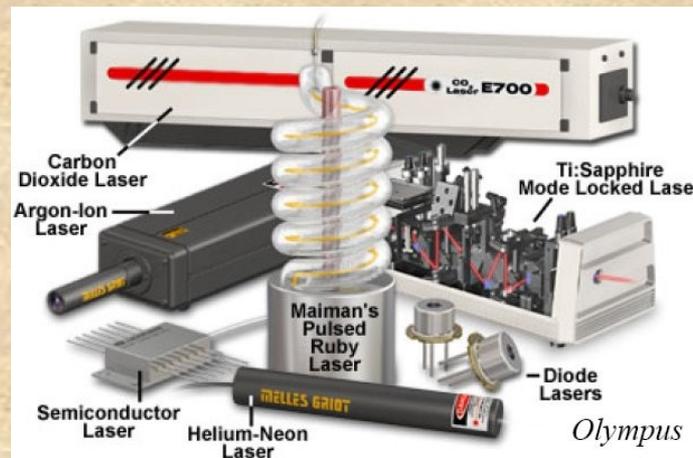


# Le Laser



# Sommaire

## I - Interaction lumière - matière

Spectres

Processus d'absorption et d'émission

Phénomène laser

## II - Conditions pour obtenir un faisceau laser

Inversion de population

Pompage

Cavité

## III - Caractéristiques du faisceau laser

Le faisceau dans la cavité

Propagation du faisceau laser

# Comment caractériser l'énergie ?

Énergie (E) : Joule [J] ou électronvolt [eV]

Longueur d'onde ( $\lambda$ ) : mètre [m] ou angström [Å]

Fréquence (f ou  $\nu$ ) : Hertz [Hz]

Nombre d'onde ( $\sigma$ ) : [cm<sup>-1</sup>]

Température (T) : Kelvin [K]

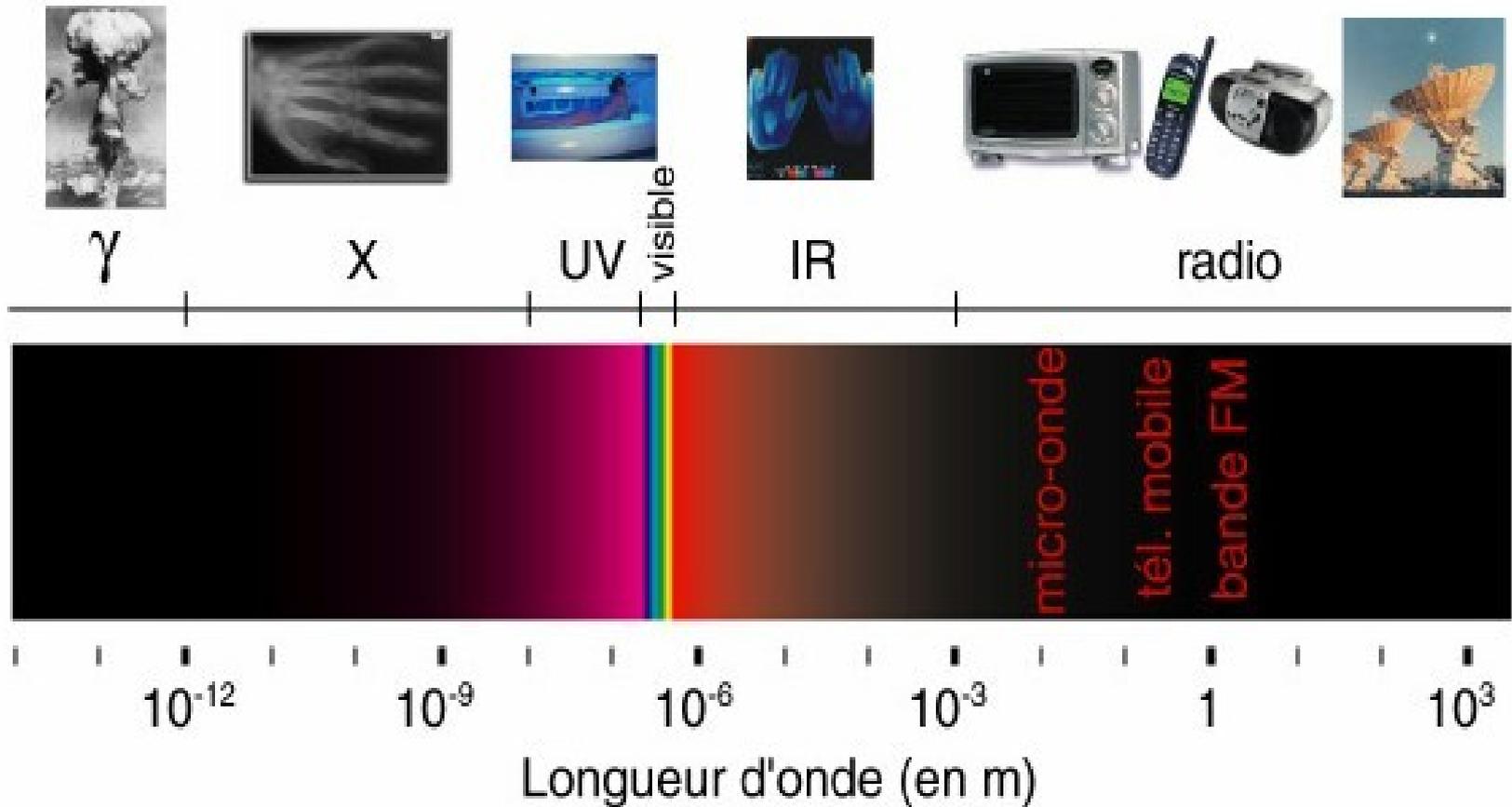
Puissance (P) : Watt [W]

Densité de puissance ( $\omega$  ou I) : [W m<sup>-2</sup>]

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

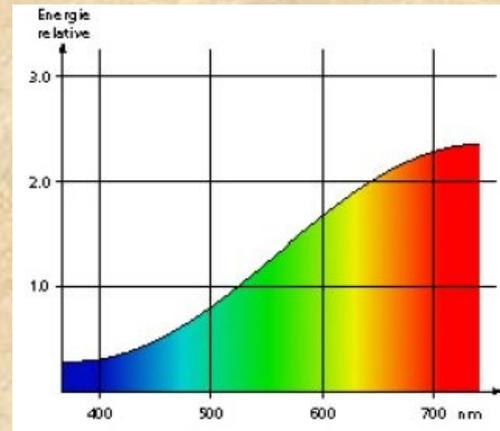
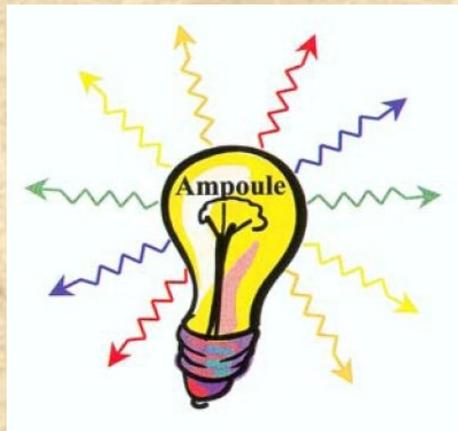
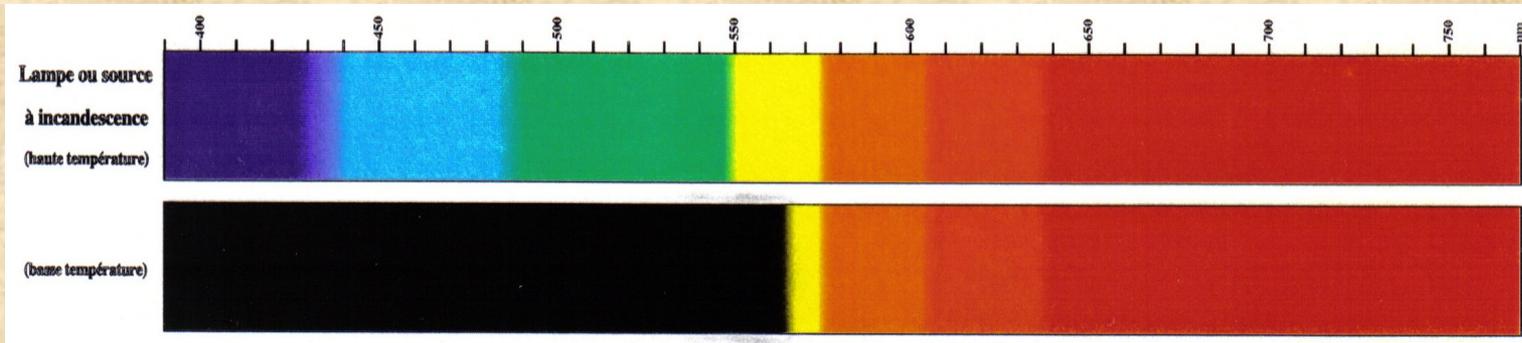
$$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J s} ; k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1} ; c = 299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$$

# Spectre = décomposition de la lumière



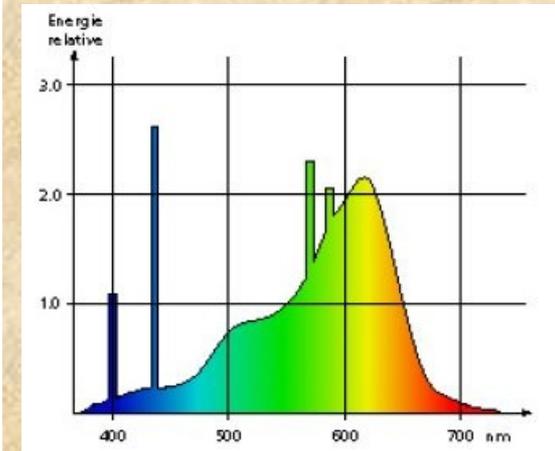
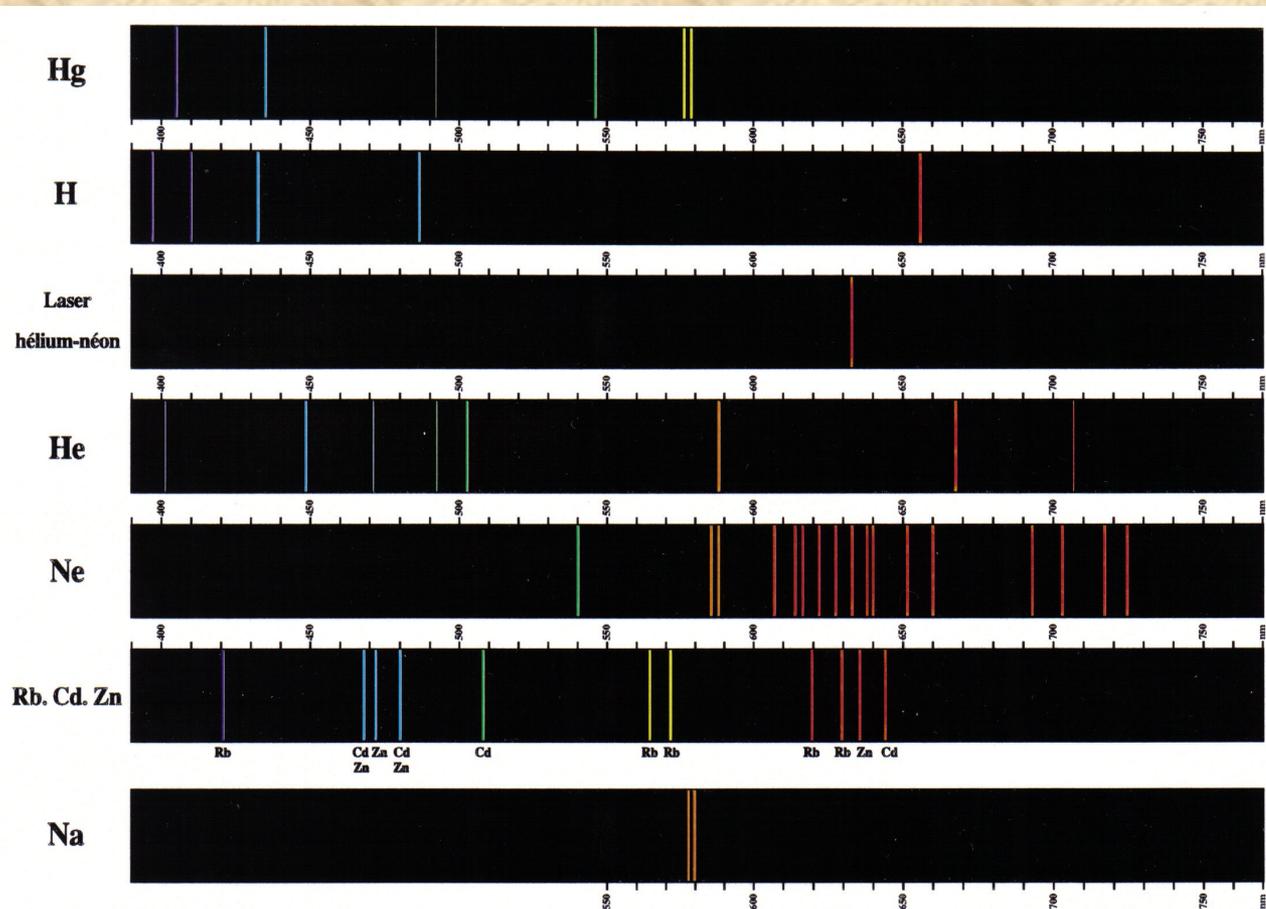
# Allure des spectres

## Spectre continu



# Allure des spectres

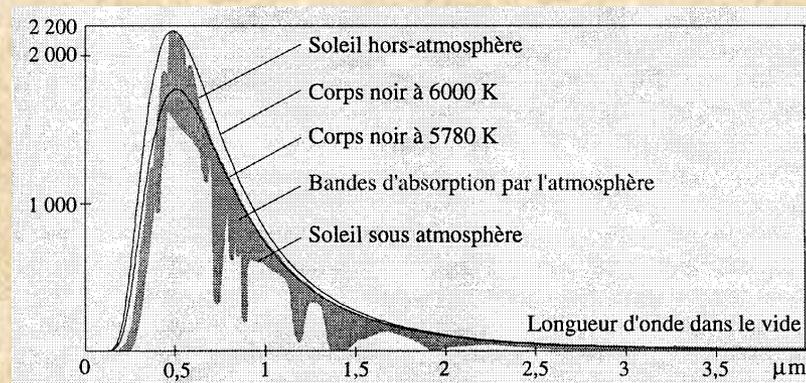
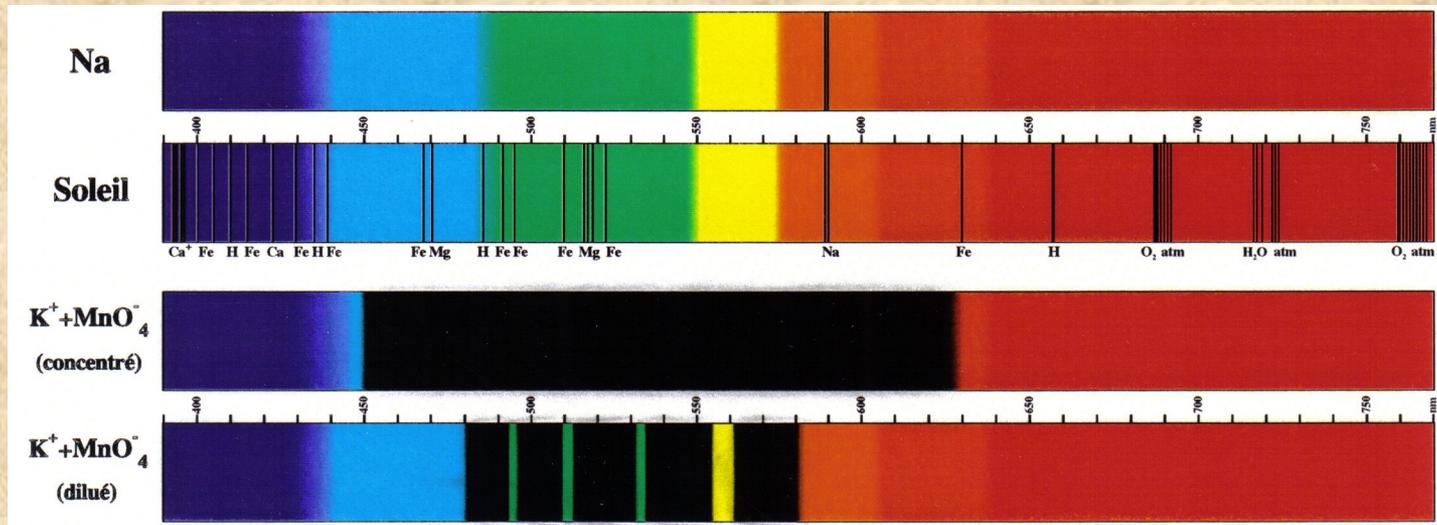
## Spectre d'émission (traits colorés sur fond sombre)



Tube fluorescent  
néon

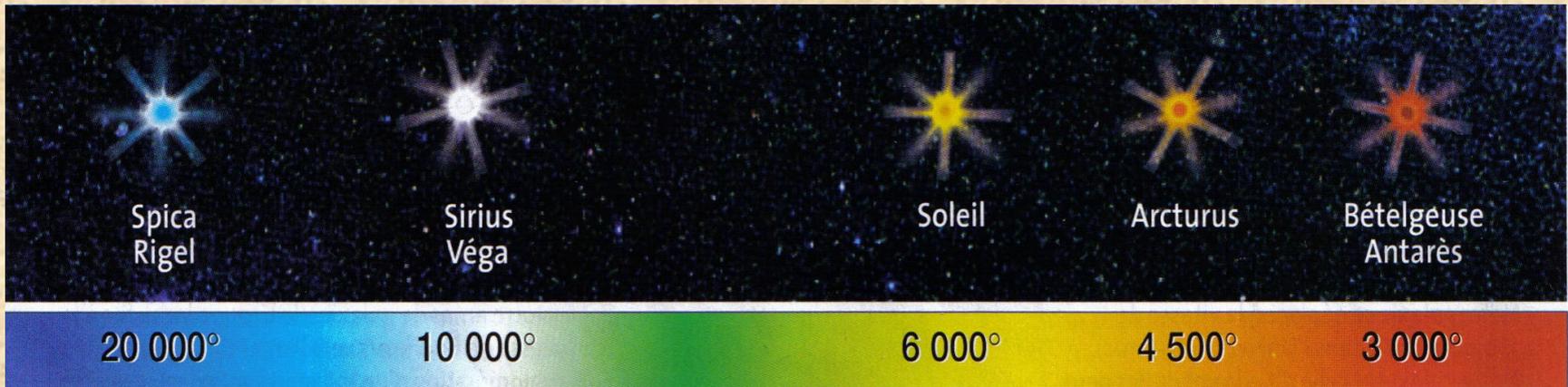
# Allure des spectres

## Spectre d'absorption (traits sombres sur fond coloré)



# La lumière

La couleur est une manifestation de la température, d'une quantité d'énergie donnée :  $\lambda.T \approx 3000 \mu\text{m.K}$



**Terre, corps humain**

**Infrarouge**

**T  $\approx$  300 K**

**Rayonnement fossile**

**$\lambda = 1 \text{ mm}$**

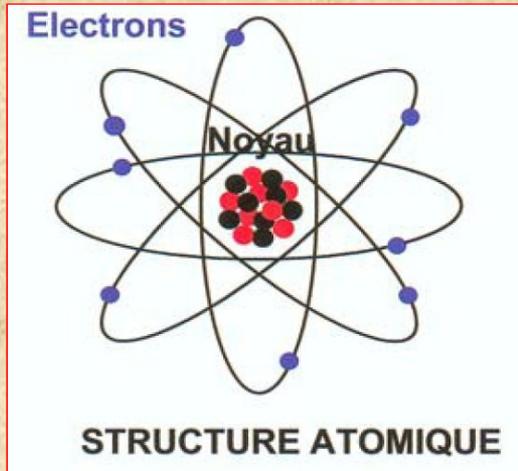
**T  $\approx$  3 K**

**Événements violents**

**Rayons  $\gamma$**

**T  $\approx$   $10^8$  K**

# Niveaux d'énergie



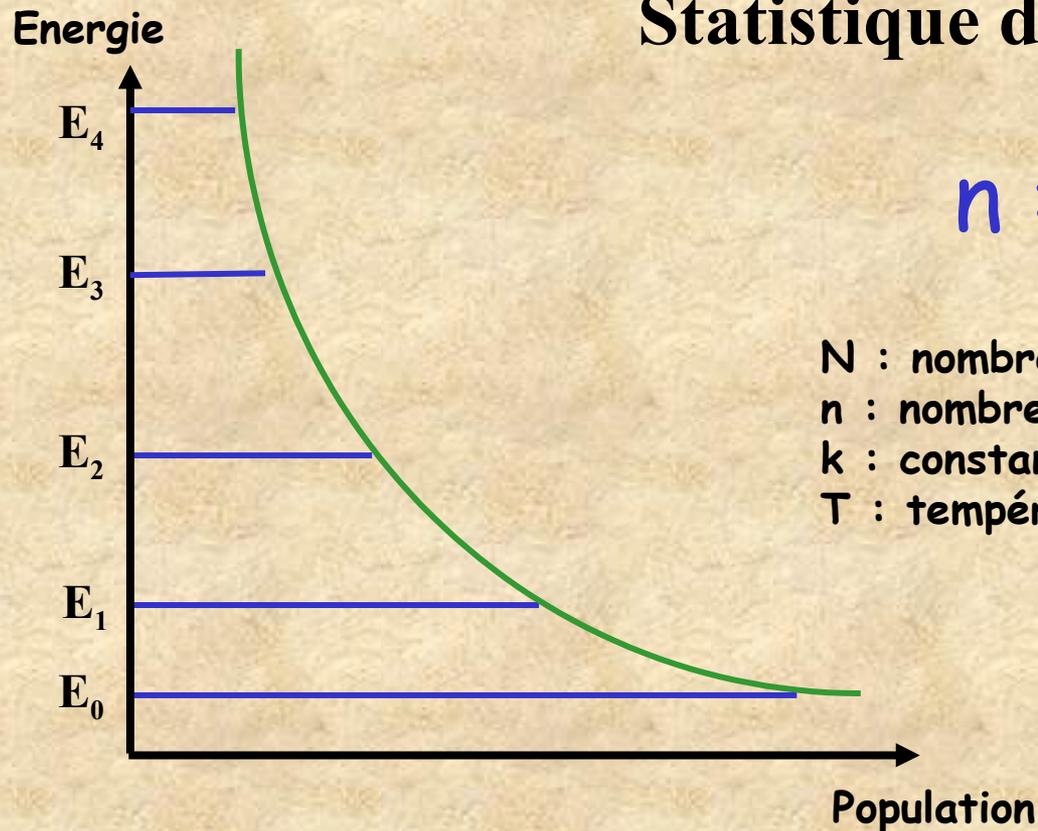
L'atome possède une certaine énergie qui dépend de la disposition des électrons par rapport au noyau

Toute les dispositions n'existent pas. Seules sont possibles certaines d'entre elles : **ETATS**

Les énergies correspondant à ces états sont représentées en **NIVEAUX FONDAMENTAL** et **EXCITES**



# Répartition des atomes par niveaux d'énergie



Statistique de Maxwell - Boltzmann

$$n = N e^{-E/kT}$$

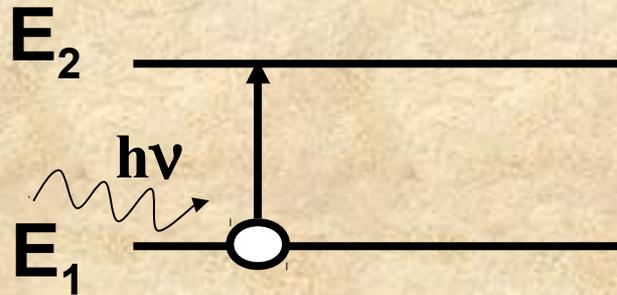
$N$  : nombre total d'atomes

$n$  : nombre d'atomes possédant l'énergie  $E$

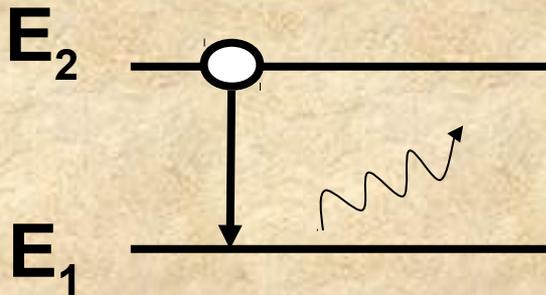
$k$  : constante de Boltzmann

$T$  : température absolue

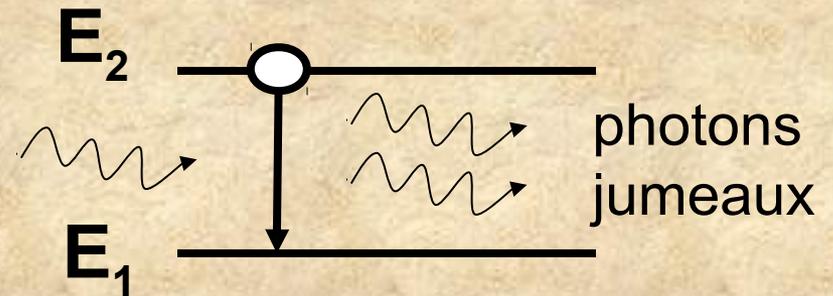
# Comment passer d'un niveau à un autre ?



Absorption  $E_2 - E_1 = h\nu$



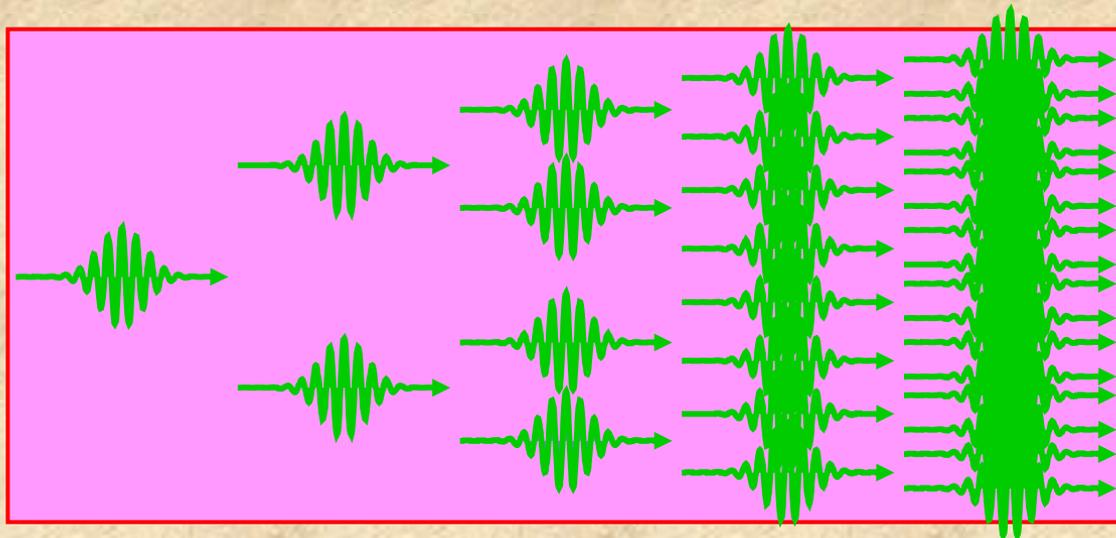
Émission spontanée



Émission stimulée  
(Einstein)

# L. A. S. E. R.

Light Amplification  
by  
Stimulated Emission of Radiation



# Conditions pour obtenir un rayonnement laser

L'onde doit voyager le plus possible dans le milieu amplificateur

## CAVITE



Un laser ne peut fonctionner que si l'intensité du faisceau croît sur un aller-retour dans la cavité :

$$I_3 \geq I_0$$

# Conditions pour obtenir un rayonnement laser

L'émission stimulée doit compenser l'absorption qui fait disparaître les photons d'énergie  $E_2 - E_1$

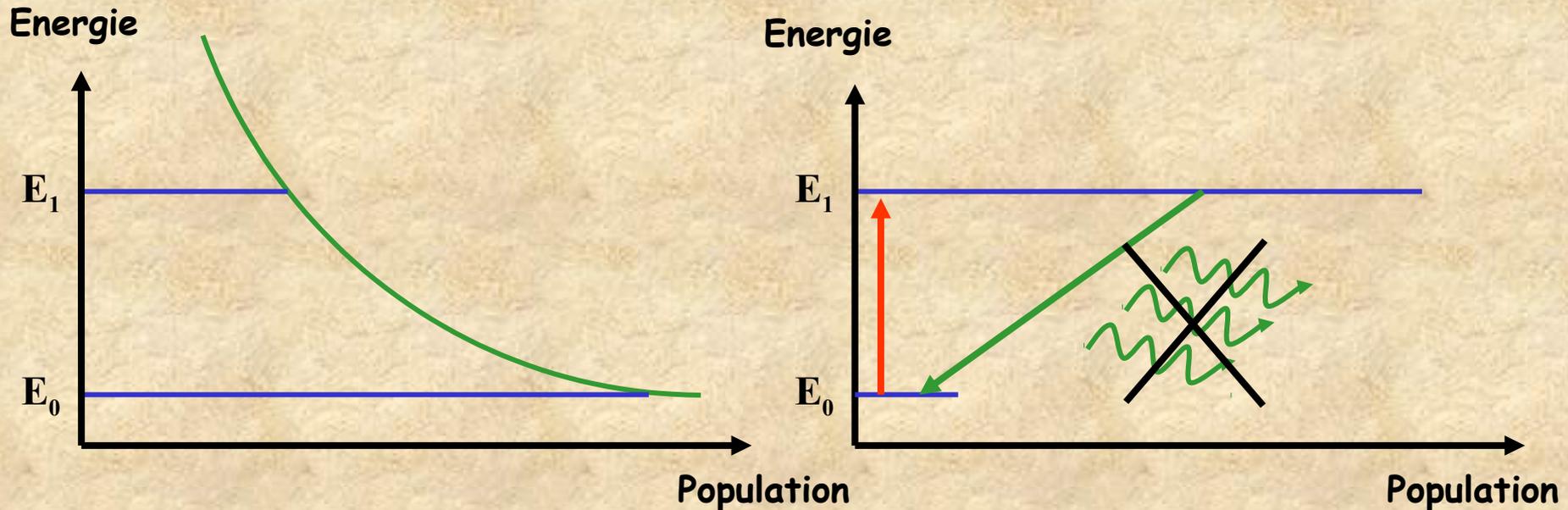


Il faut donc plus d'atomes sur le niveau  $E_2$  que sur le niveau  $E_1$   
« INVERSION DE POPULATION »

## POMPAGE

# Le pompage

C'est le remplissage du niveau  $E_1$  au dépens du niveau  $E_0$



$$\Delta N = \frac{N}{1 + I / I_{sat}}$$

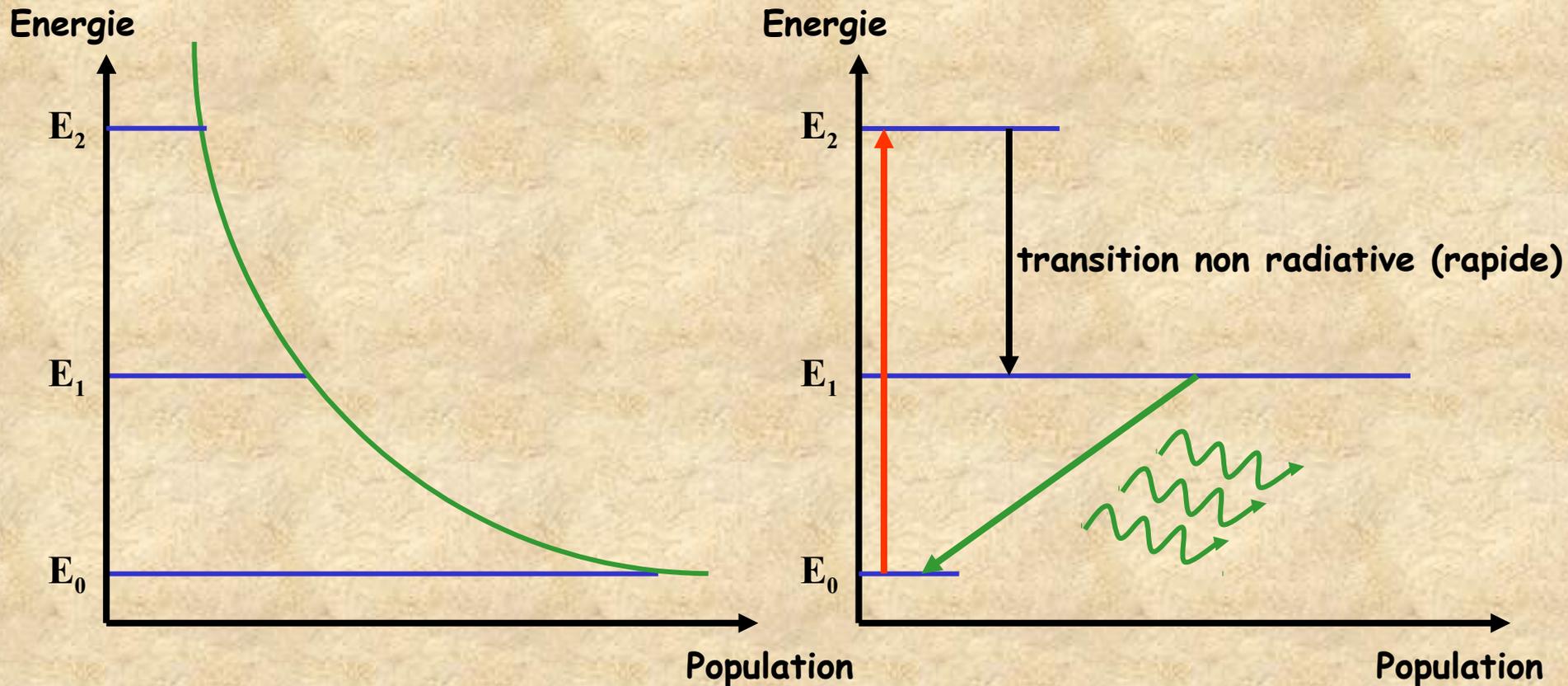
**Il est impossible de créer l'inversion de population (au mieux il y a égalité).**

$$\Delta N = N_0 - N_1 \quad I_{sat} = A / 2B$$

**Systeme à deux niveaux**

# Le pompage

C'est le remplissage du niveau  $E_1$  au dépens du niveau  $E_0$



**Systeme à trois niveaux**

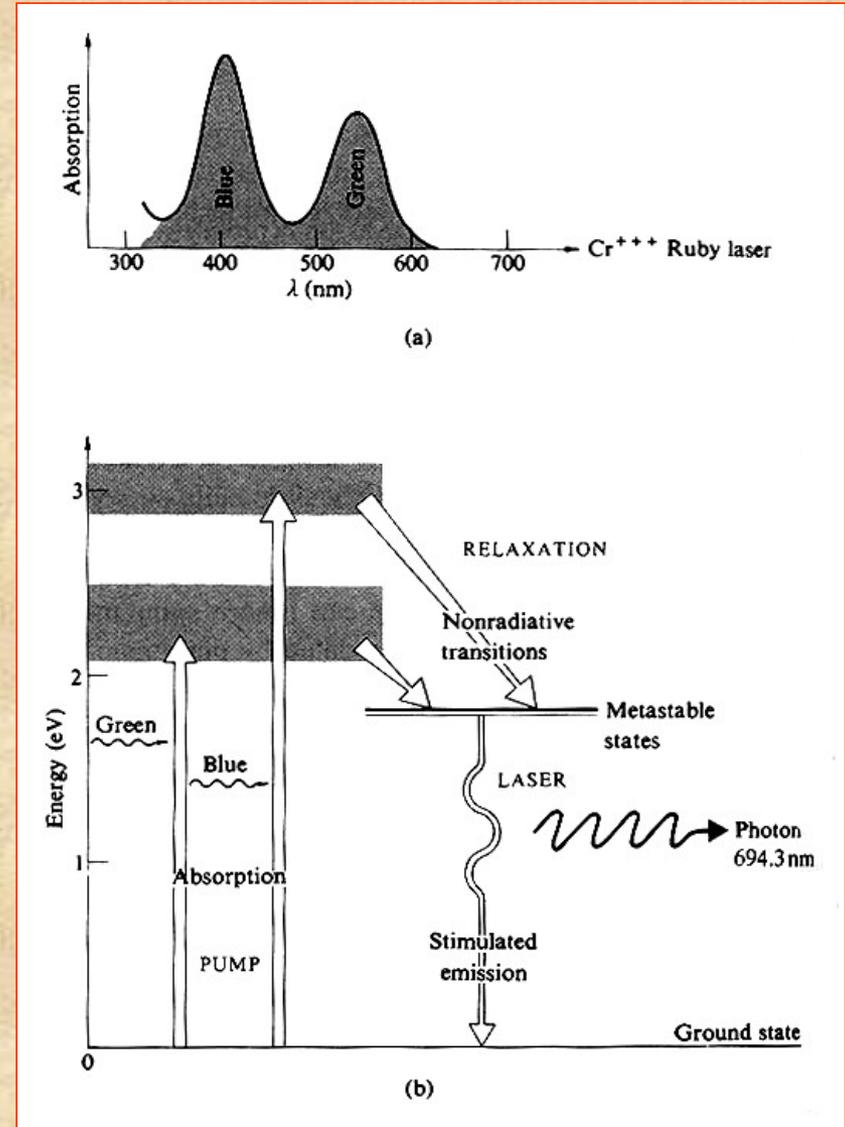
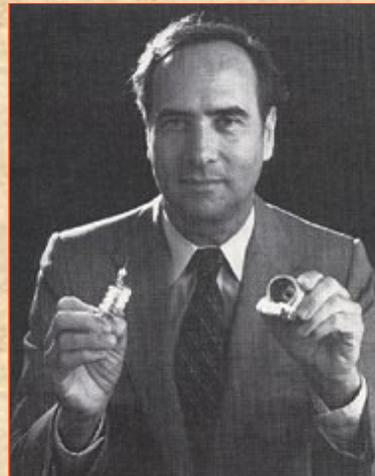
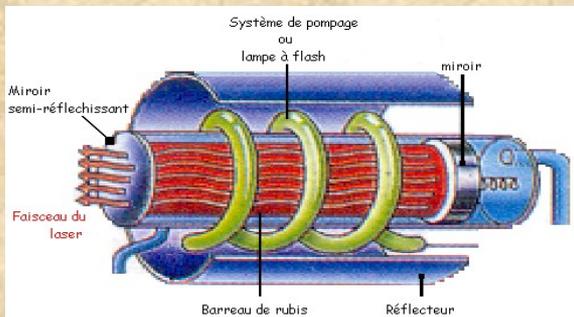
# Le pompage

Le laser à rubis est un système à trois niveaux.

Le pompage  $I$  doit être assez intense pour créer l'inversion de population.

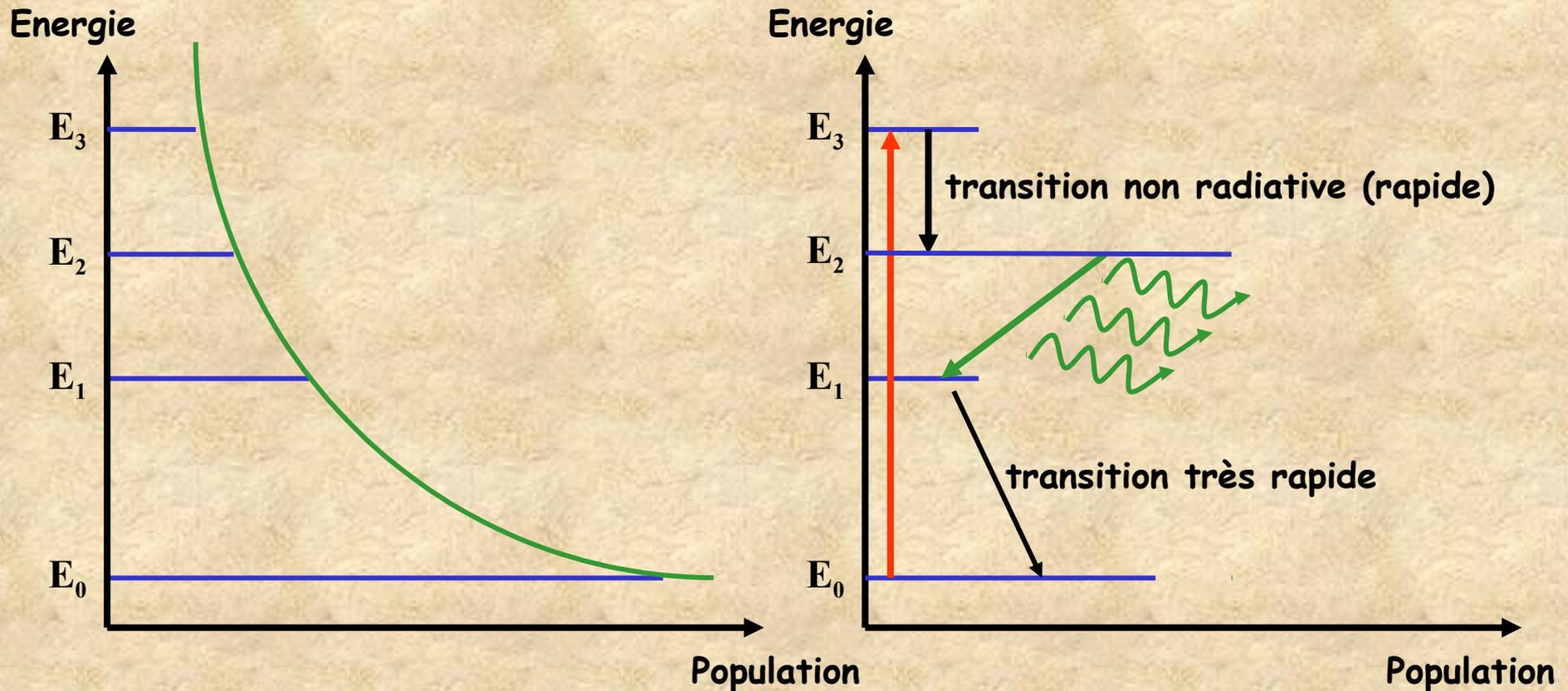
$$\Delta N = N \frac{1 - I/I_{sat}}{1 + I/I_{sat}}$$

$$I_{sat} = A/B$$



# Le pompage

C'est le remplissage du niveau  $E_2$  au dépens du niveau  $E_1$



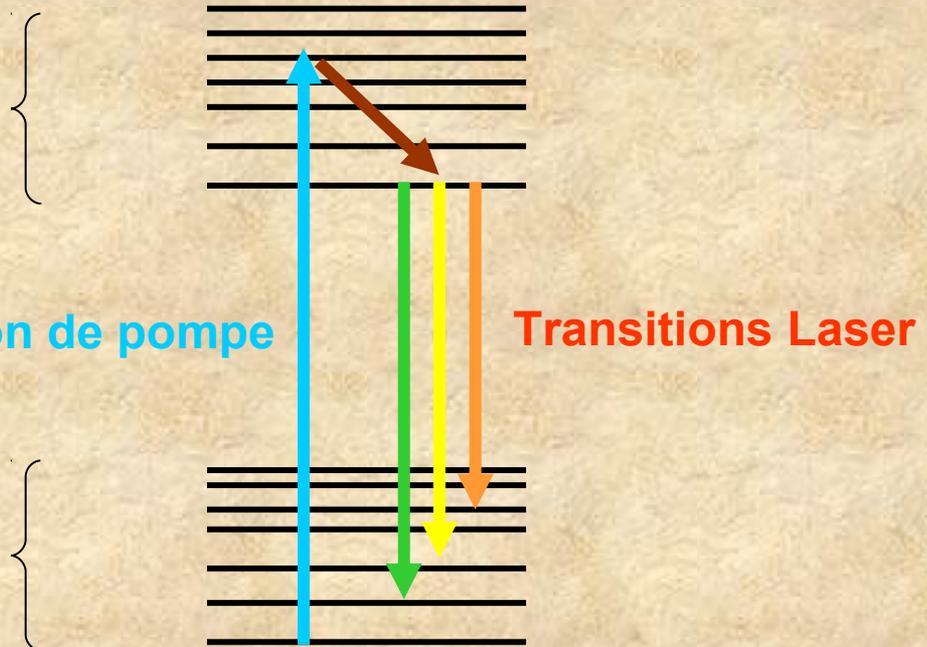
**Systeme à quatre niveaux**

# Le pompage

$S_1$ : 1<sup>er</sup> état excité  
électronique

Transition de pompe

$S_0$ : état électronique  
fondamental



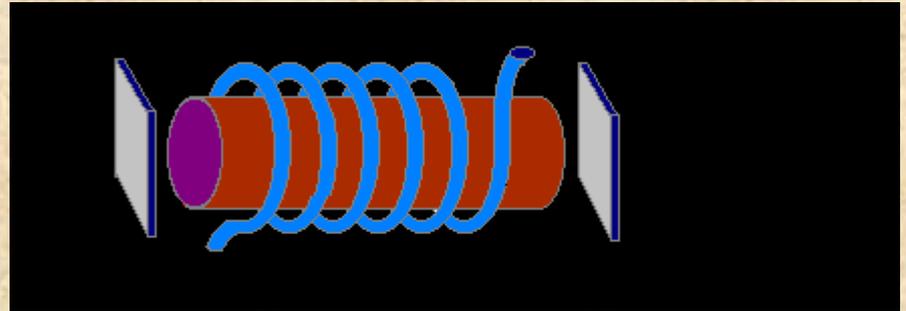
Le laser à colorant est un système à quatre niveaux.  
L'inversion de population est toujours réalisée (d'où un pompage moins intense).

$$\Delta N = -N \frac{I / I_{sat}}{1 + I / I_{sat}} \quad I_{sat} = A / B$$

# Pompage optique

Une onde électromagnétique éclaire les atomes du niveau  $E_0$

- Laser solide



## le laser à rubis

Milieu actif :  $\text{Cr}^{3+}$

Cristal : alumine

$\lambda = 0,6943 \mu\text{m}$

## le laser à néodyme (YAG)

Milieu actif :  $\text{Nd}^{3+}$

Cristal : Yttrium Aluminium Grenat

$\lambda = 1,064 \mu\text{m}$

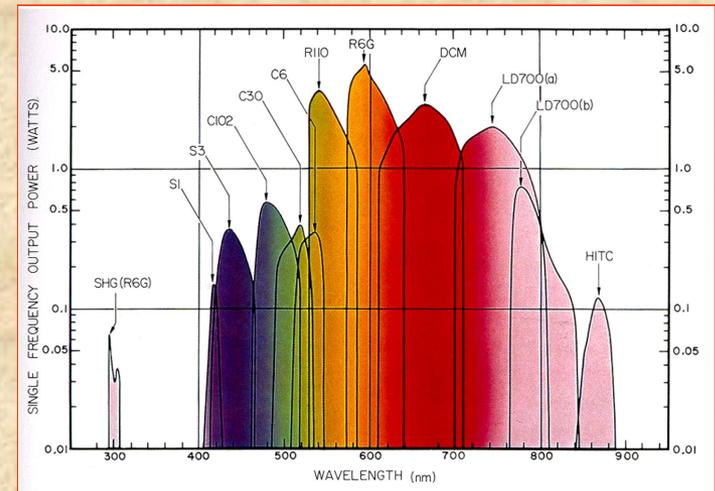
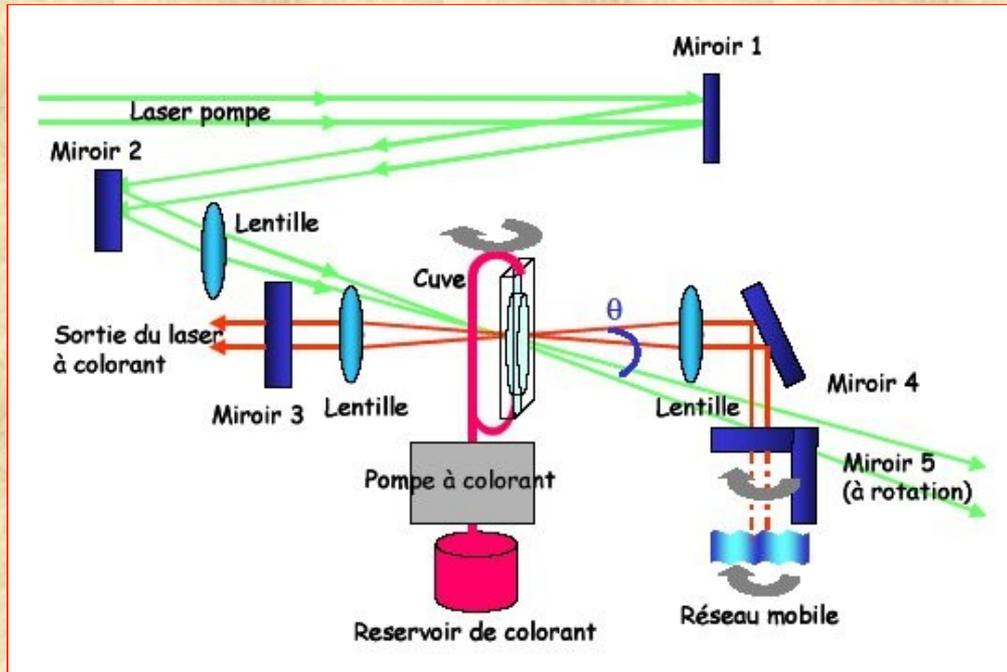
- Laser moléculaire infrarouge lointain

***SECURITE : les sources de pompage doivent être puissantes***

# Pompage optique

- le laser à colorant (dye laser)

Les colorants possèdent une très grande quantité de niveaux d'énergie très proches les uns des autres : **niveau continu d'énergie**



Le laser de pompe est un laser  $Ar^+$  ou un laser Nd-YAG.

Le réseau permet de sélectionner la longueur d'onde.

Le spectre d'émission couvre la gamme 0,35 à 0,9  $\mu m$ .

# Pompage par excitation électronique

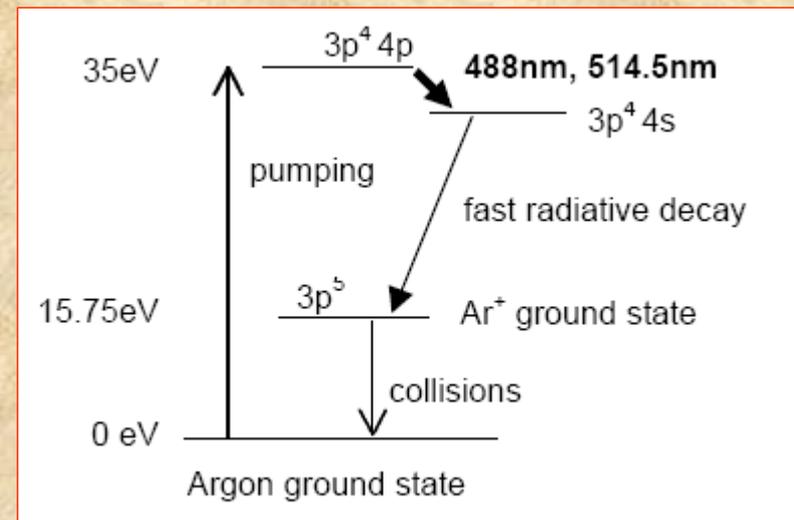
Un gaz est soumis à un champ électrique très fort : certains atomes sont ionisés.

Les électrons arrachés peuvent entrer en collision avec les atomes et leur céder une partie de leur énergie.

- **Laser à argon**

**Ionisation :**  $(\text{Ar}) \xrightarrow{\text{E}} \text{Ar}^+ + \text{e}^-$

**Excitation :**  $\text{Ar} + \text{e}^- \rightarrow \text{Ar}^* + \text{e}^-$



**SECURITE : décharge électrique : quelques A, quelques kV**

# Pompage par transfert d'excitation

Le gaz est excité à la suite de collisions avec des atomes excités électriquement.

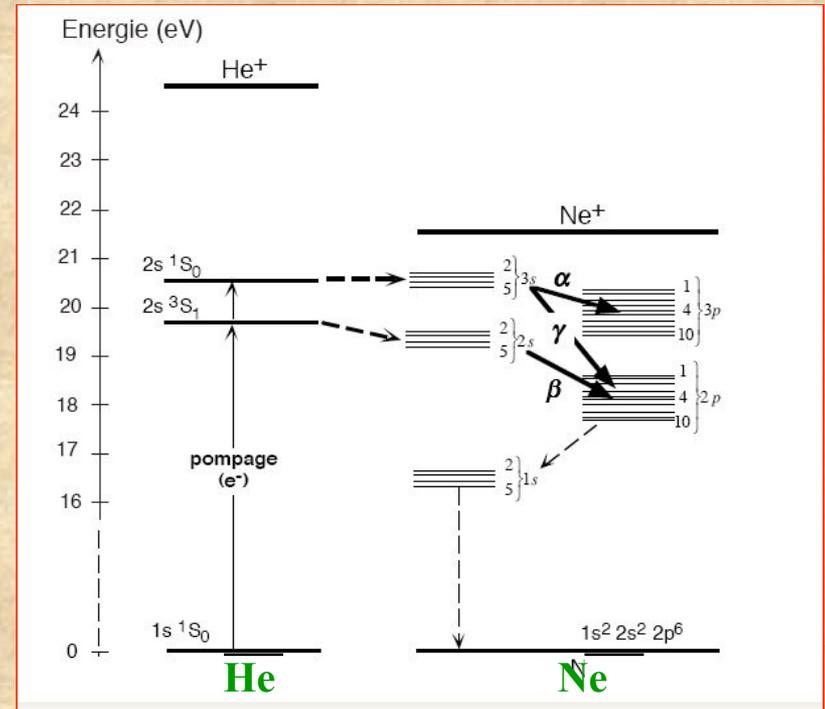
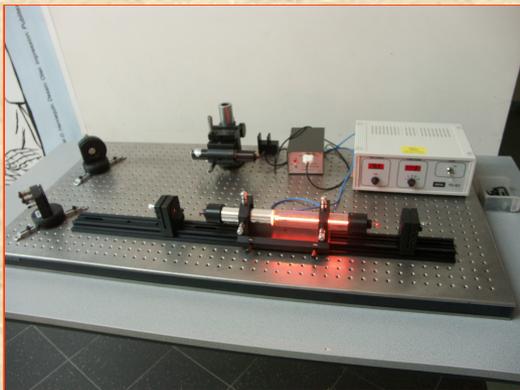
- Laser Hélium Néon

Hélium excité électriquement  
Néon pompé par choc

$$\alpha = 3,39 \mu\text{m}$$

$$\beta = 1,15 \mu\text{m}$$

$$\gamma = 0,6328 \mu\text{m}$$



# Pompage par transfert d'excitation

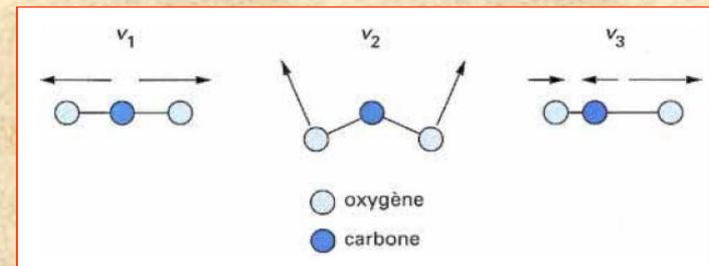
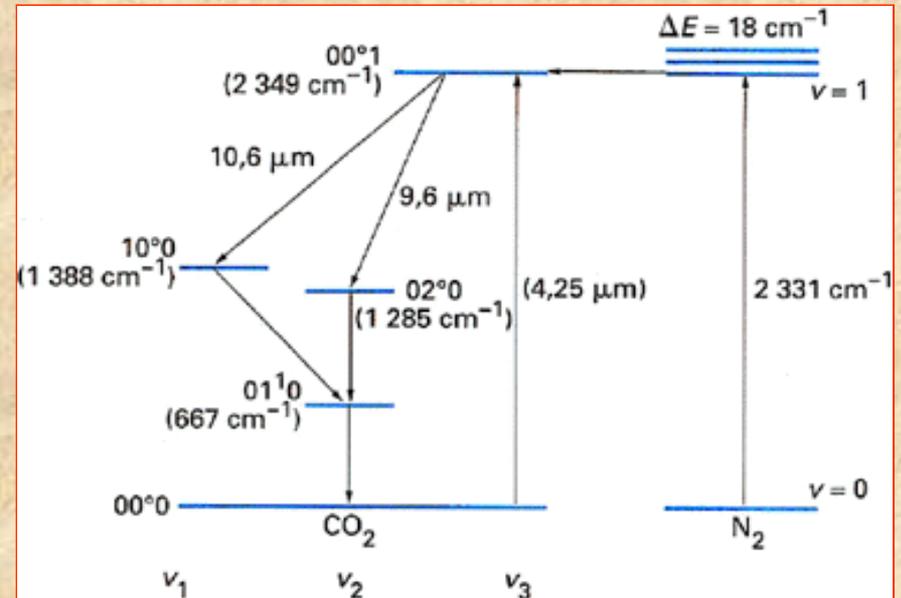
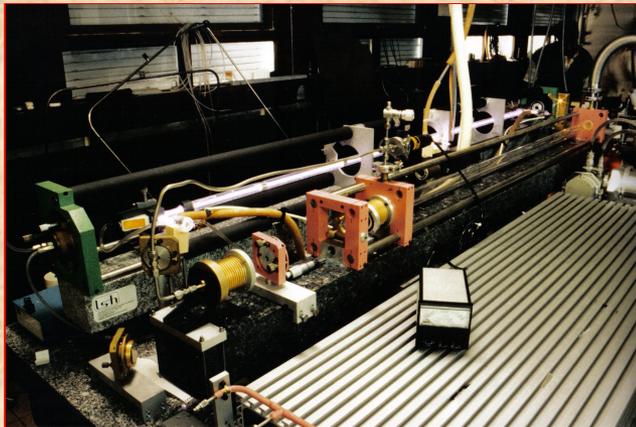
Le gaz est excité à la suite de collisions avec des atomes excités électriquement.

- Laser à gaz carbonique

Azote excité électriquement

CO<sub>2</sub> pompé par chocs

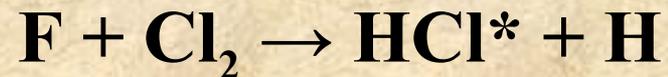
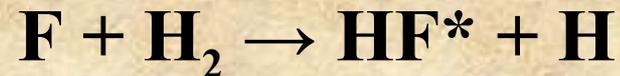
Hélium



# Pompage chimique

Au terme d'une réaction chimique exothermique, la molécule formée n'est pas dans une configuration stable. Elle peut la retrouver en émettant un photon.

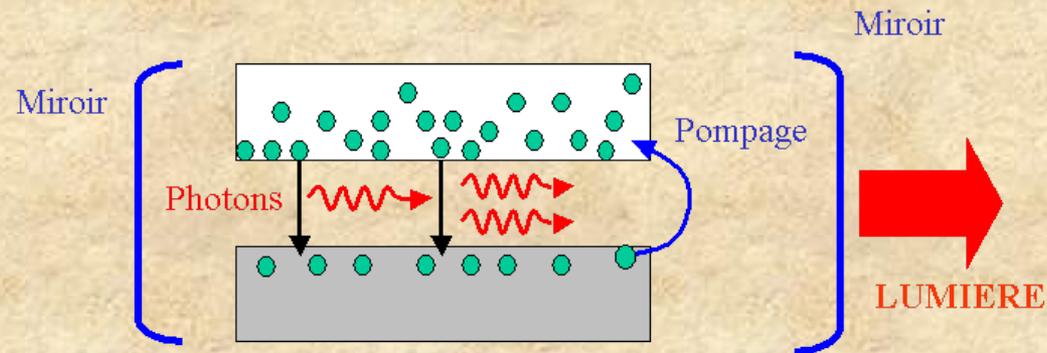
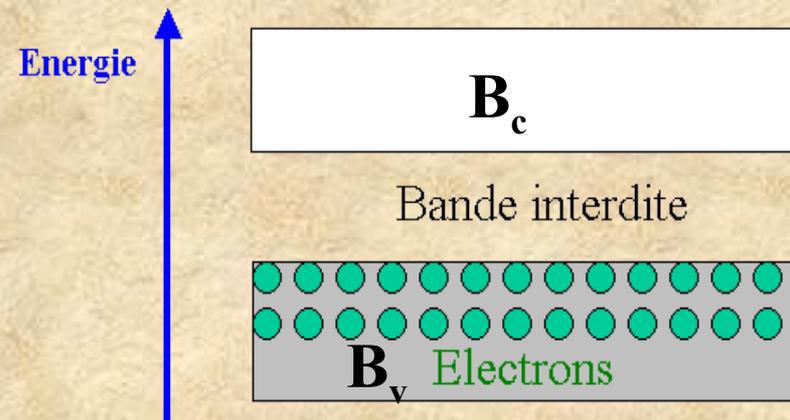
- Mélange gaz réactif + gaz inerte



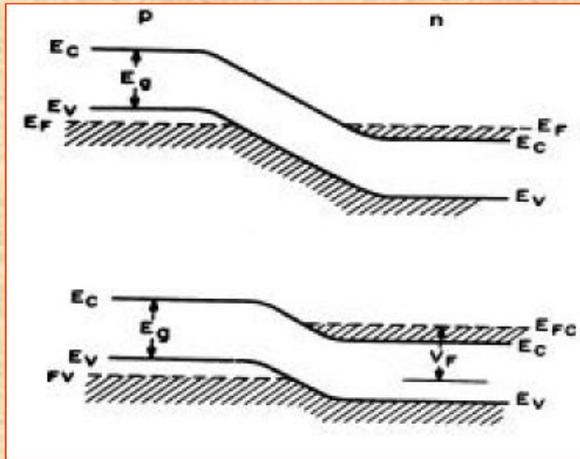
# Pompage dans un semi-conducteur

Cristal dans lequel on a injecté des atomes différents  
→ excès d'électrons (n) ou défaut d'électrons (p)

Les électrons du matériau occupent des **BANDES D'ENERGIE** (distribution quasi continue de niveaux d'énergie très proches)



# Pompage par passage d'un courant dans une diode



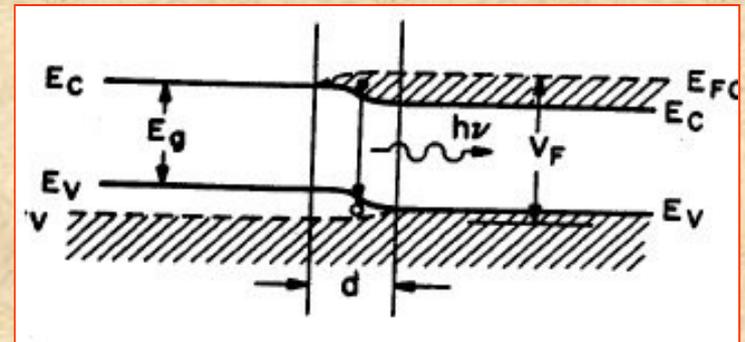
On réunit deux semi-conducteurs, l'un dopé p, l'autre dopé n.

La jonction est une zone neutre. Les électrons en excès de la zone n ne peuvent pas traverser cette jonction.

**ON CREE UN COURANT → Décalage des bandes d'énergie**

Au voisinage de la jonction, les électrons occupant la bande de conduction côté n se trouvent à côté d'emplacements libres dans la bande de valence côté p.

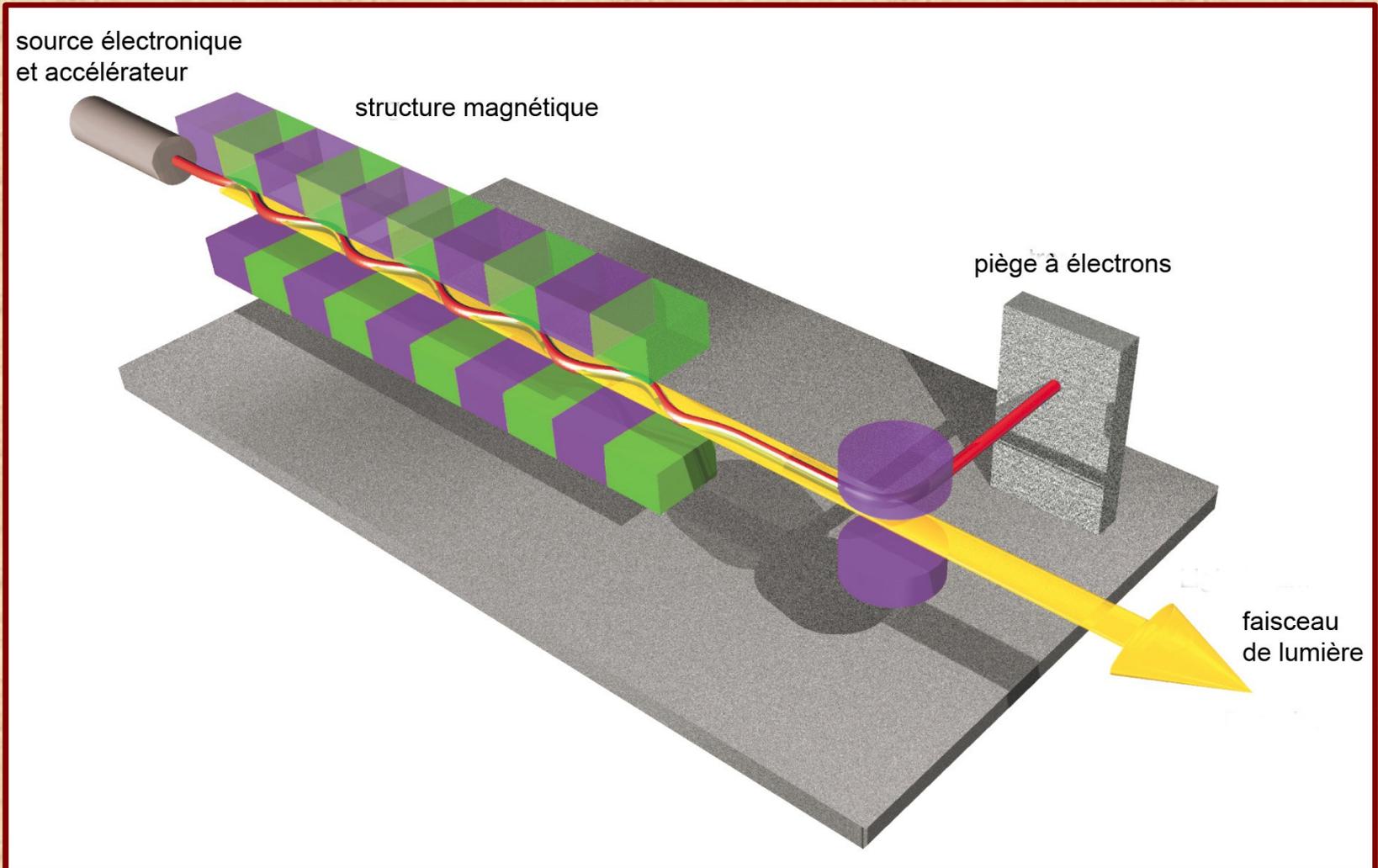
**= INVERSION DE POPULATION**



**Jonction p-n = milieu amplificateur**

# Cas particulier

## Le laser à électrons libres



# Fonctionnement des lasers

## LASER PULSE (système à trois niveaux)

Pour éviter de détruire le milieu amplificateur, le pompage ne peut être maintenu que pendant un temps très court [solide].

## LASER CONTINU (système à quatre niveaux)

Quand la puissance de pompage peut rester modérée il est possible de fonctionner en continu [gaz].

## LASER DECLENCHE

Ce mode de fonctionnement permet d'atteindre de fortes puissances.

Si on empêche l'entrée en oscillation tout en pompant le milieu actif, il y a accroissement de l'inversion de population.

A un moment donné, on autorise l'oscillation : l'intensité de l'onde lumineuse croît très rapidement.

# La cavité

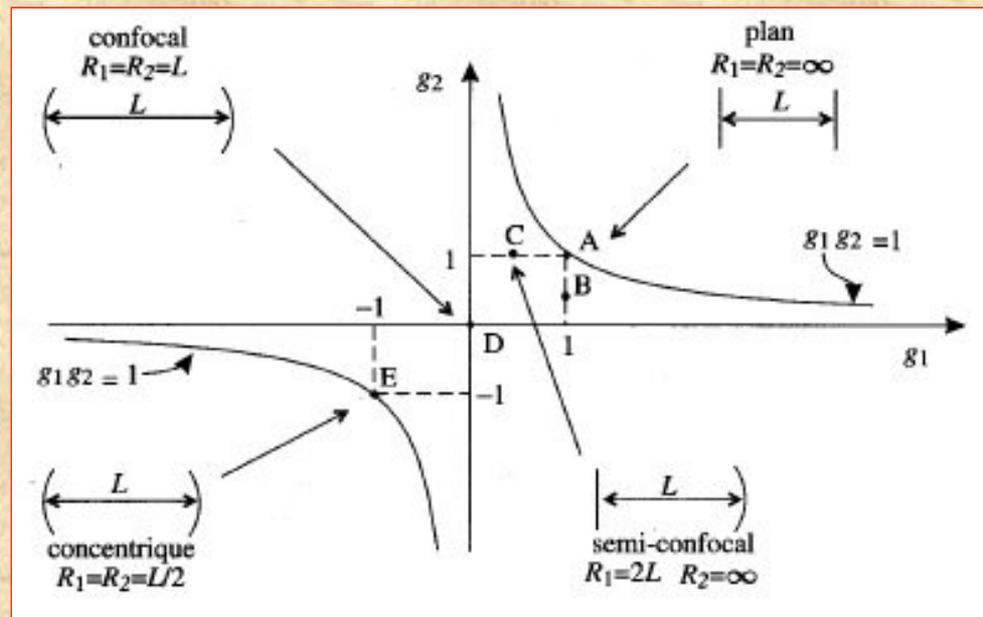
## CONDITIONS DE STABILITE

Un rayon voisin de l'axe peut rebondir un grand nombre de fois successivement sur chaque miroir sans trop s'éloigner de cet axe.

$$g_1 = 1 - L/R_1$$

$$g_2 = 1 - L/R_2$$

$$0 < g_1 g_2 < 1$$

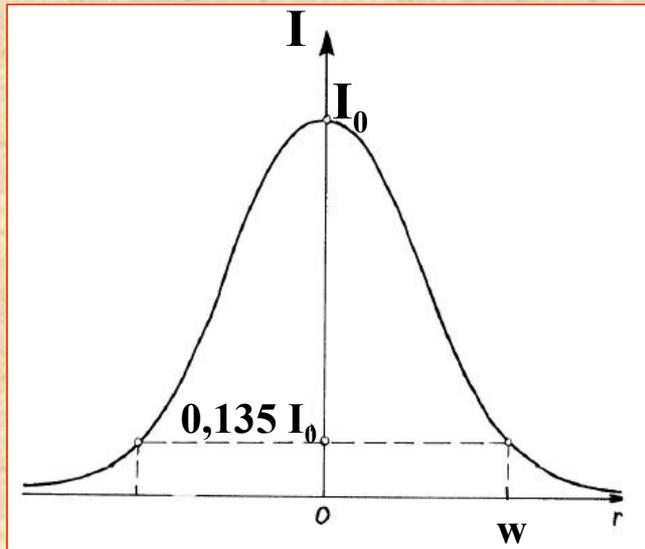


# Le faisceau dans la cavité

Les faisceaux lasers sont similaires aux ondes planes

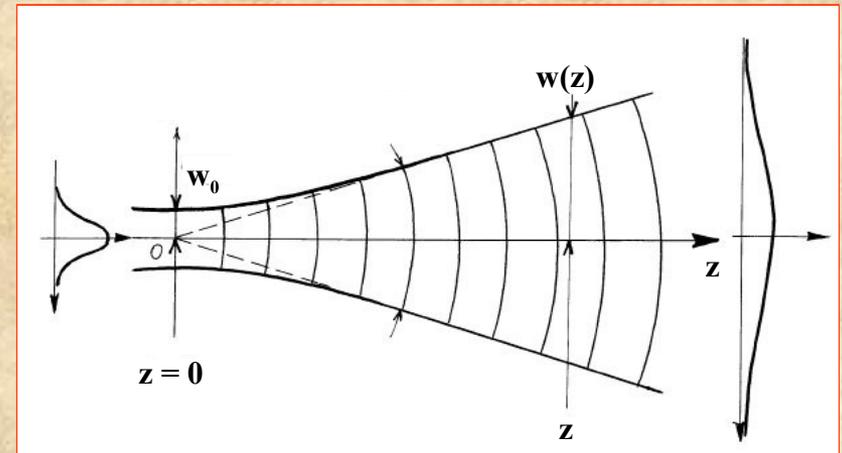
**MAIS** leur distribution n'est pas uniforme :

l'énergie est concentrée près de l'axe de propagation et le front d'onde est légèrement courbé.



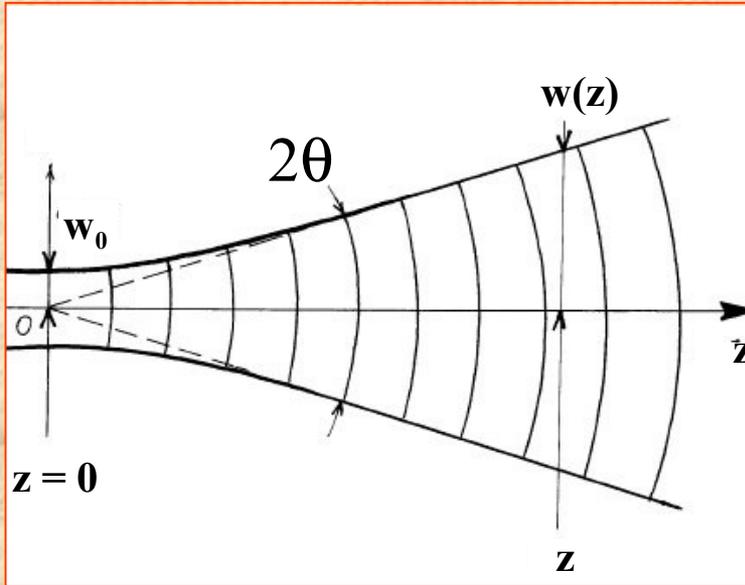
(waist)

La distribution d'énergie dans le plan perpendiculaire à l'axe de propagation  $z$  a une forme gaussienne.



La largeur de l'enveloppe varie de manière hyperbolique le long de l'axe de propagation.

# Paramètres caractéristiques du faisceau



La variation de  $w$  et  $R$  le long de l'axe de propagation est :

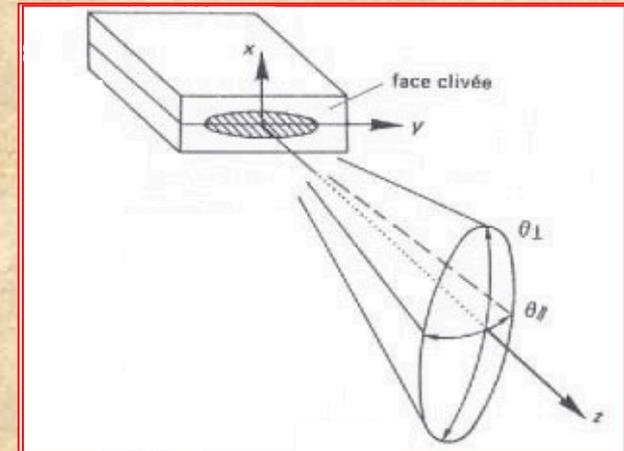
$$w(z) = w_0 [1 + \alpha^2]^{1/2}$$

$$R(z) = z [1 + \alpha^2]^{1/2}$$

$$\alpha = \left( \frac{\lambda z}{\pi w_0^2} \right)$$

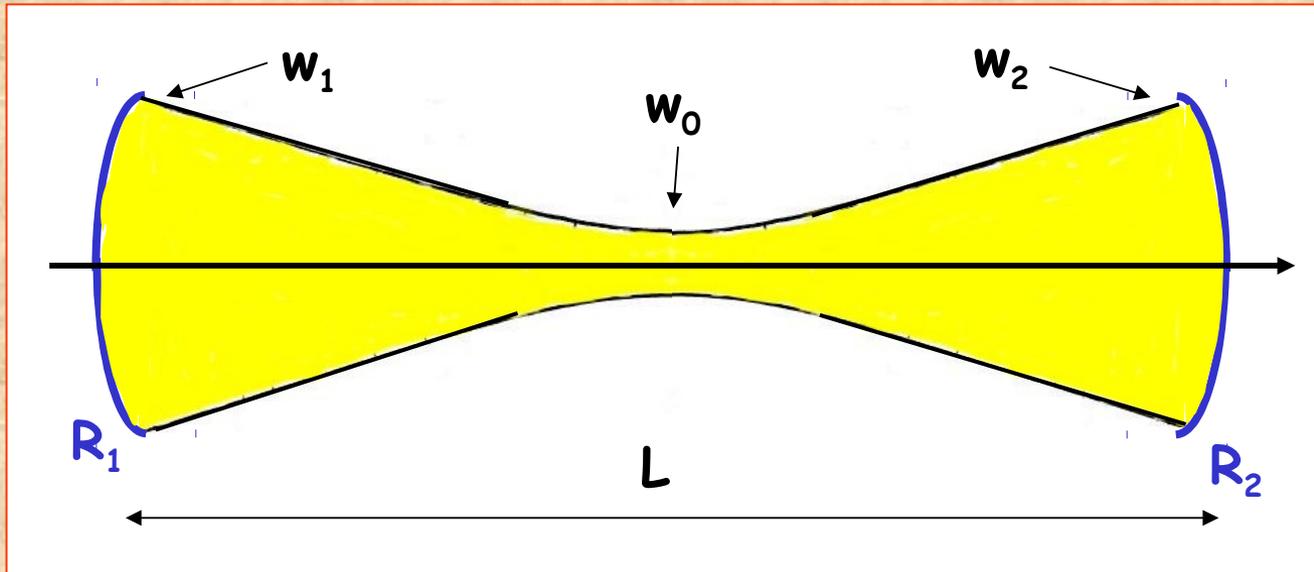
A grande distance de  $w_0$ , la ceinture du faisceau décrit une hyperbole dont les asymptotes sont inclinées par rapport à l'axe de propagation d'un angle  $\theta$  tel que :

$$\theta = \frac{\lambda}{\pi w_0}$$



$\theta$  traduit donc la divergence du faisceau laser

# La cavité définit les paramètres caractéristiques géométriques du faisceau laser



$$w_0^4 = \left(\frac{\lambda}{\pi}\right)^2 \frac{L (R_1 - L) (R_2 - L) (R_1 + R_2 - L)}{(R_1 + R_2 - 2L)^2}$$

$$w_1^4 = \left(\frac{\lambda R_1}{\pi}\right)^2 \frac{R_2 - L}{R_1 - L} \frac{L}{R_1 + R_2 - L}$$

$$w_2^4 = \left(\frac{\lambda R_2}{\pi}\right)^2 \frac{R_1 - L}{R_2 - L} \frac{L}{R_1 + R_2 - L}$$

# Seuil d'oscillation

Il existe des pertes qui peuvent empêcher le laser d'émettre.

**SUR LES OPTIQUES** : une partie de l'énergie est

absorbée

diffusée (défauts de surface)

transmise (couplage vers l'extérieur = perte utile)

**ABSORPTION PAR LE MILIEU ACTIF**

S'il existe dans le milieu une transition proche de la raie laser, l'énergie est perdue dans la cavité.

**DIFFRACTION SUR LES MIROIRS**

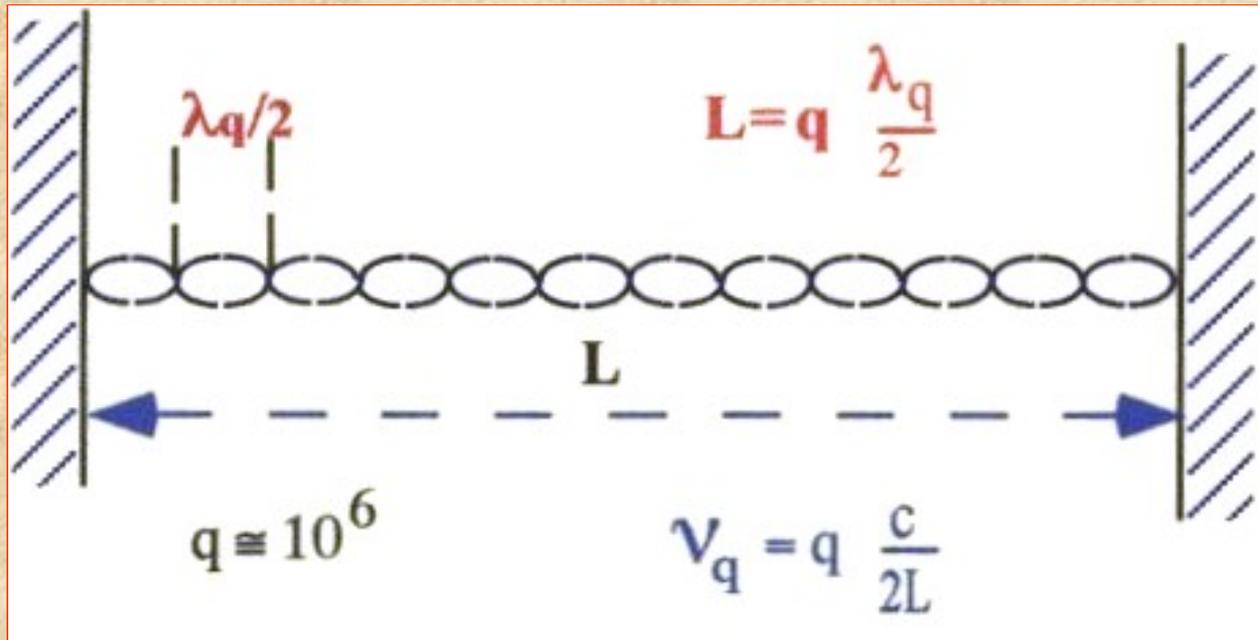
Les faisceaux à l'intérieur de la cavité ne sont pas limités transversalement. Les miroirs ne peuvent donc les réfléchir en totalité. Une partie du rayonnement s'échappe lors de chaque réflexion.



**SEUIL : GAIN = PERTES**

# Fonctionnement multimode du laser

Entre les miroirs de la cavité s'établissent des **ONDES STATIONNAIRES**.



Les ondes qui peuvent se stabiliser suivant l'axe de la cavité correspondent à un certain nombre de **modes longitudinaux** (diverses valeurs de  $q$ ).

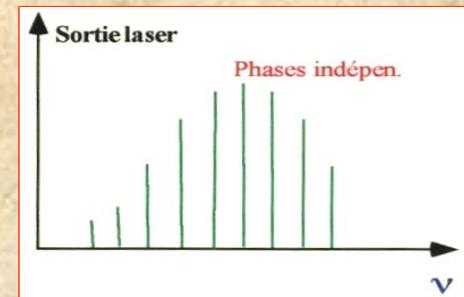
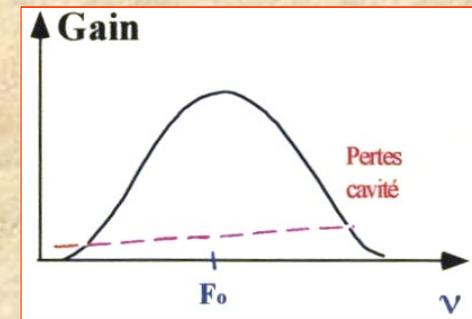
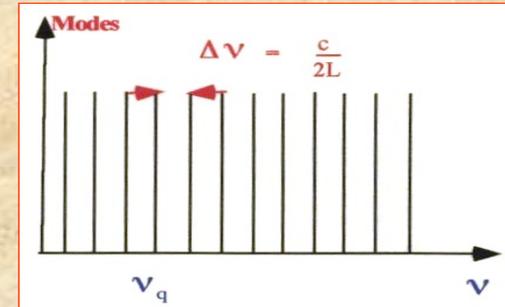
# Fonctionnement multimode du laser

En général l'écart entre modes longitudinaux  $\Delta\nu_q$  est inférieur à l'étendue de la plage d'accrochage encadrant la fréquence  $F_0$ .

- Modes résonnants de la cavité (ou résonateur)
- Milieu amplificateur
- Laser multimode

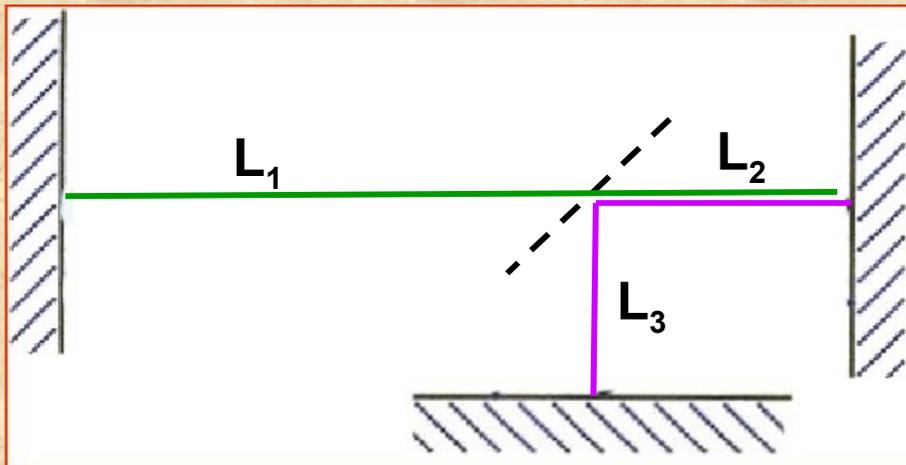
Plusieurs modes peuvent être excités simultanément

➔ Problème de stabilité en fréquence



# Fonctionnement monomode du laser

- Réduction de la longueur de cavité :  
→ pas intéressant
- Élément dispersif dans la cavité  
→ Réseau dans le laser à  $\text{CO}_2$
- Résonateurs couplés  
→ Dispositif de Fox-Smith



Conditions d'oscillation :

$$L_1 + L_2 = q\lambda/2$$

$$L_2 + L_3 = q'\lambda/2$$

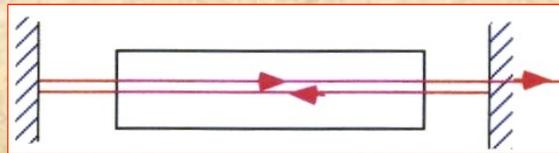
La cavité courte ( $L_2 + L_3$ )  
sert d'élément sélectif

# La réflexion sur les optiques

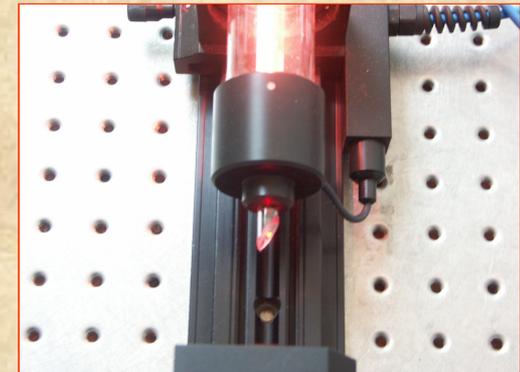
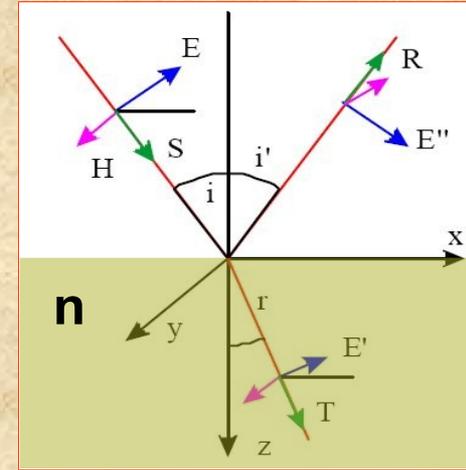
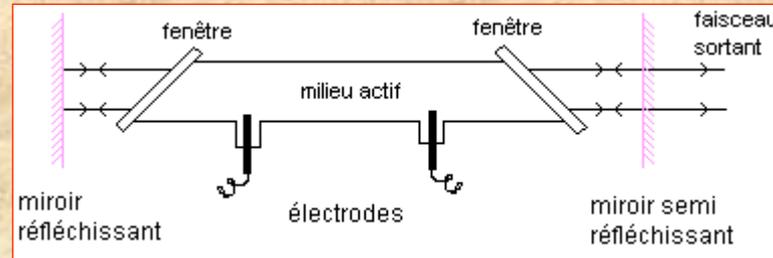
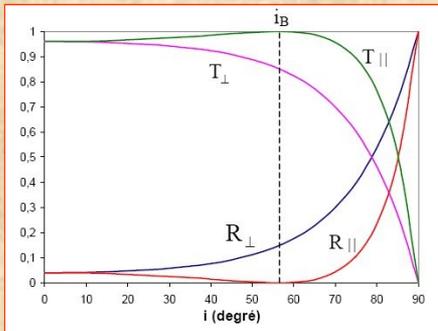
La réflexion sur un élément réfractif peut être

- une source de danger
- une source d'instabilité du laser .

1<sup>ère</sup> solution : traitement antireflet

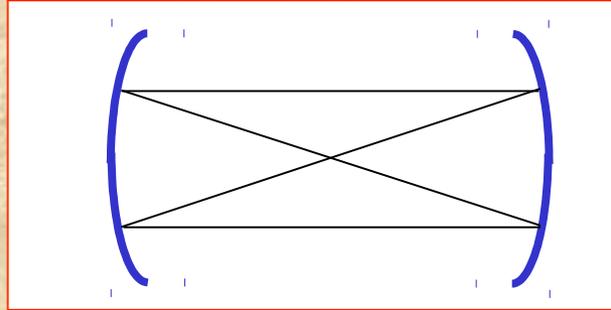


2<sup>ème</sup> solution : fenêtres à incidence de Brewster :  $\tan i_B = n$



# Structure transverse du faisceau laser

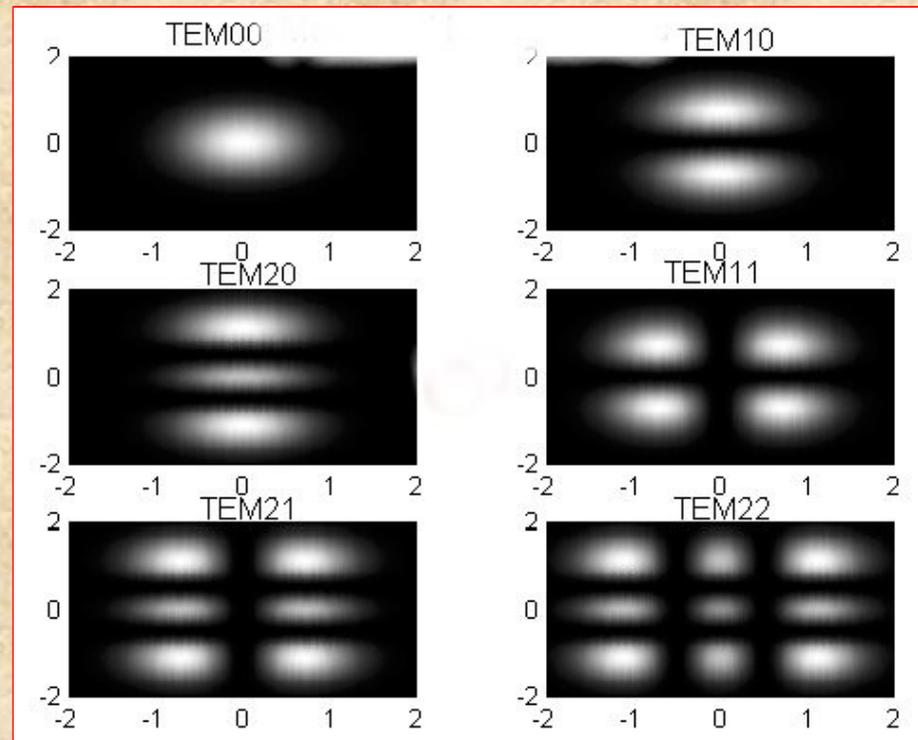
Il peut exister des ondes se propageant juste à côté de l'axe optique de la cavité et qui peuvent se renouveler après un chemin optique assez compliqué.



## Modes $TEM_{qr}$

$q$  : nombre de minima sur l'axe horizontal transverse

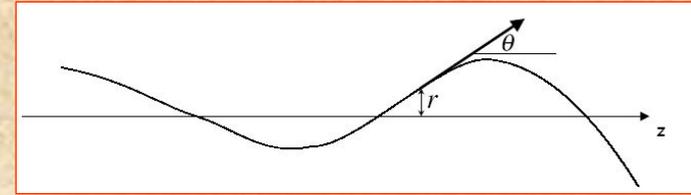
$r$  : nombre de minima sur l'axe vertical transverse



# Propagation des faisceaux gaussiens

Un rayon paraxial est caractérisé par :

- sa distance  $r$  par rapport à l'axe optique  $z$
- son angle  $\theta$  par rapport à cet axe



Les quantités  $r_2$  et  $\theta_2$  à la sortie d'une succession d'éléments optiques dépendent linéairement des quantités d'entrée  $r_1$  et  $\theta_1$  :

$$\begin{pmatrix} r_2 \\ \theta_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1 \\ \theta_1 \end{pmatrix}$$

Les faisceaux gaussiens se comportent comme les rayons paraxiaux de l'optique géométrique

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{R} - \frac{i\lambda}{\pi w^2} \quad \text{ou} \quad q = z + i \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$$

$$q_2 = \frac{Aq_1 + B}{Cq_1 + D}$$

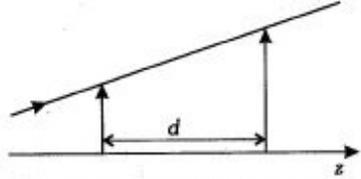
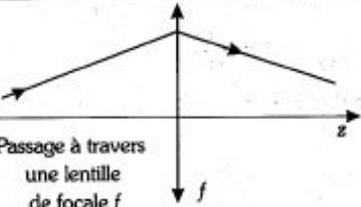
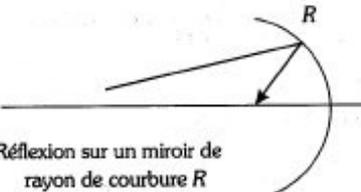
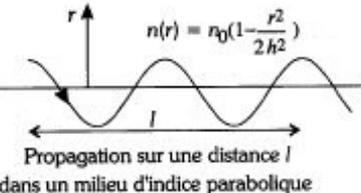
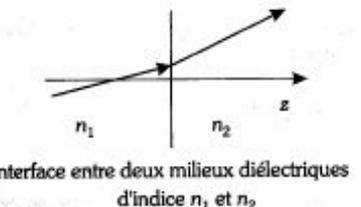
# Propagation des faisceaux gaussiens

Propagation libre :  $q_2 = q_1 + d$

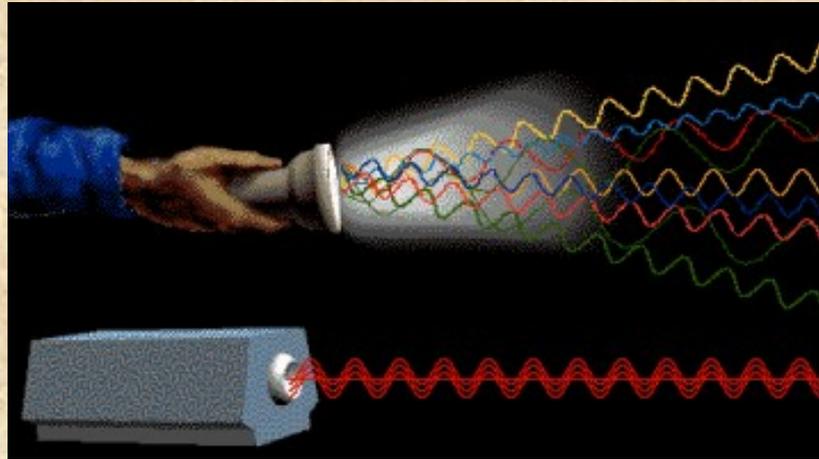
Si  $q_1 = i \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$  et  $\frac{1}{q_2} = \frac{1}{R} - \frac{i \lambda}{\pi w(d)^2}$

On retrouve :

$$\begin{cases} w(d) = w_0 [1 + \alpha^2]^{1/2} \\ R(d) = d [1 + \alpha^2]^{1/2} \end{cases} \quad \alpha = \left( \frac{\lambda d}{\pi w_0^2} \right)$$

|   |   |
|---|---|
|  <p>Propagation libre sur une distance <math>d</math></p>  | $\begin{pmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$                                      |
|  <p>Passage à travers une lentille de focale <math>f</math></p>                                    | $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix}$                                   |
|  <p>Réflexion sur un miroir de rayon de courbure <math>R</math></p>                                | $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -2/R & 1 \end{pmatrix}$                                   |
|  <p>Propagation sur une distance <math>l</math> dans un milieu d'indice parabolique</p>           | $\begin{pmatrix} \cos(l/h) & h \sin(l/h) \\ -\sin(l/h)/h & \cos(l/h) \end{pmatrix}$ |
|  <p>Interface entre deux milieux diélectriques d'indice <math>n_1</math> et <math>n_2</math></p> | $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & n_1/n_2 \end{pmatrix}$                                |

# Propriétés remarquables



**Monochromaticité** (une seule longueur d'onde)

**Directivité** (divergence très faible)

**Taille de faisceau très petite** (densité de puissance élevée)



**Nombreuses applications**