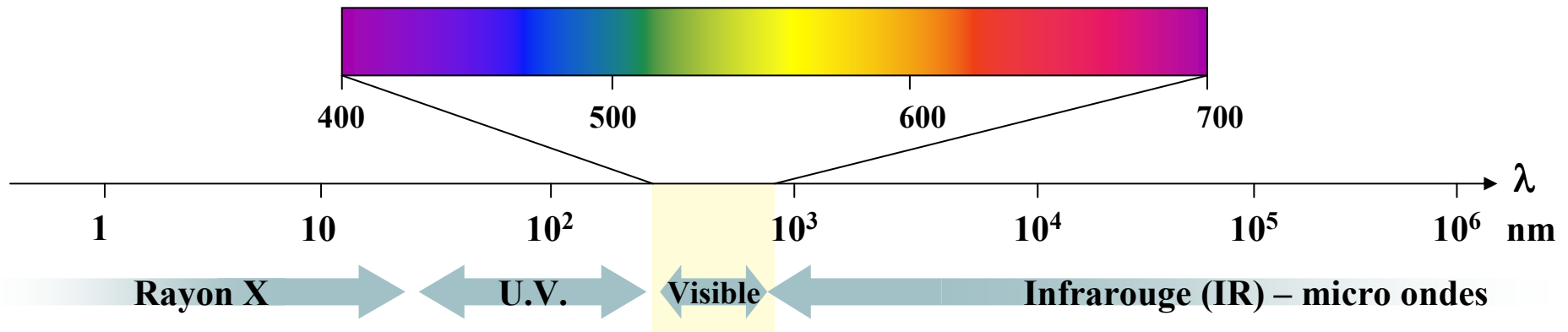
onde électromagnétique =  $\left\{ \begin{array}{l} \text{un champ électrique } \mathbf{E} \\ \text{un champ magnétique } \mathbf{B} \end{array} \right.$

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

relation entre la longueur d'onde  $\lambda$  et la fréquence  $\nu$

$$\lambda = c/\nu$$

# 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  $\nu$  et de longueur d'onde  $\lambda$  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

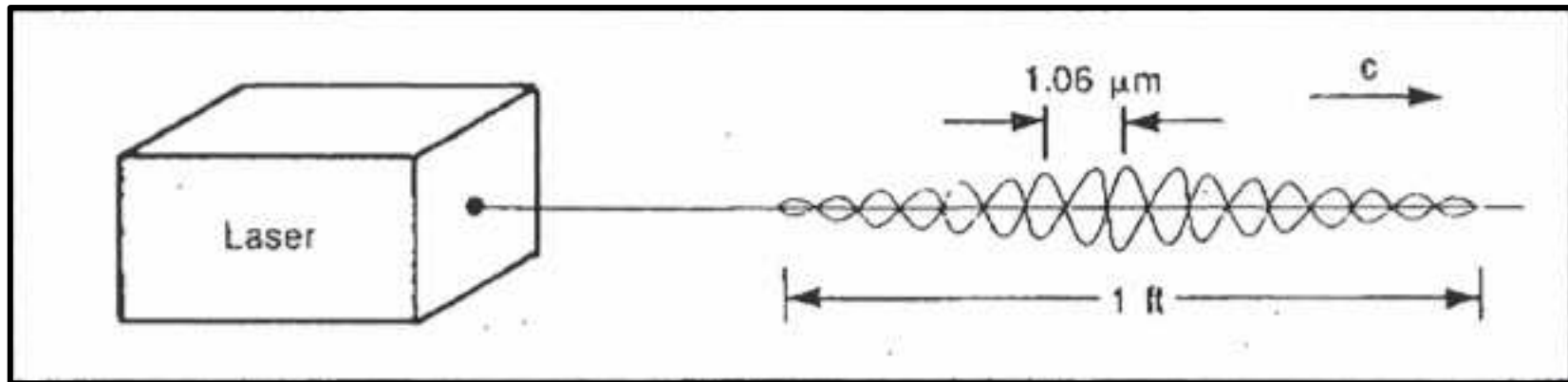
*ordres de grandeur* : à 500 nm dans le vert,

- ✓ 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

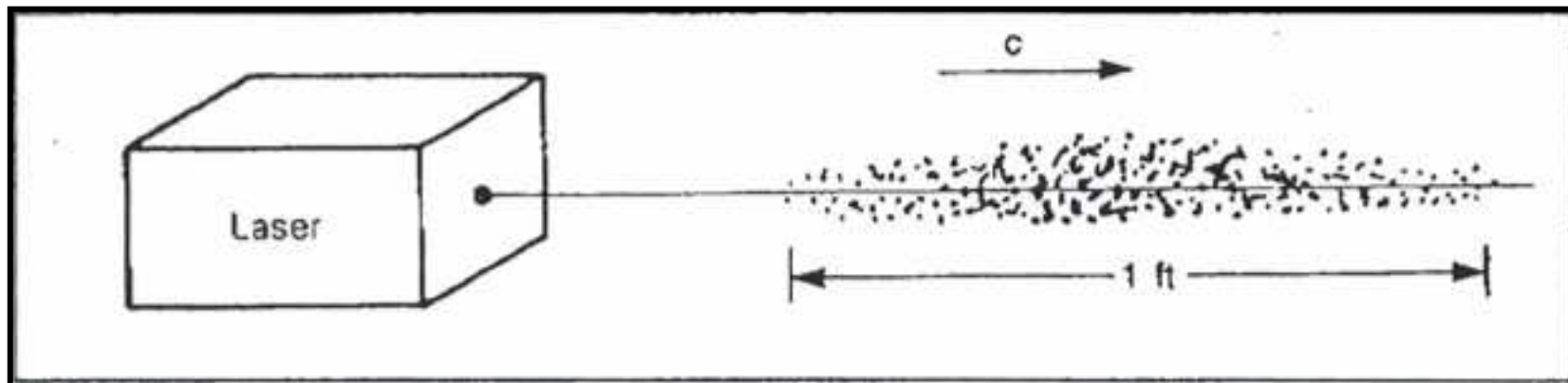
# Nature de la lumière : dualité onde - particule

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



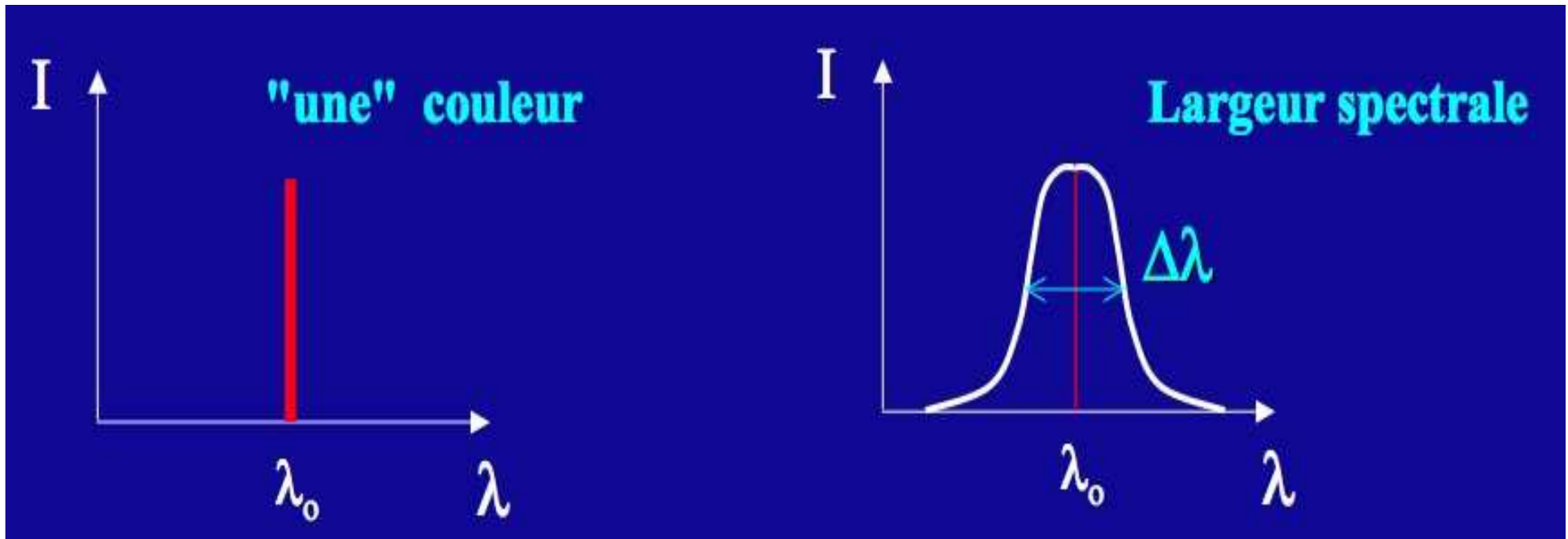
➔ comme un émetteur de photons



# Caractéristiques de la lumière laser

largeur spectrale d'une source

qu'entend-on par lumière monochromatique?



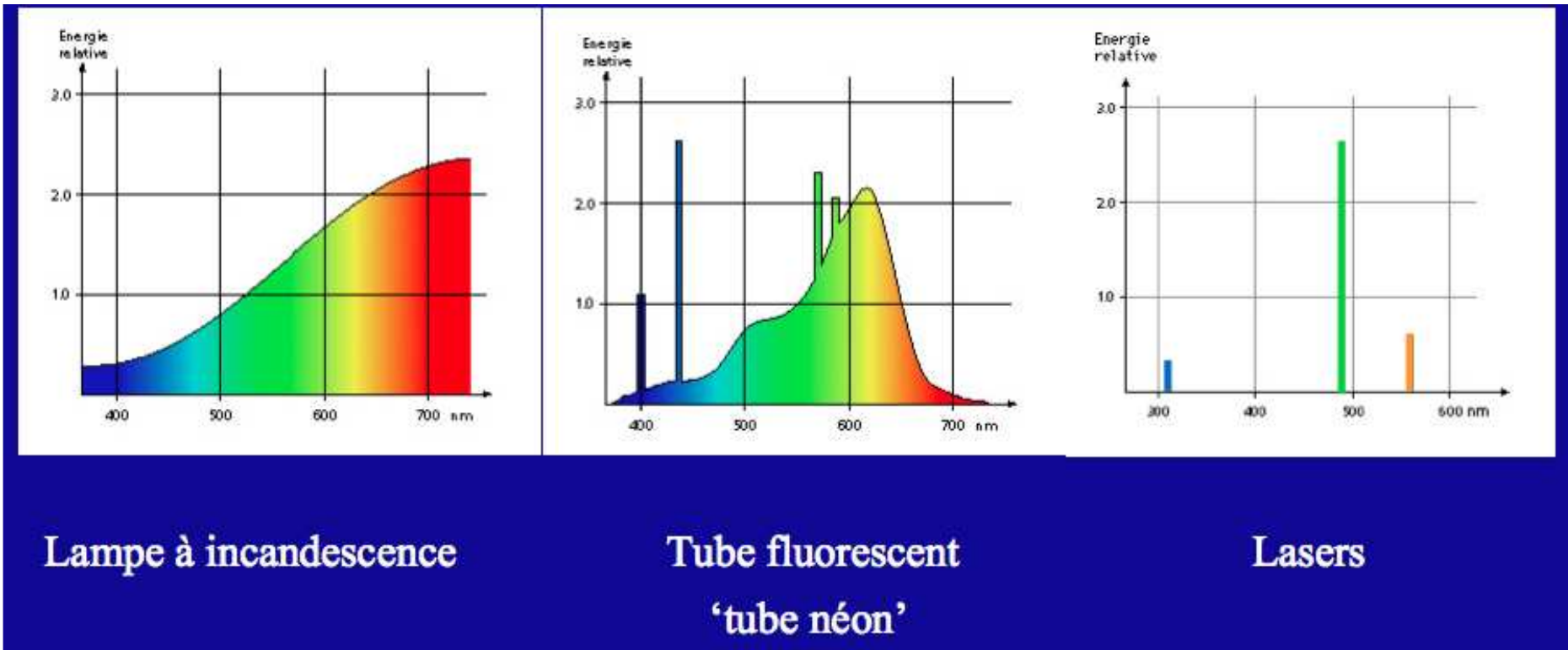
idéal

réalité

toute source lumineuse émet sur une certaine largeur spectrale

# Caractéristiques de la lumière laser

monochromatique par rapport aux autres sources



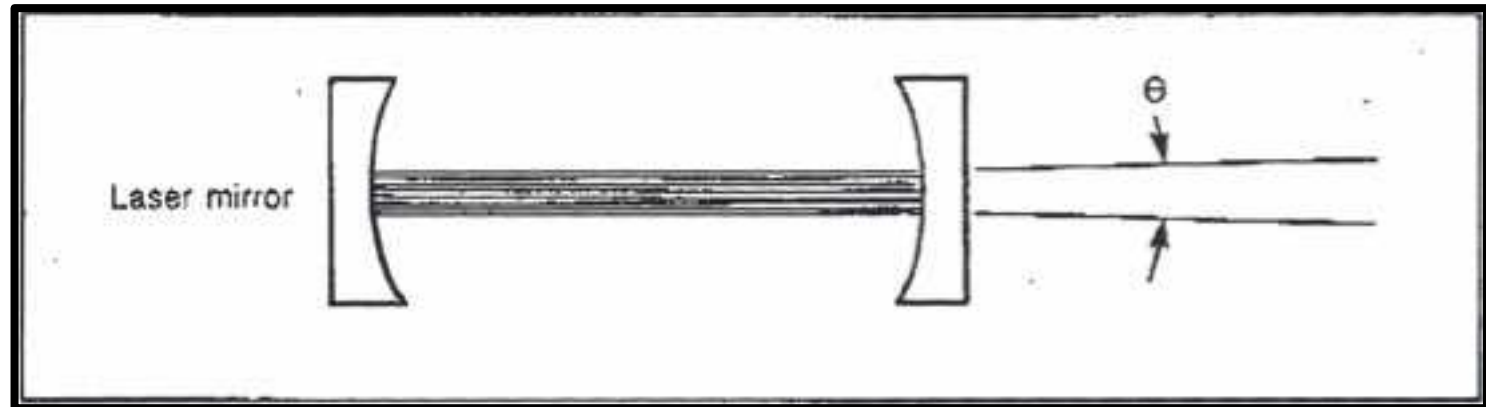
- ✓ spectre visible :  $\Delta\lambda = 350 \text{ nm}$ ;
- ✓ LED de couleur :  $\Delta\lambda \geq 100 \text{ nm}$
- ✓ laser Argon :  $\Delta\lambda = 0,002 \text{ nm}$   
à nuancer pour les diodes : diode laser 805 nm  $\Delta\lambda = 2,5 \text{ nm}$



# Caractéristiques de la lumière laser

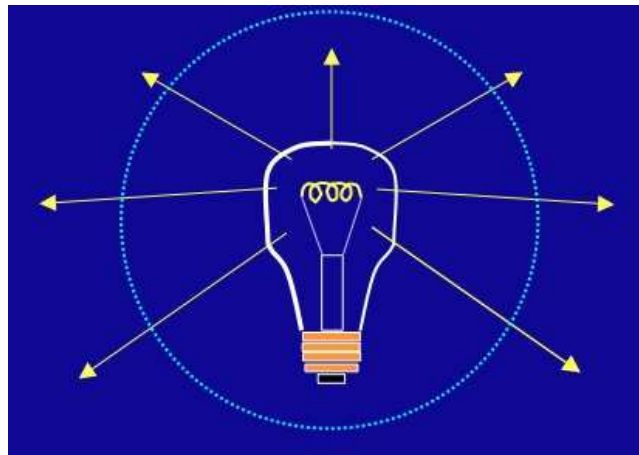
faisceau très directionnel

laser



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

lampe



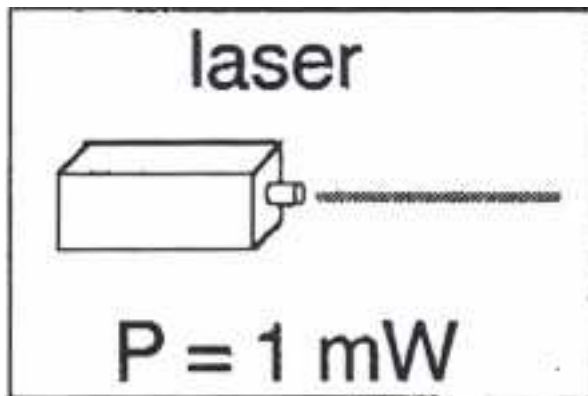
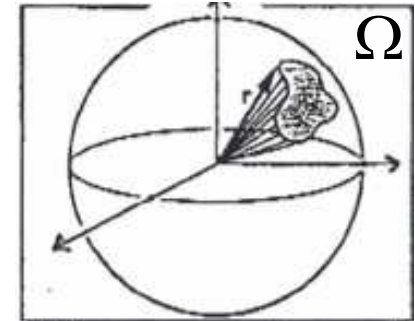
angle de divergence  $\theta \approx 360^\circ$

# Caractéristiques de la lumière laser

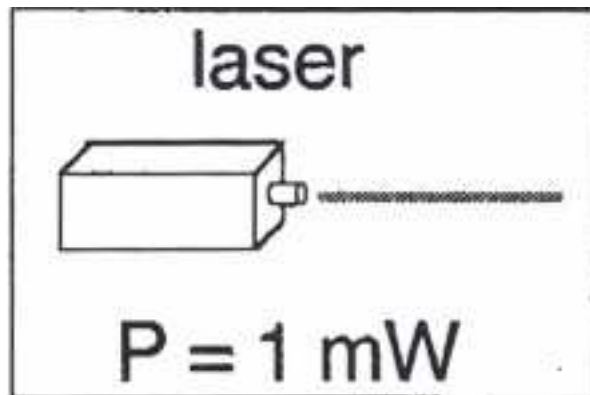
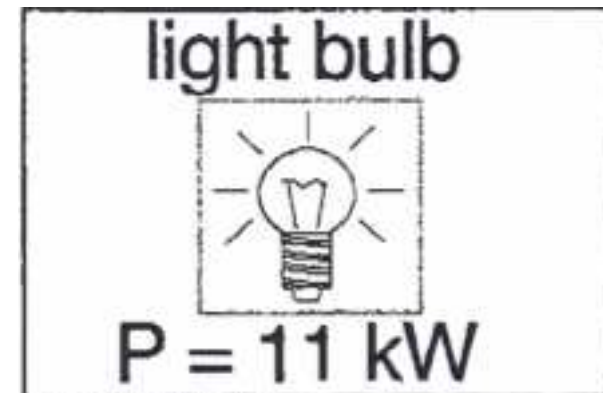
## conséquences de la faible divergence

le laser concentre  
une grande quantité d'énergie  
dans un très petit angle solide  $\Omega$

angle solide  $\Omega$

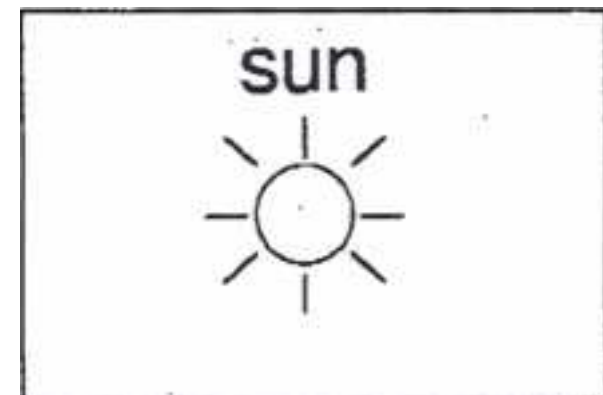


Intensité =  $P/\Omega$   
équivalente à



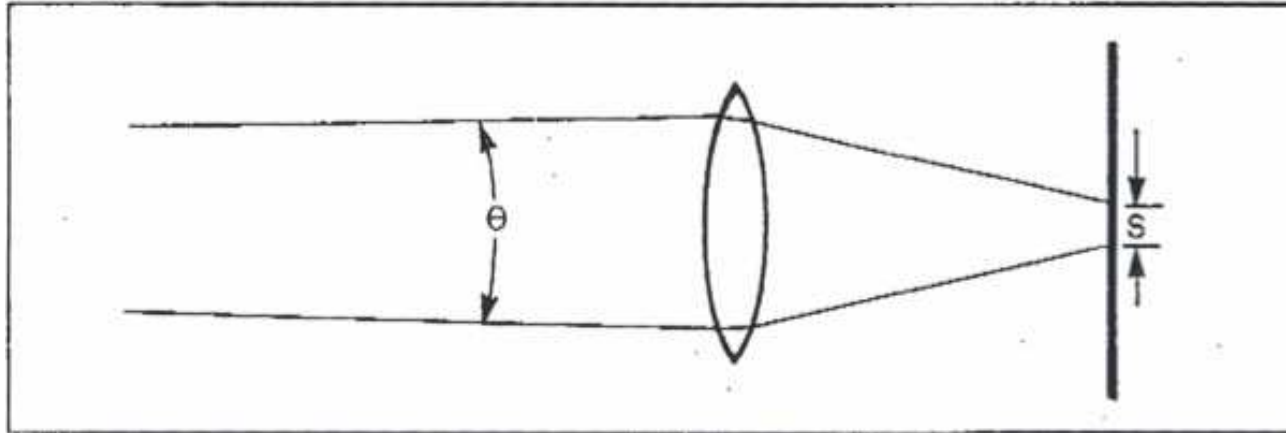
Brillance  
 $B = P/\Omega S$

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



# 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 ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

!! faisceau laser de puissance  $1\text{mW}$  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

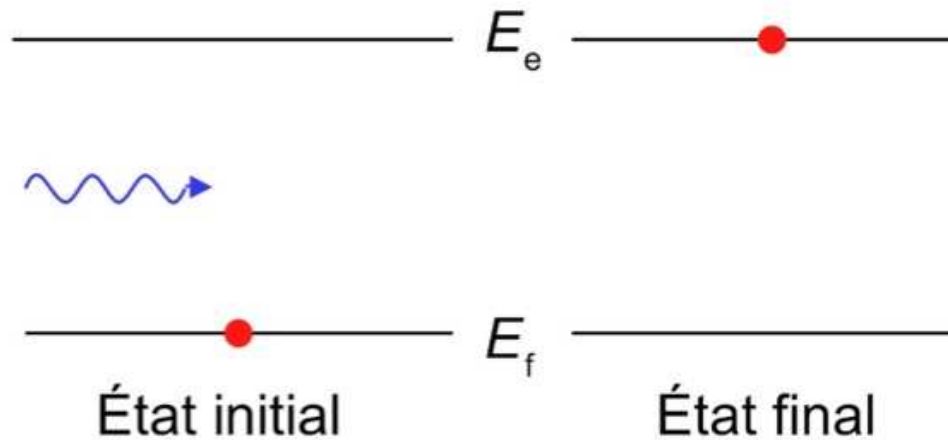


*lasers*

# Interaction lumière - matière

## absorption

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

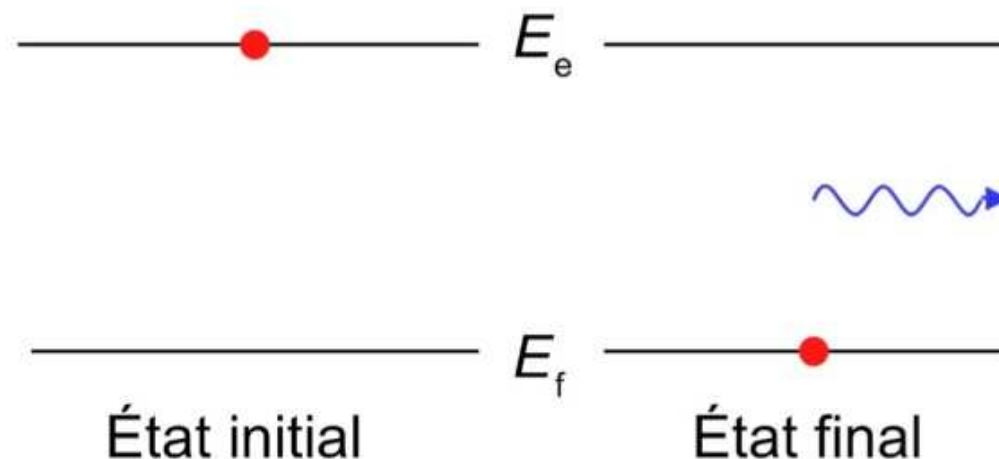


$$E_e - E_f = h\nu$$

# 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



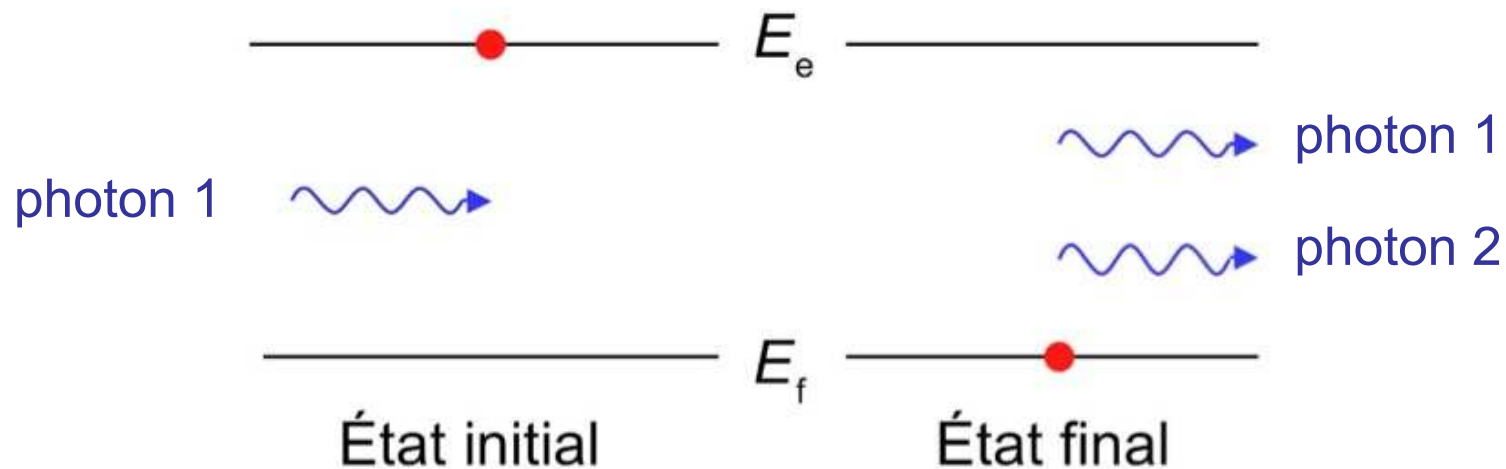
$$E_e - E_f = h\nu$$

*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

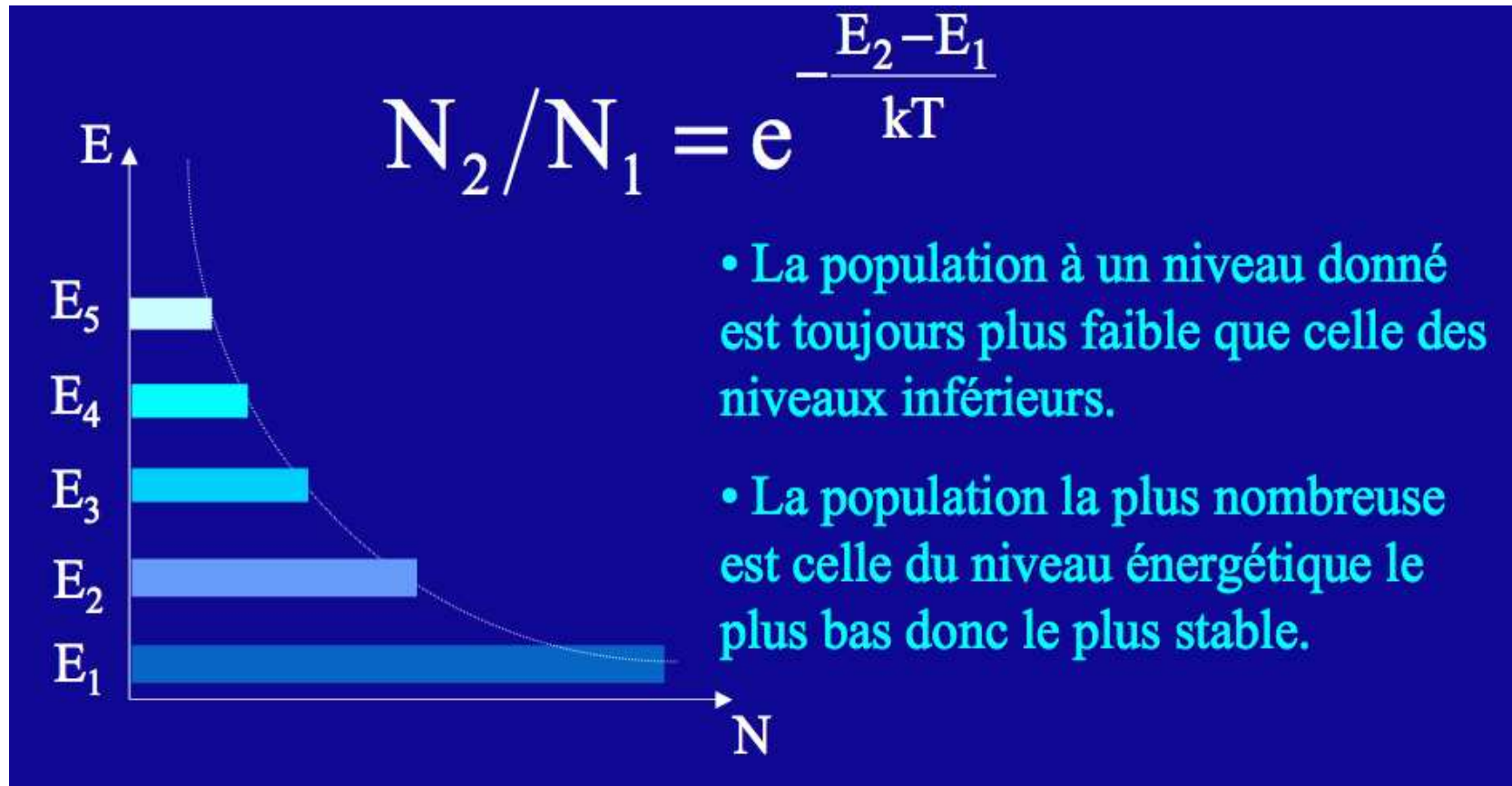
- ✓ même fréquence
- ✓ même direction
- ✓ même phase



# Répartition des atomes dans les différents niveaux d'énergie

combien d'atomes  $N_j$  dans le niveau  $E_j$ ?

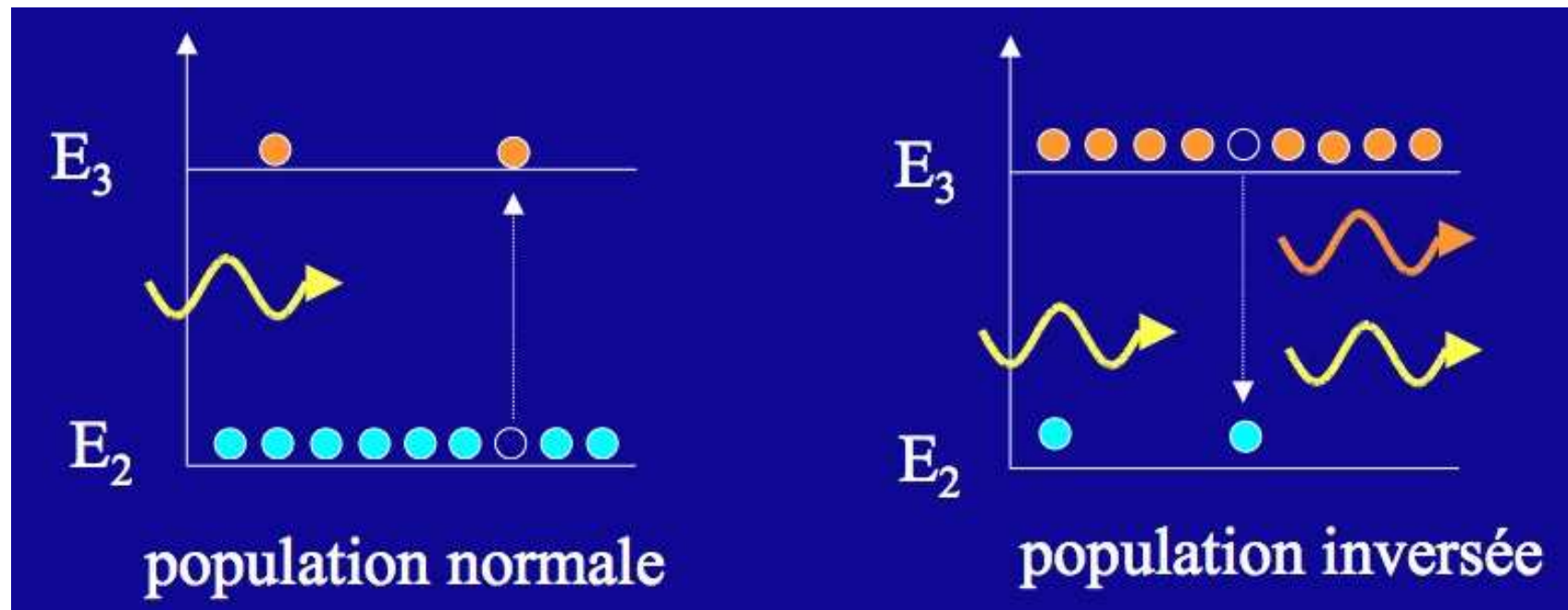
réponse dans les conditions habituelles : loi de Boltzmann



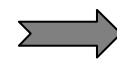
$$E_j > E_i \rightarrow N_j < N_i$$

# Inversion de population

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



l'inversion de population est  
un état hors équilibre

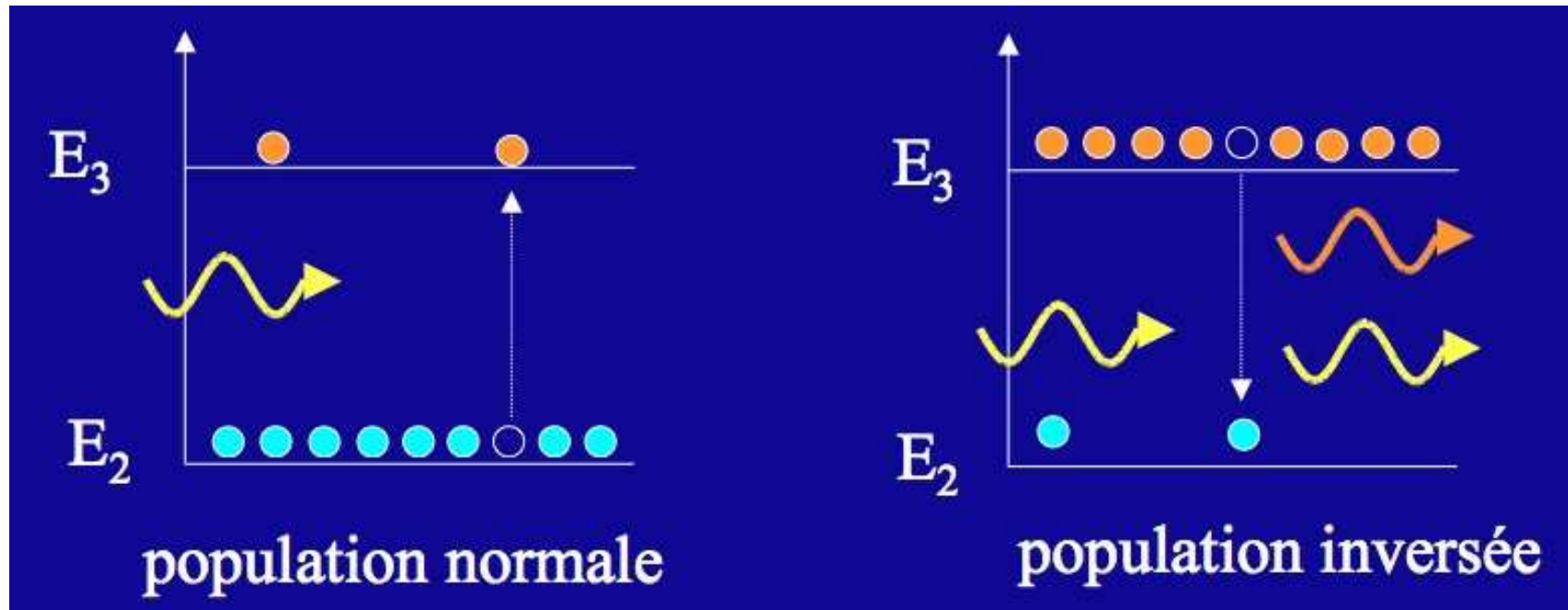


difficile à réaliser  
ne dure pas longtemps

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

# Inversion de population

milieu en inversion de population = milieu actif



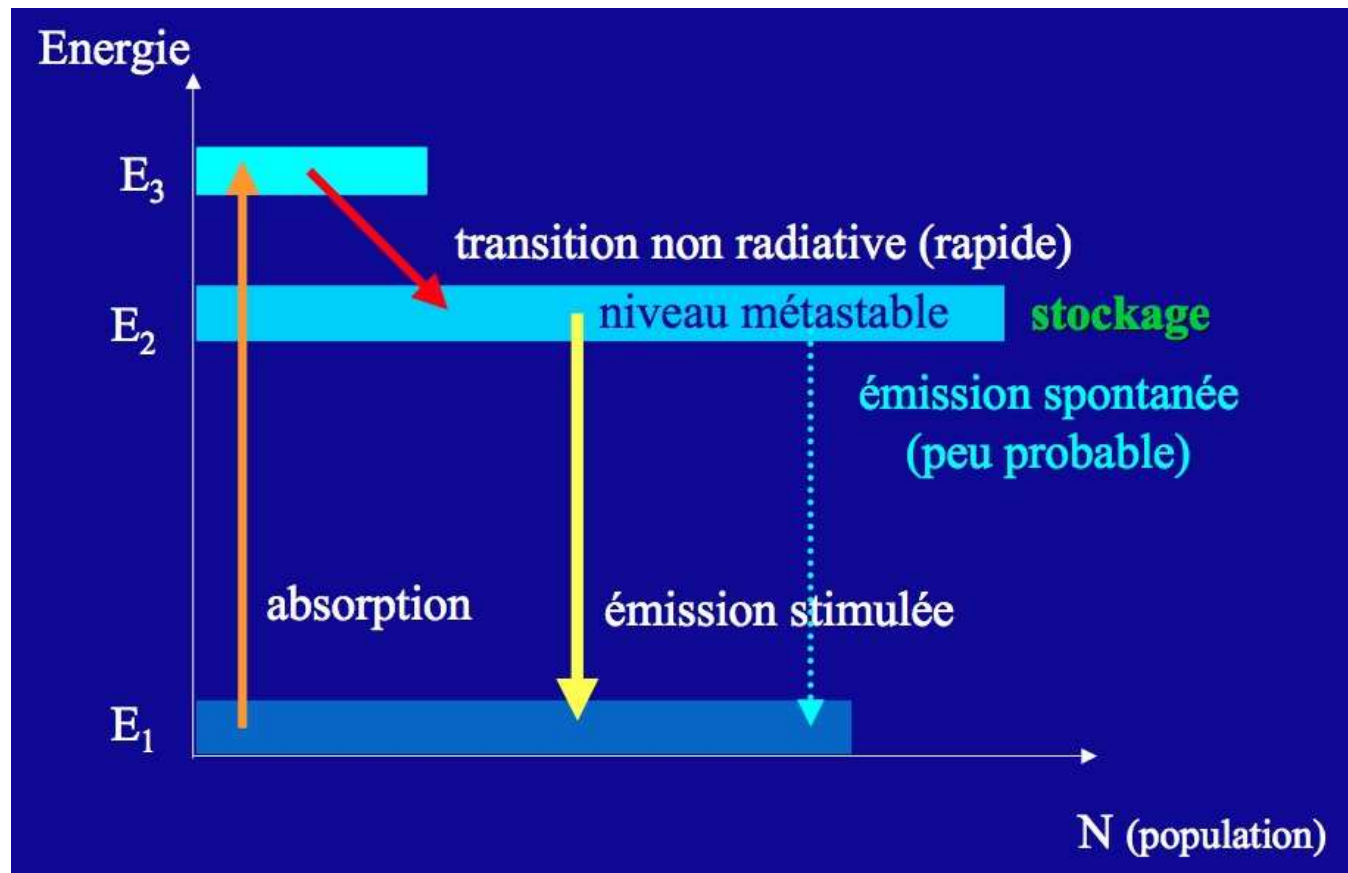
absorption

émission stimulée

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

# Méthodes de pompage

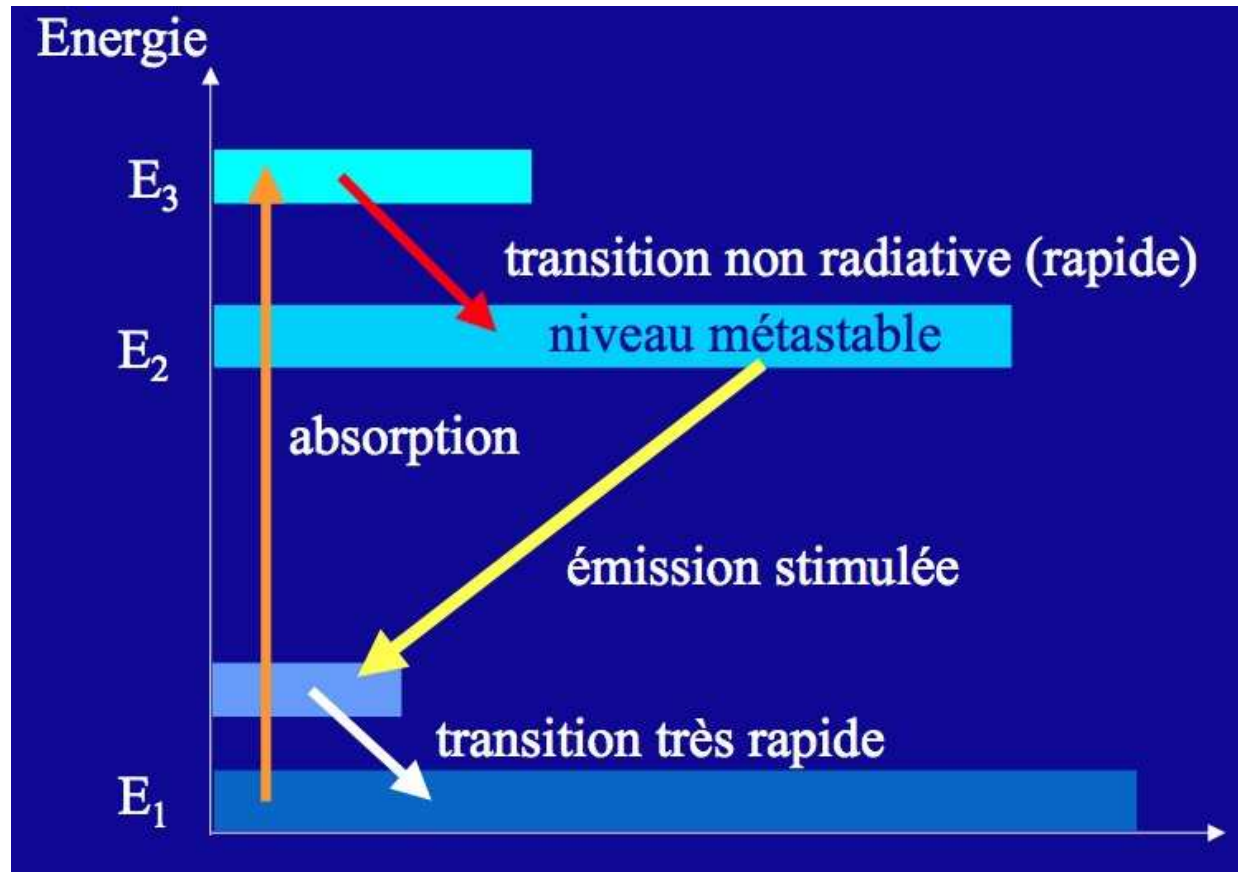
## ystème à trois niveaux



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

# Méthodes de pompage

## système à quatre niveaux



le plus employé : Nd:YAG, Er:YAG, CO<sub>2</sub>, Argon ...

# Méthodes de pompage

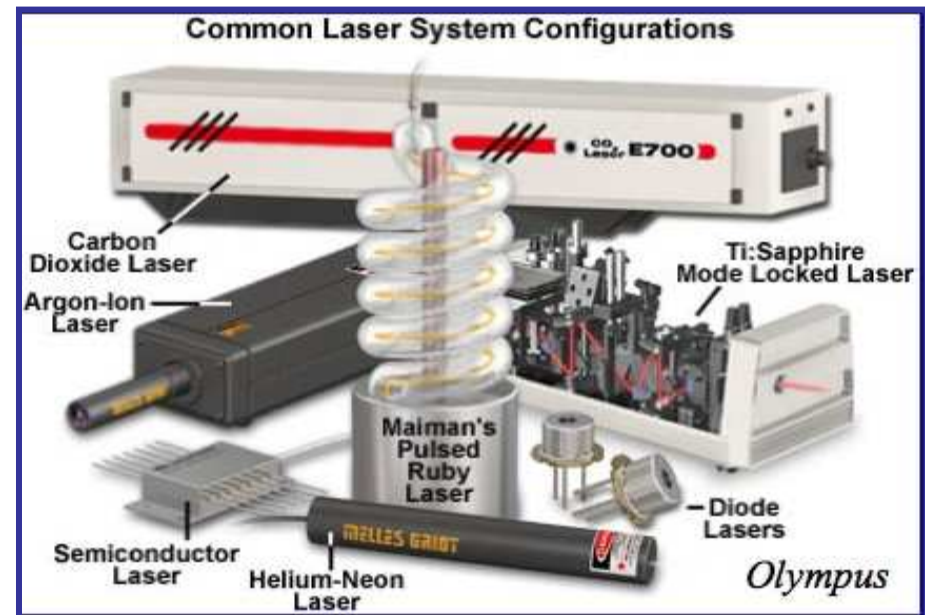
## quelques techniques de pompage

!! décharge électrique : lasers à gaz (Argon, He-Ne, CO<sub>2</sub> ...)

!! lampe flash : Nd:YAG pulsé

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

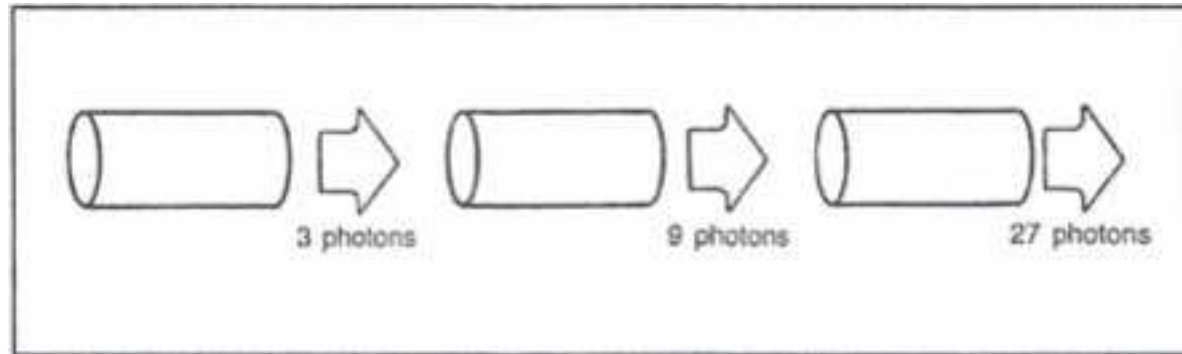
!! courant : diode-laser



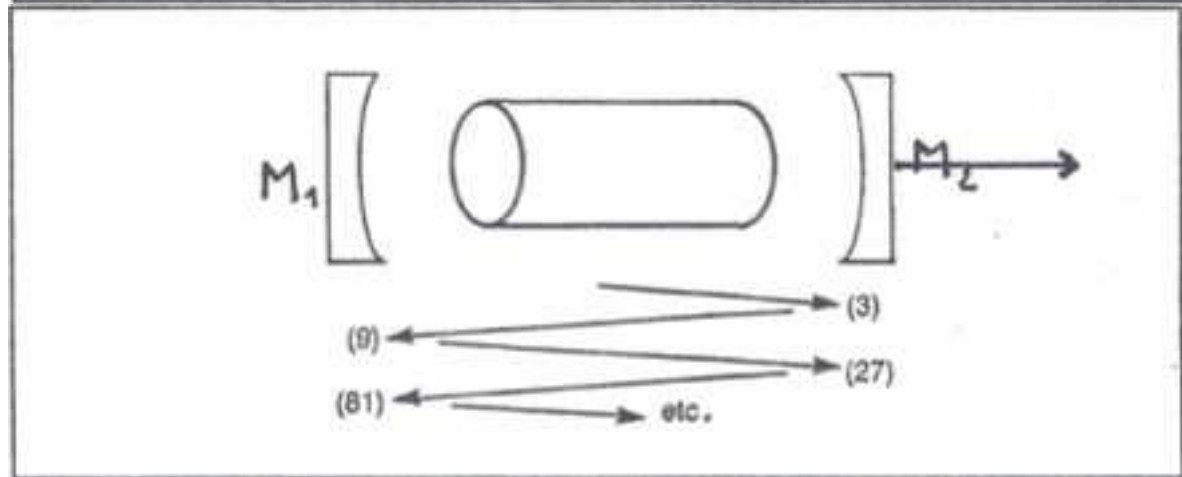
# De l'amplificateur au laser :

## le rôle du résonateur ou cavité pourquoi un résonateur?

**amplificateur**  
un seul passage



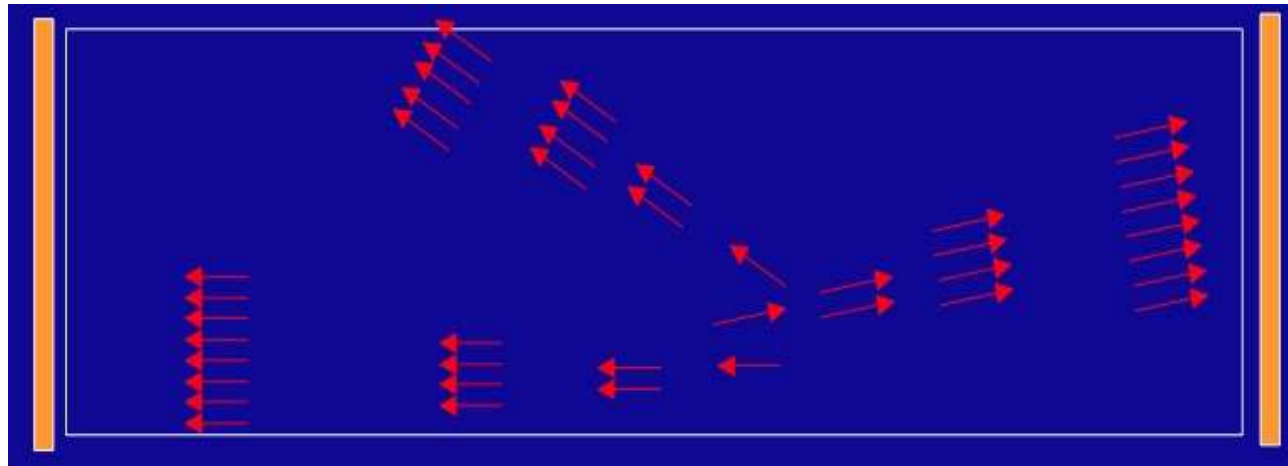
**résonateur**  
- Miroir  $M_1$  100%  
- Miroir  $M_2$  de sortie  
partiellement réfléchissant



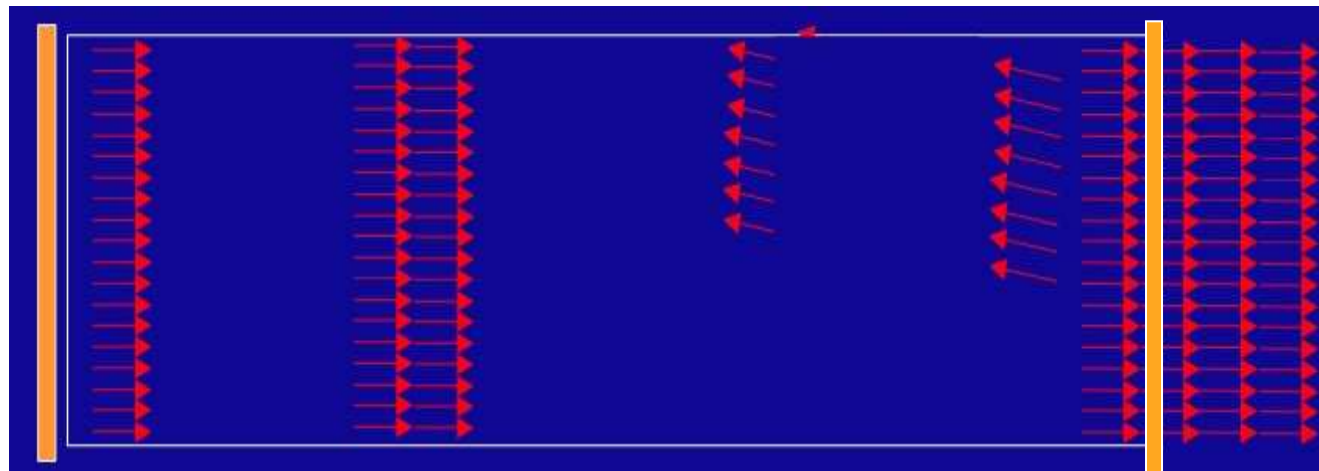
les miroirs permettent aux photons d'effectuer de nombreux allers-retours à travers le milieu actif, simulant de plus en plus d'émissions à chaque passage



# Le rôle du résonateur ou cavité



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

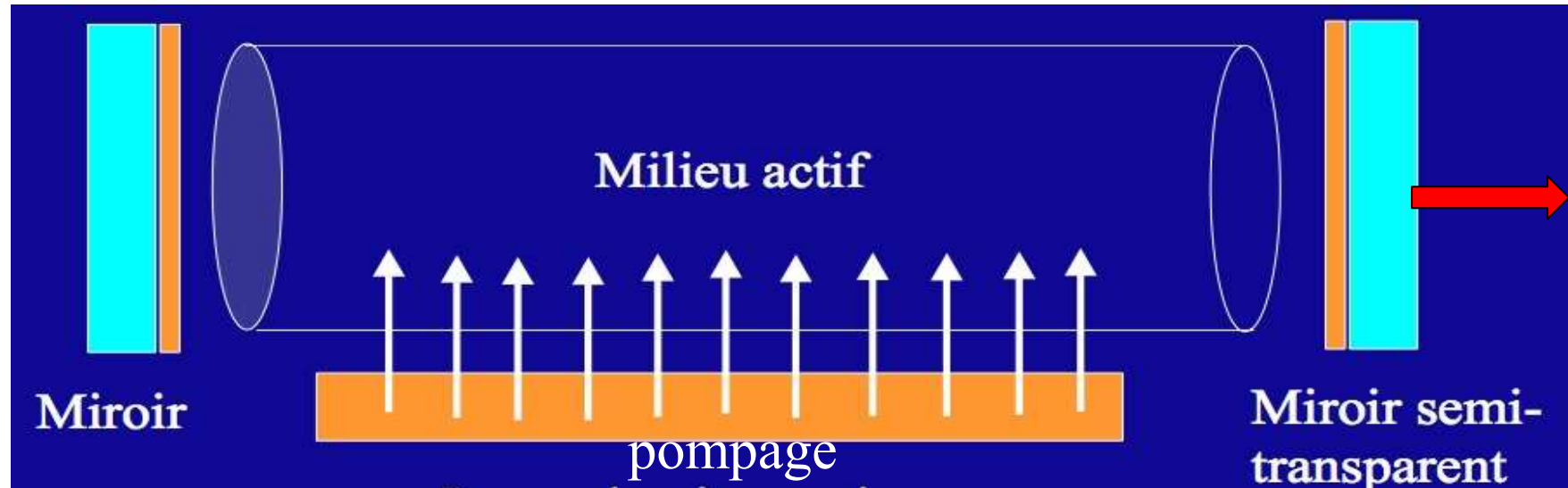


faisceau  
laser

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

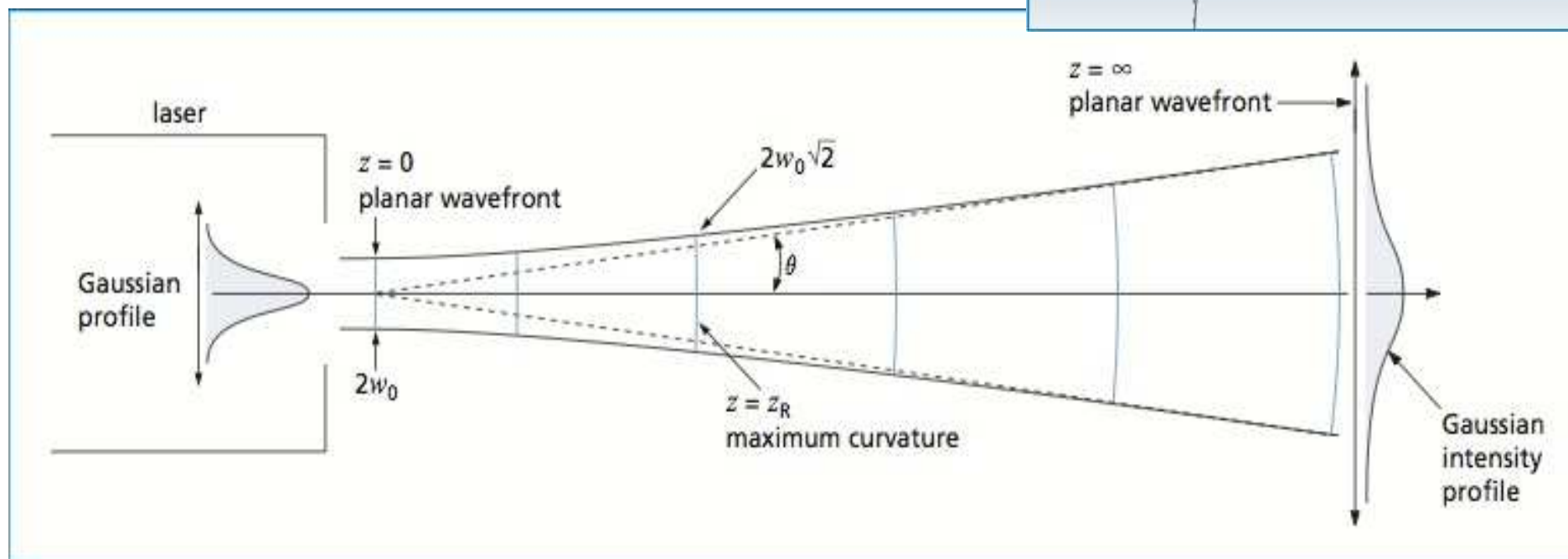
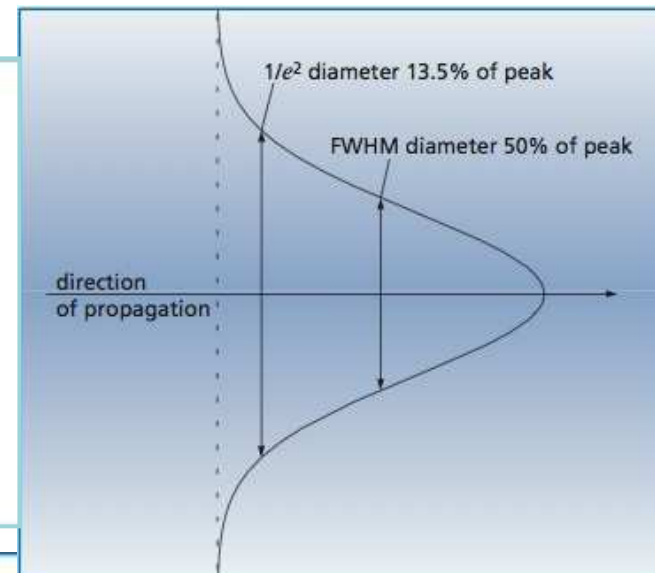
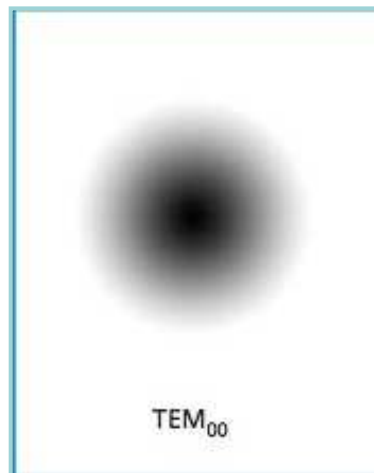
ces trois éléments sont toujours présents

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



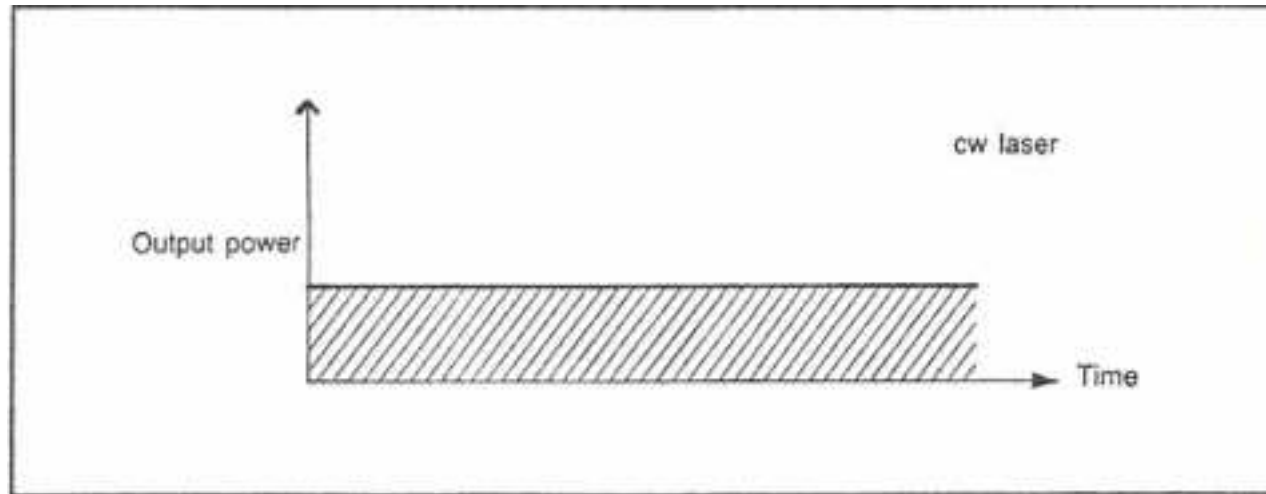
diffuseur cylindrique



ballonnet

exemple : diffuseurs développés par Medlight (Suisse)

# Modes de fonctionnement d'un laser : continu



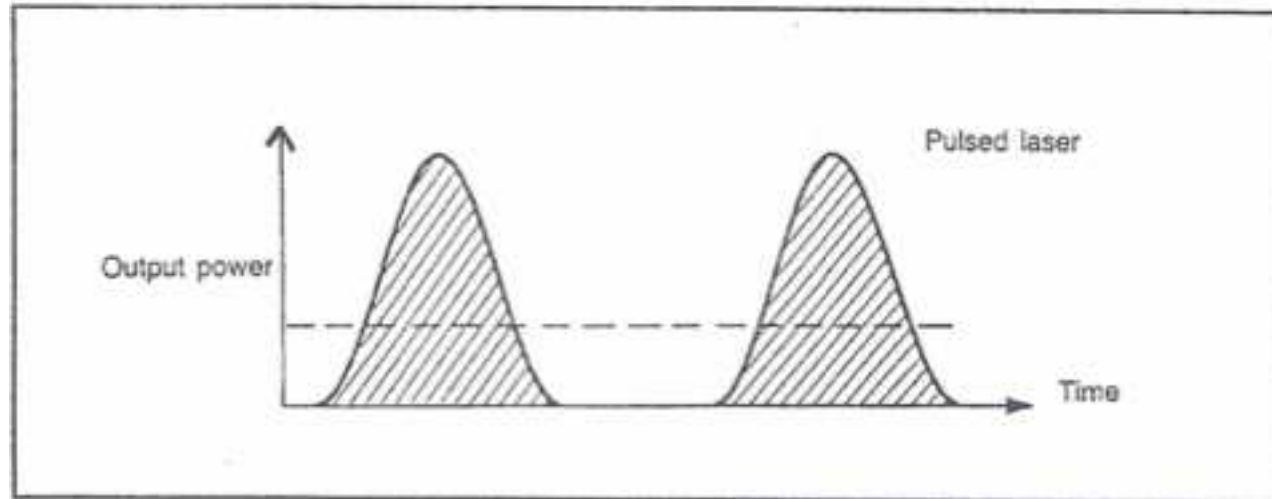
le flux d'énergie s'écoule de façon constante

**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, CO<sub>2</sub>, 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  $\tau$  (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

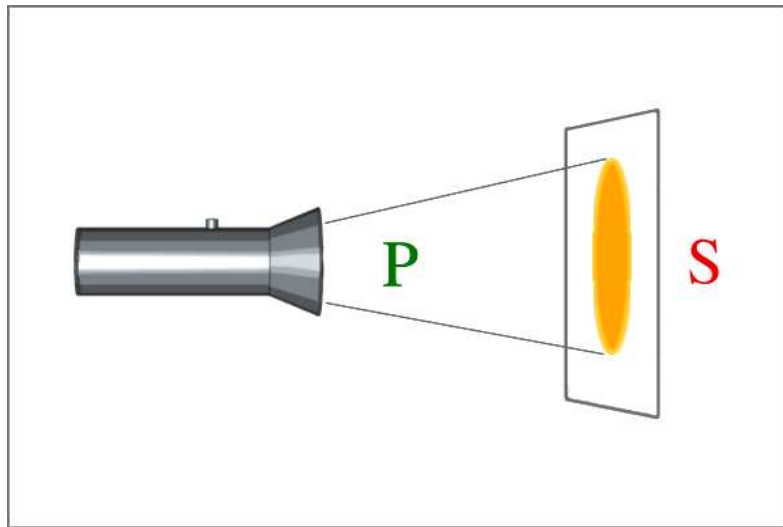
$\varepsilon = 100 \text{ mJ}$ ,  $\tau = 20 \text{ ns}$ ,  $f = 10 \text{ Hz}$



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

# Paramètres d'irradiation

Vitesse à laquelle l'énergie est délivrée au tissu



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

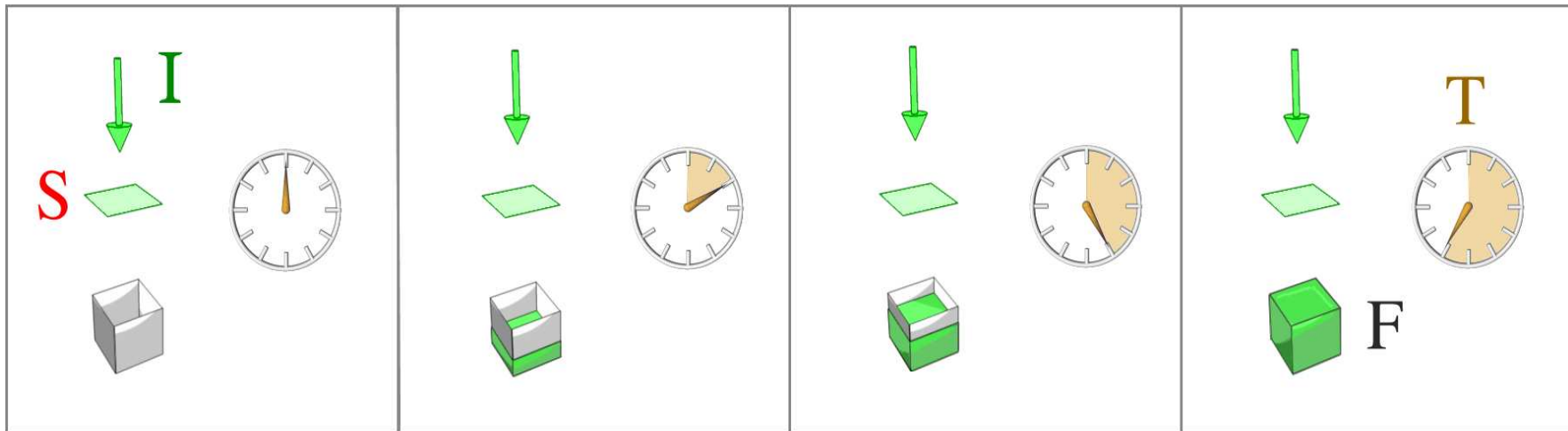
$$I = \frac{P}{S}$$

**Irradiance**

= puissance par unité de surface (W/cm<sup>2</sup>)

# 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/cm<sup>2</sup>)



# 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

$$F = I \times T$$