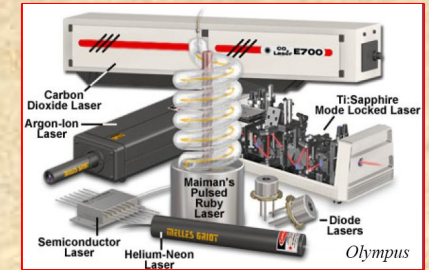


Le Laser



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 (λ) : mètre [m] ou angström [Å]

Fréquence (f ou ν) : Hertz [Hz]

Nombre d'onde (σ) : [cm⁻¹]

Température (T) : Kelvin [K]

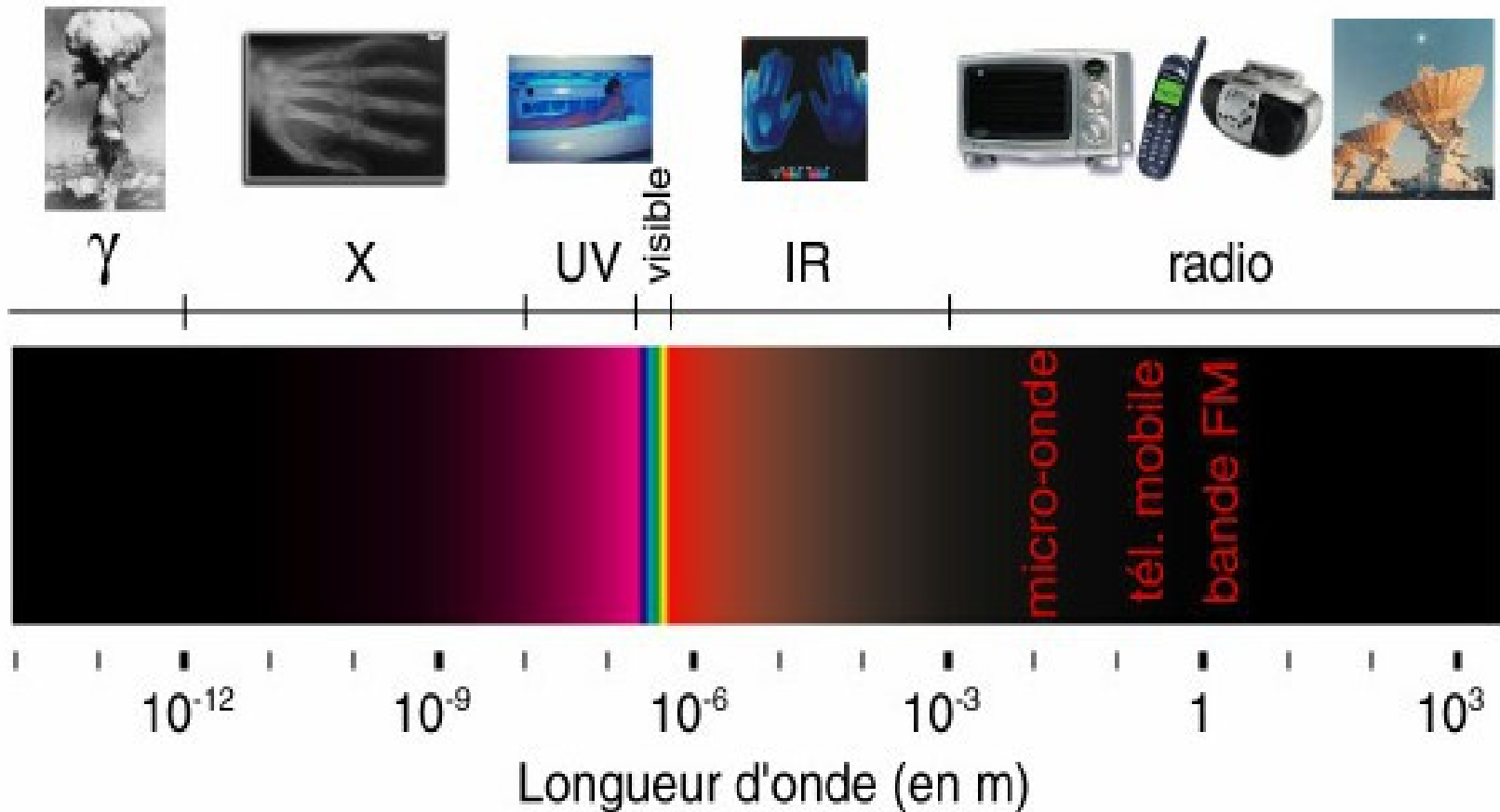
Puissance (P) : Watt [W]

Densité de puissance (ω ou I) : [W m⁻²]

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

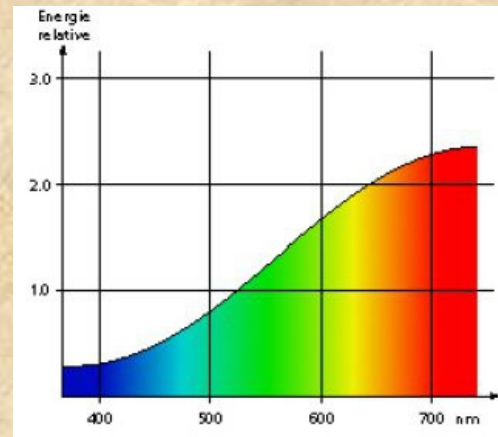
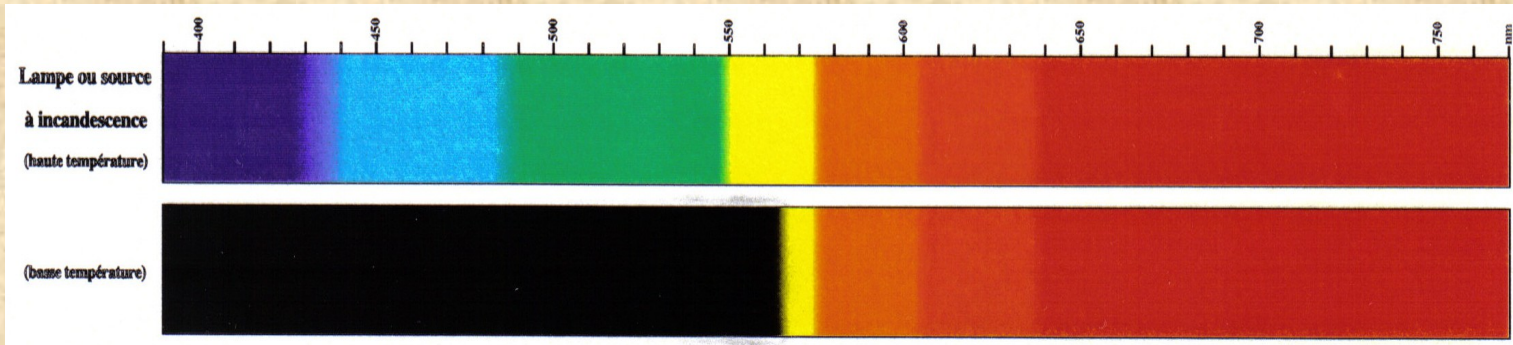
$$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J s} ; k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1} ; c = 299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$$

Spectre = décomposition de la lumière



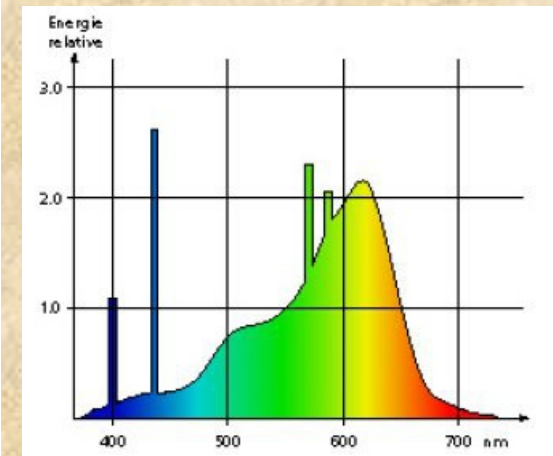
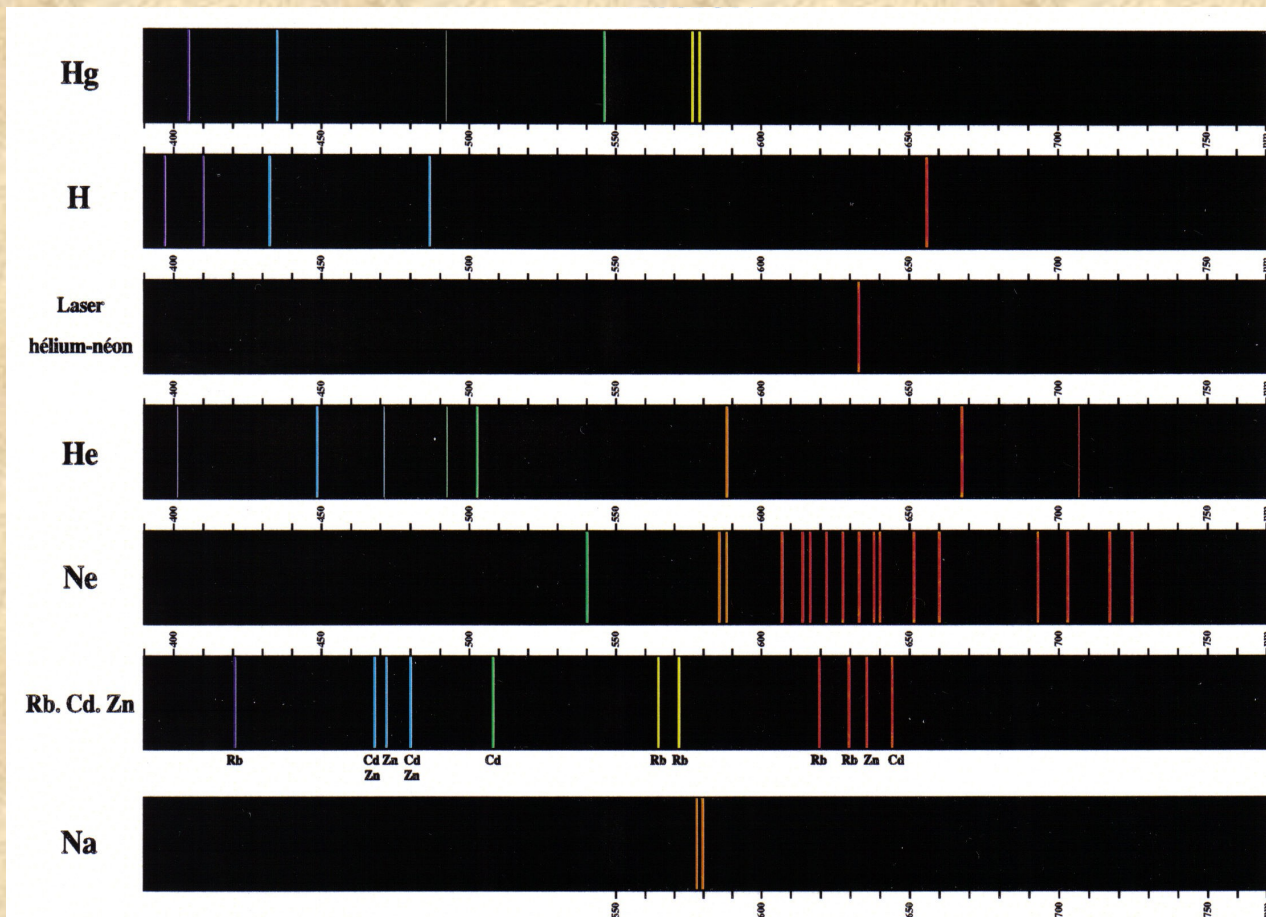
Allure des spectres

Spectre continu



Allure des spectres

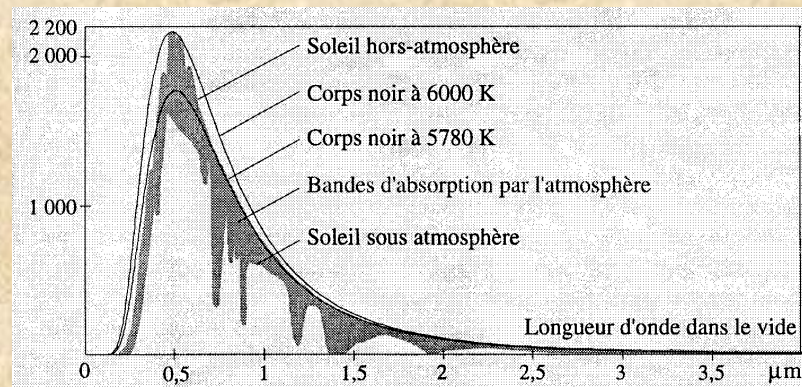
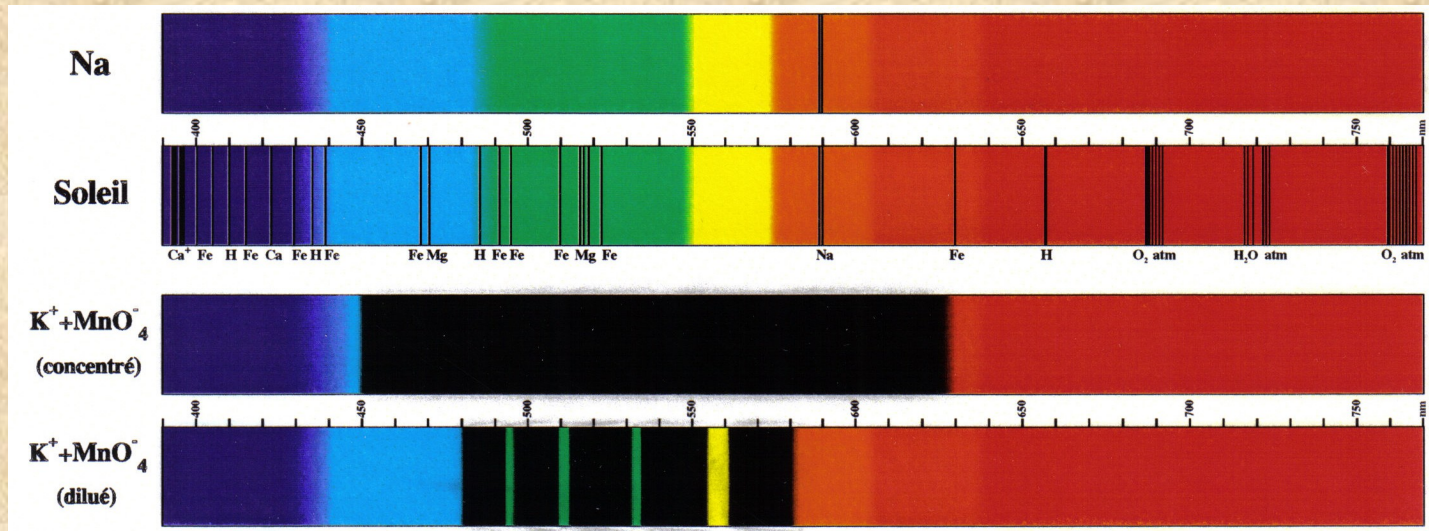
Spectre d'émission (traits colorés sur fond sombre)



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

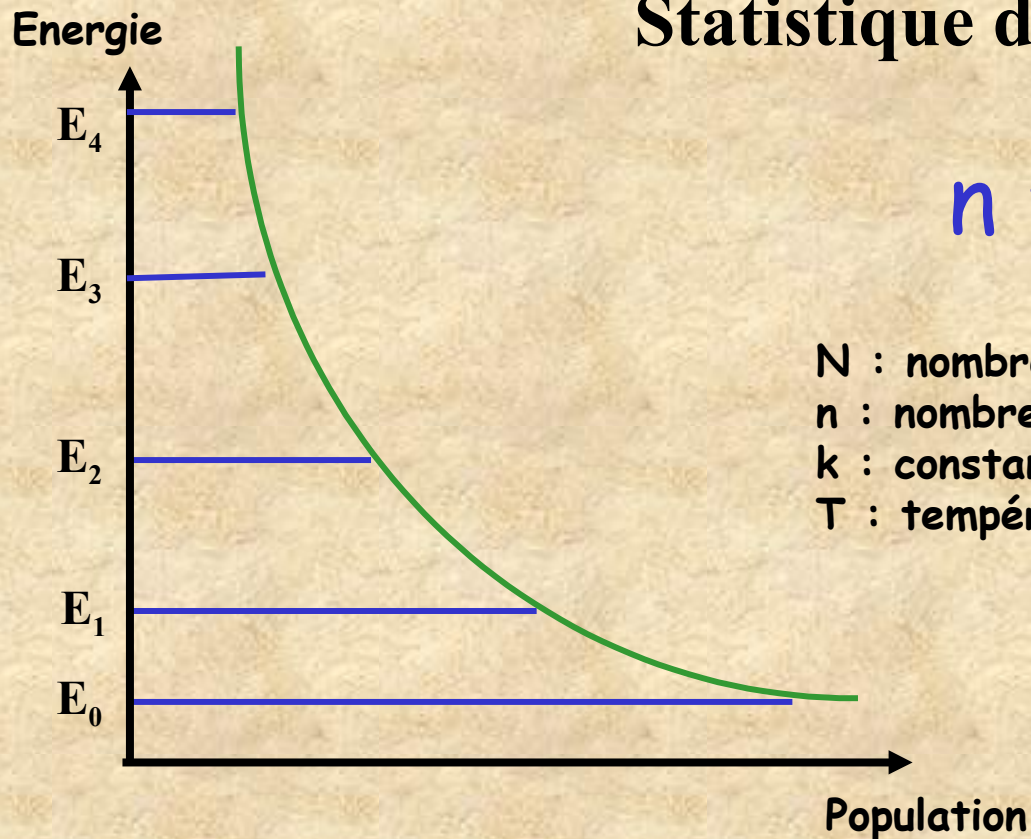
Événements violents

Rayons γ

T \approx 10^8 K

Répartition des atomes par niveaux d'énergie

Statistique de Maxwell - Boltzmann



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

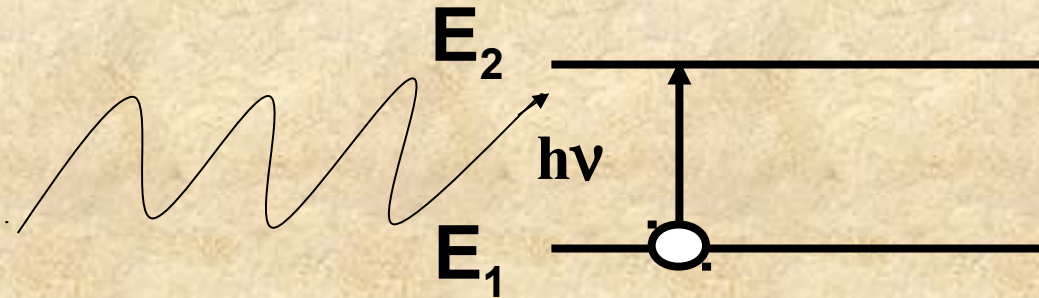
N : nombre total d'atomes

n : nombre d'atomes possédant l'énergie E

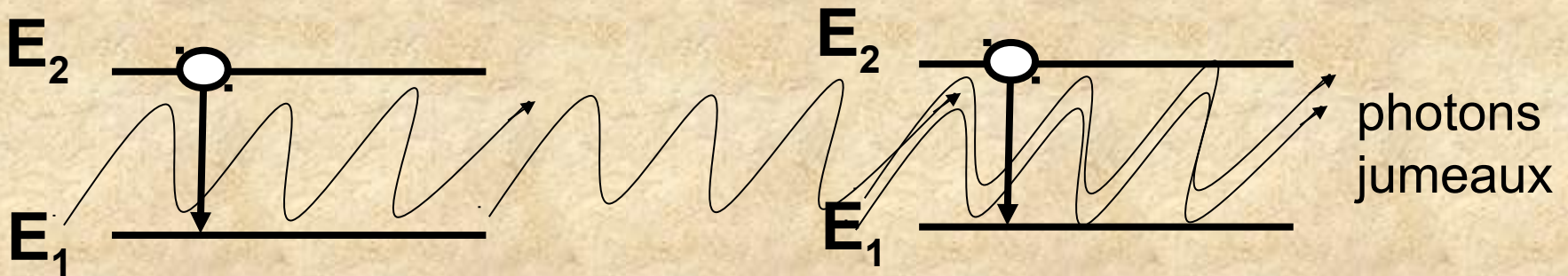
k : constante de Boltzmann

T : température absolue

Comment passer d'un niveau à un autre ?



Absorption $E_2 - E_1 = h\nu$

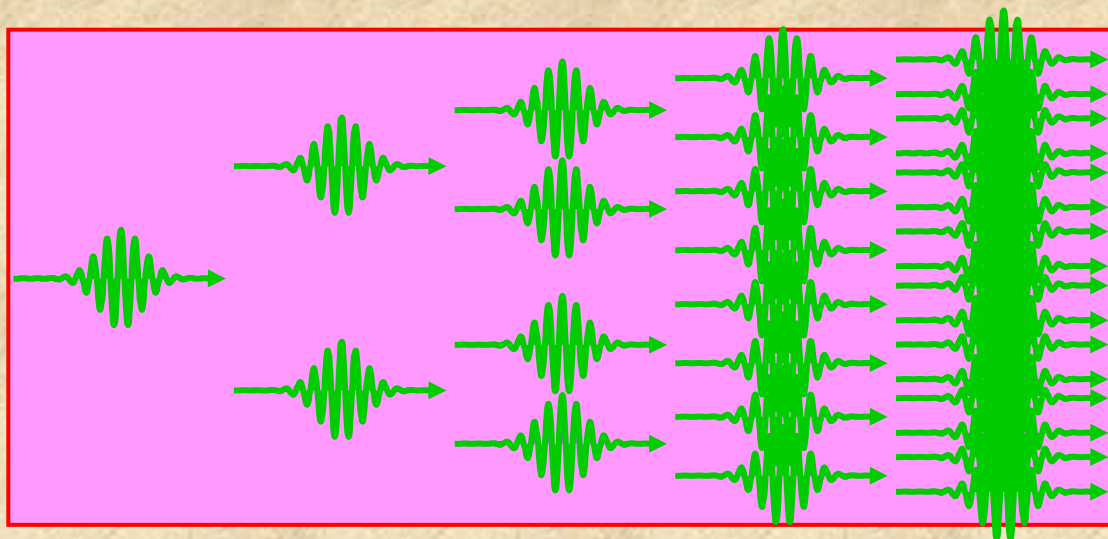


Émission spontanée

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 $E_2 - E_1$

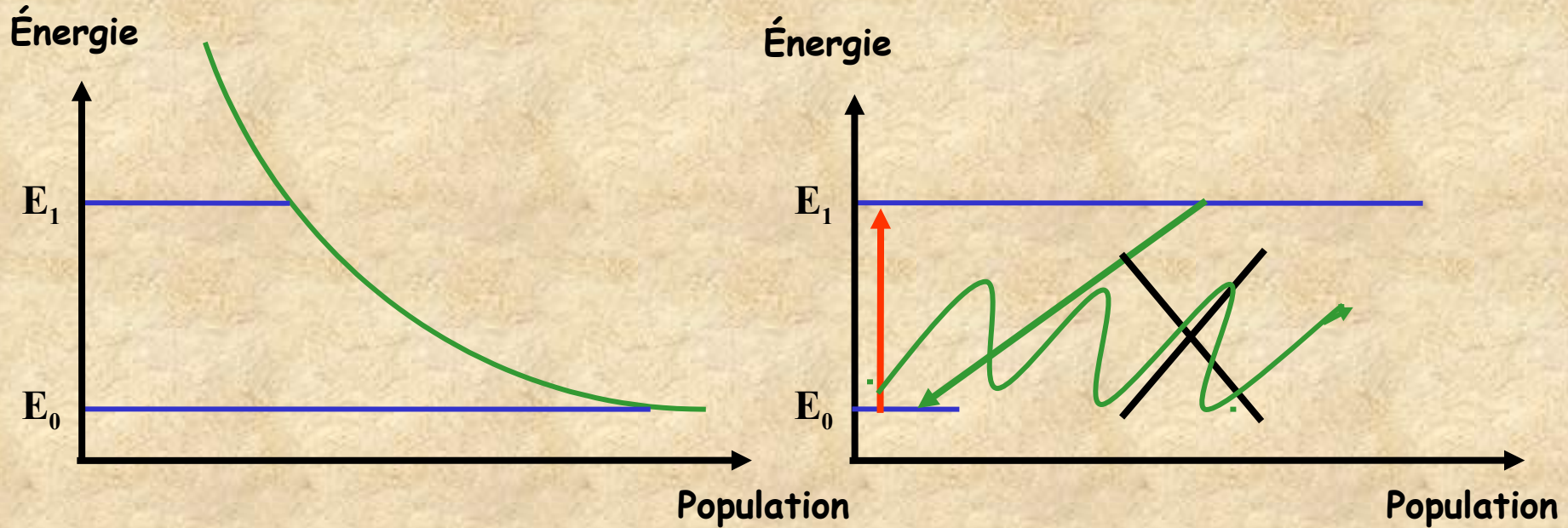


Il faut donc plus d'atomes sur le niveau E_2 que sur le niveau E_1
« INVERSION DE POPULATION »

POMPAGE

Le pompage

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



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

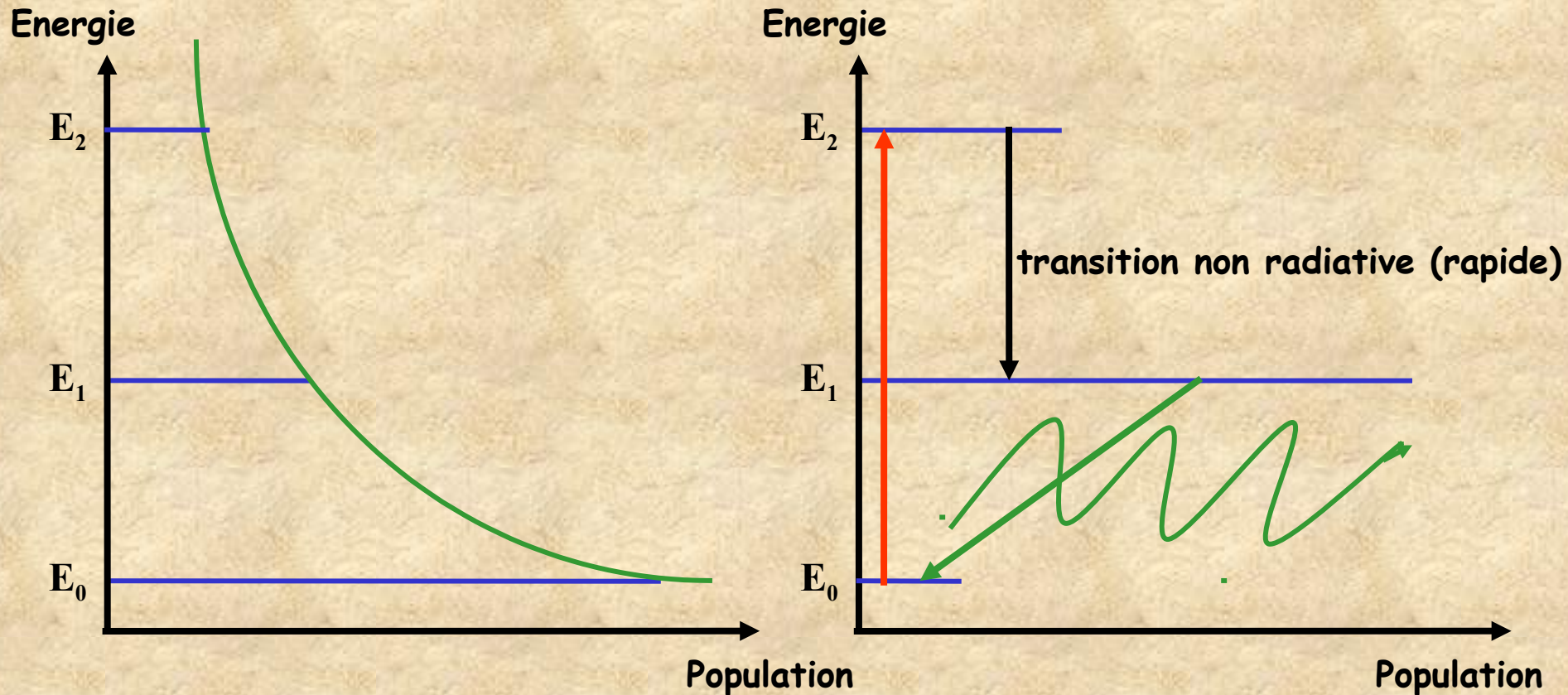
Il est impossible de créer l'inversion de population (au mieux il y a égalité).

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

Systeme à deux niveaux

Le pompage

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



Systeme à trois niveaux

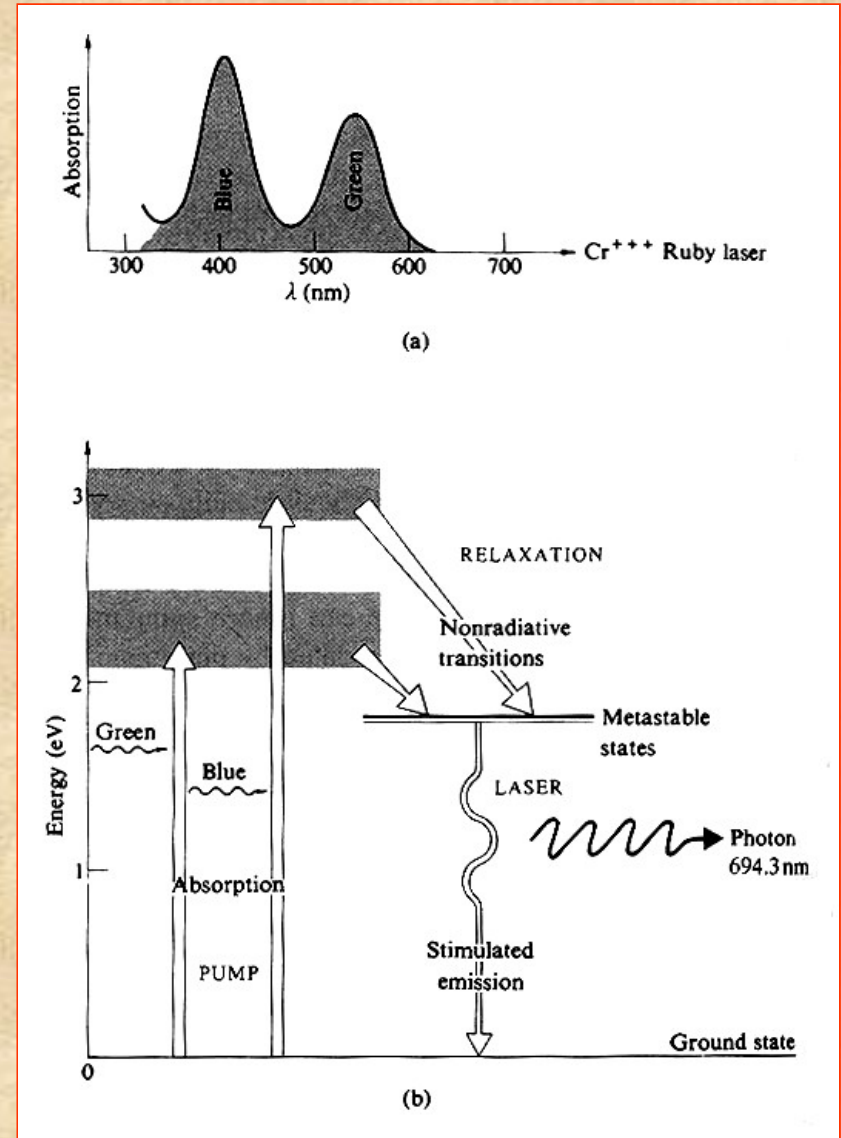
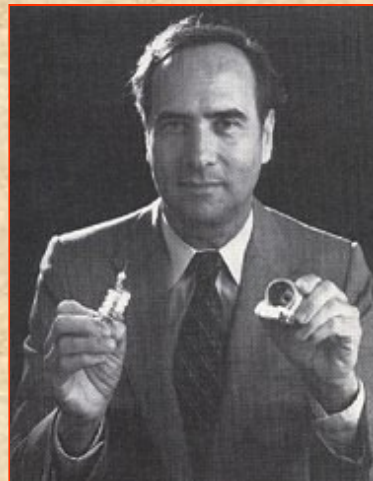
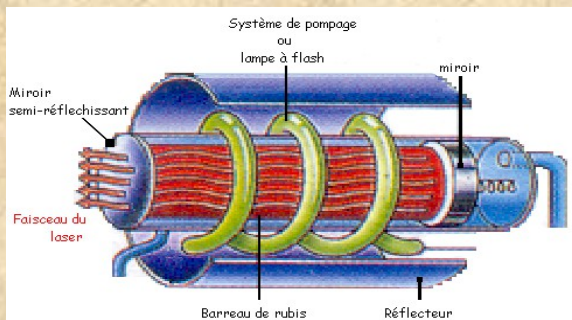
Le pompage

Le laser à rubis est un système à trois niveaux.

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

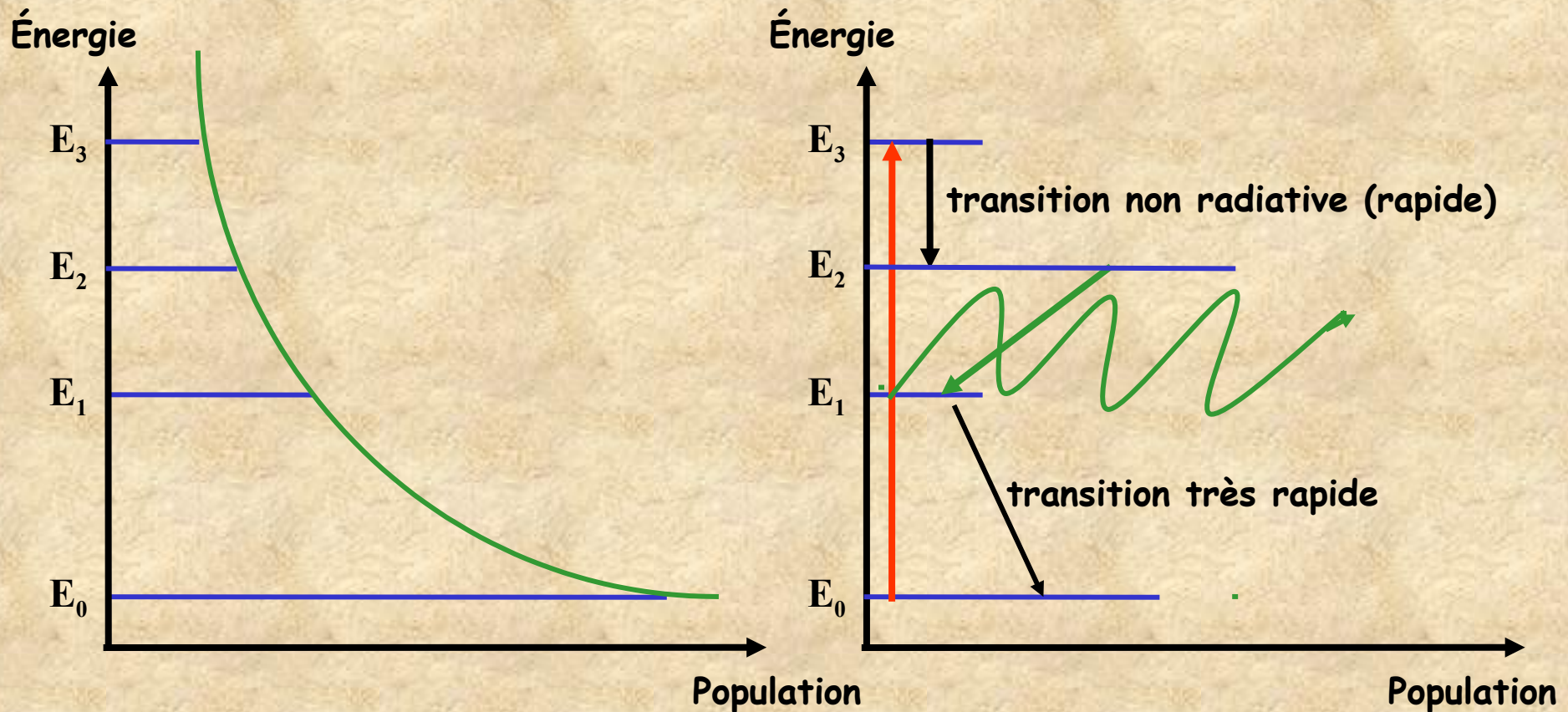
$$\Delta N = N \frac{1 - I/I_{sat}}{1 + I/I_{sat}}$$

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



Le pompage

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



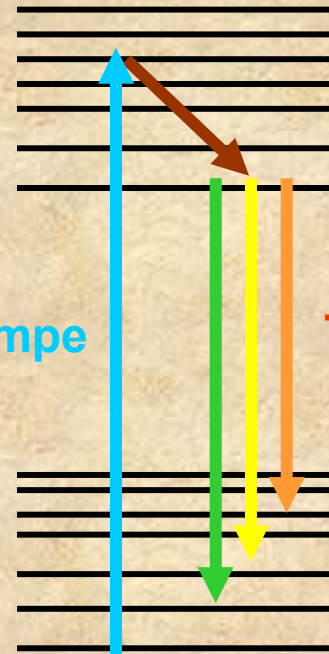
Systeme à quatre niveaux

Le pompage

S_1 : 1^{er} état excité
électronique

Transition de pompe

S_0 : état électronique
fondamental



Transitions Laser

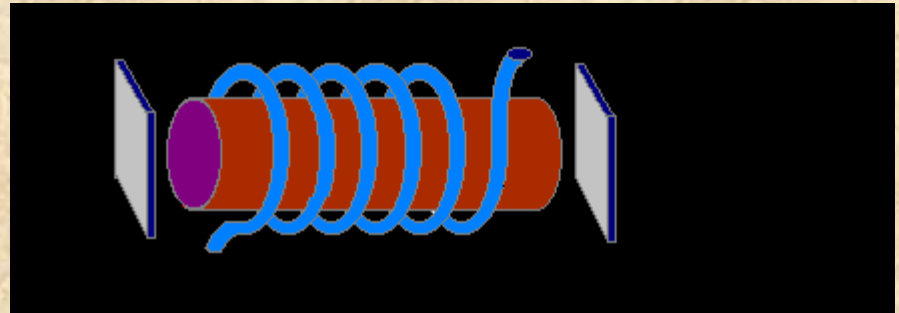
Le laser à colorant est un système à quatre niveaux.
L'inversion de population est toujours réalisée (d'où un pompage moins intense).

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

Pompage optique

Une onde électromagnétique éclaire les atomes du niveau E_0

- Laser solide



le laser à rubis

Milieu actif : Cr^{3+}

Cristal : alumine

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

le laser à néodyme (YAG)

Milieu actif : Nd^{3+}

Cristal : Yttrium Aluminium Grenat

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

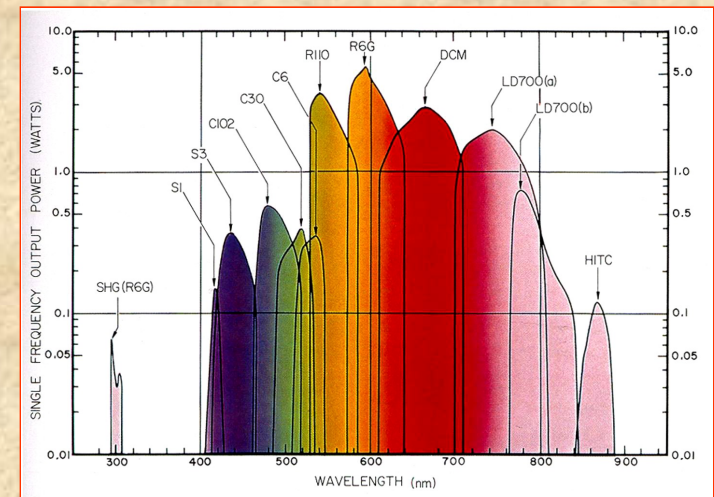
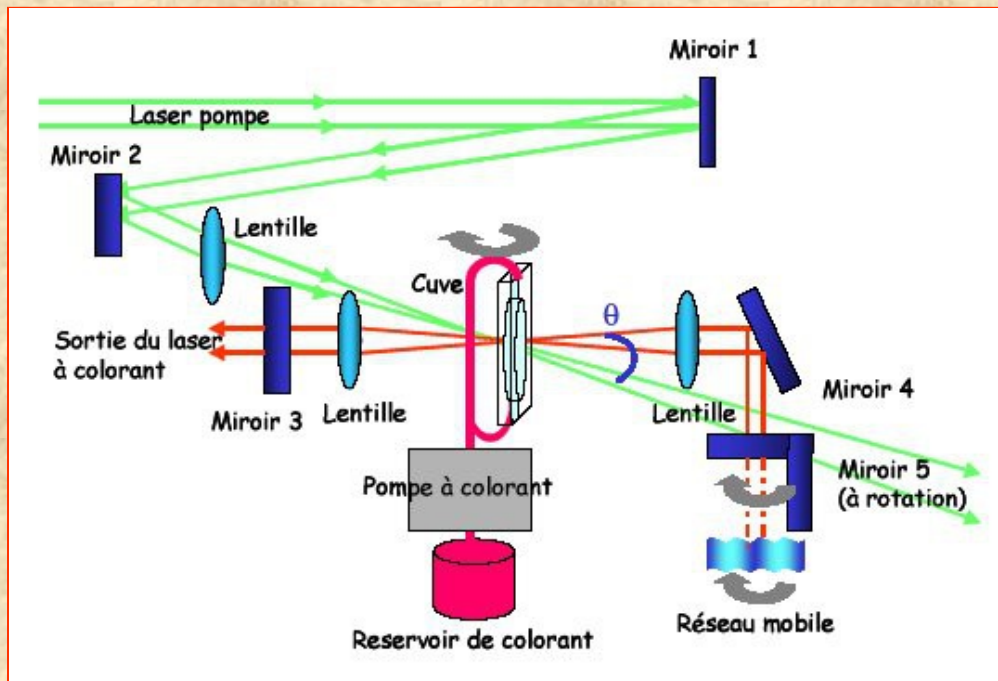
- Laser moléculaire infrarouge lointain

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 μm .

Pompage par excitation électronique

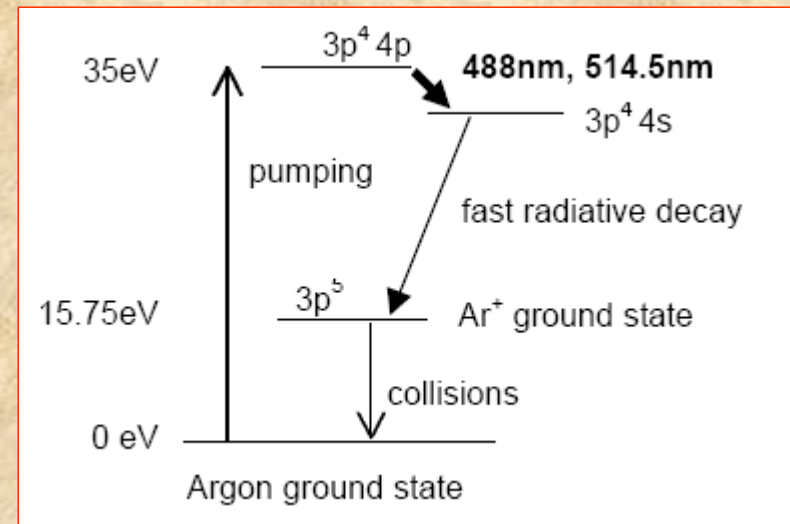
Un gaz est soumis à un champ électrique très fort : certains atomes sont ionisés.

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

- **Laser à argon**

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

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



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.

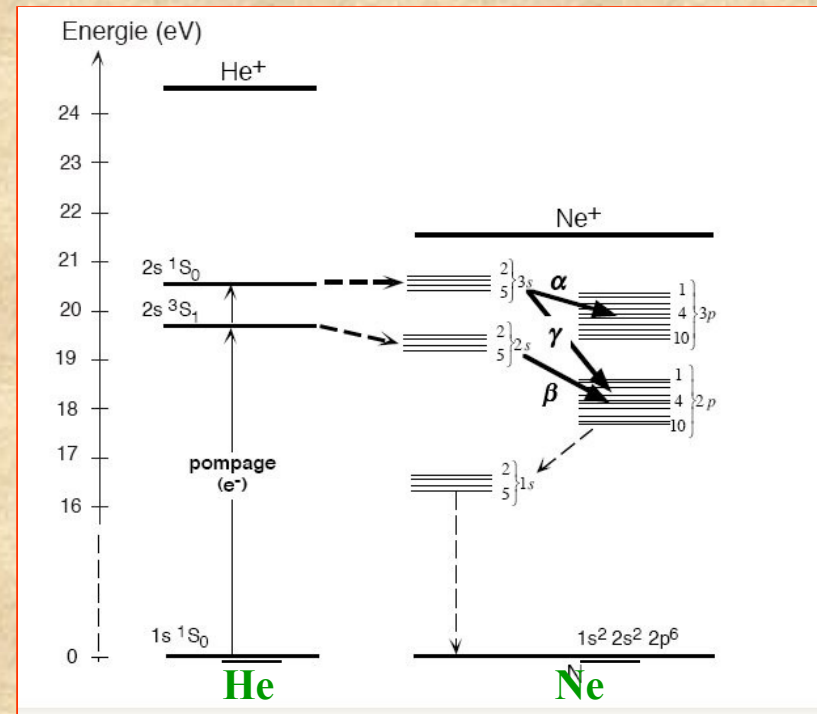
- Laser Hélium Néon

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

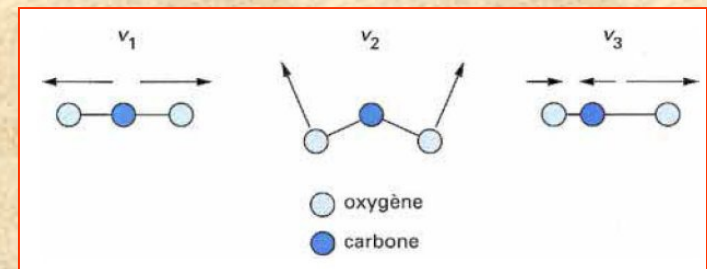
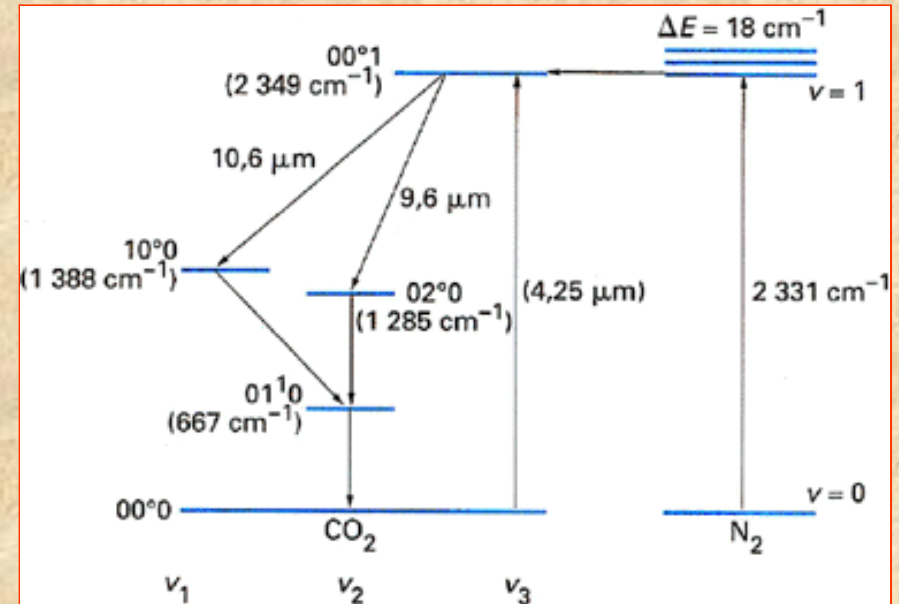
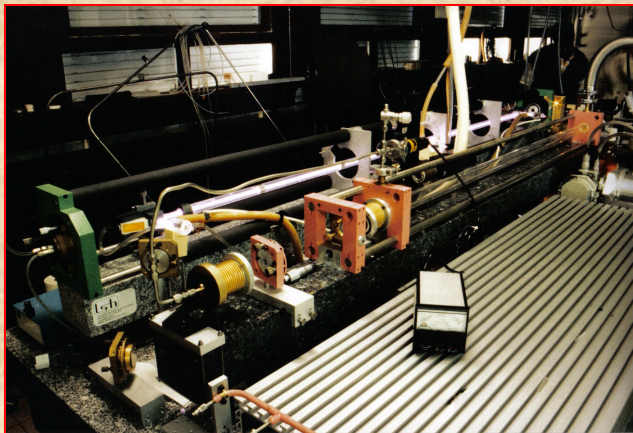
Le gaz est excité à la suite de collisions avec des atomes excités électriquement.

- Laser à gaz carbonique

Azote excité électriquement

CO₂ pompé par chocs

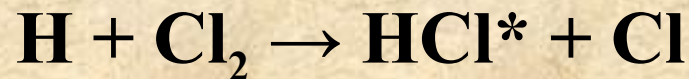
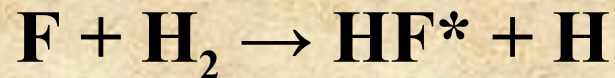
Hélium



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.

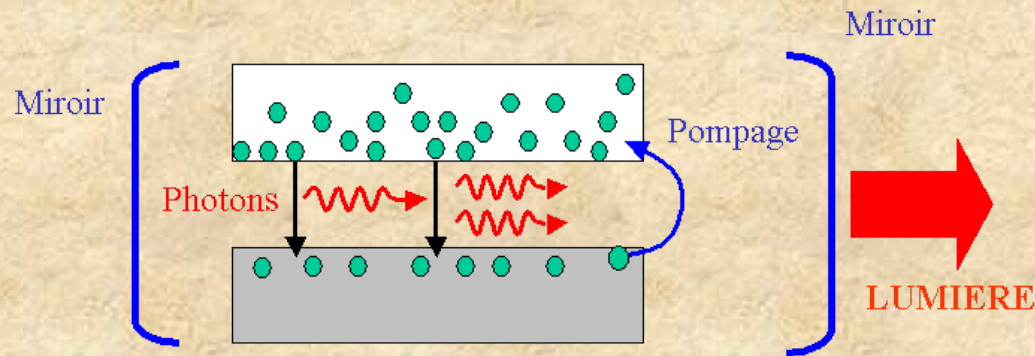
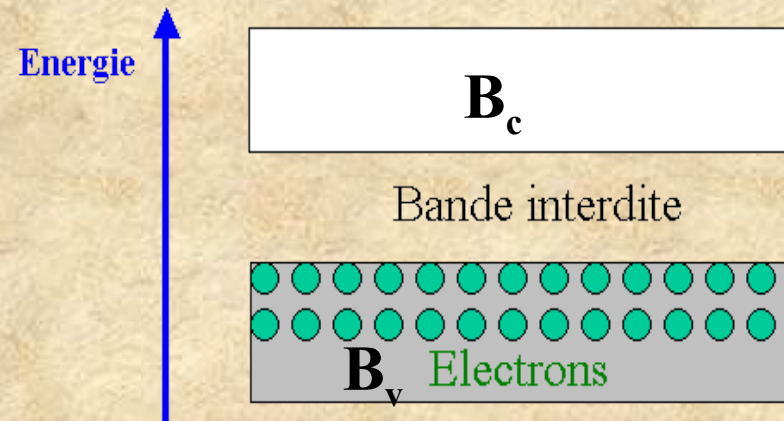
- Mélange gaz réactif + gaz inerte



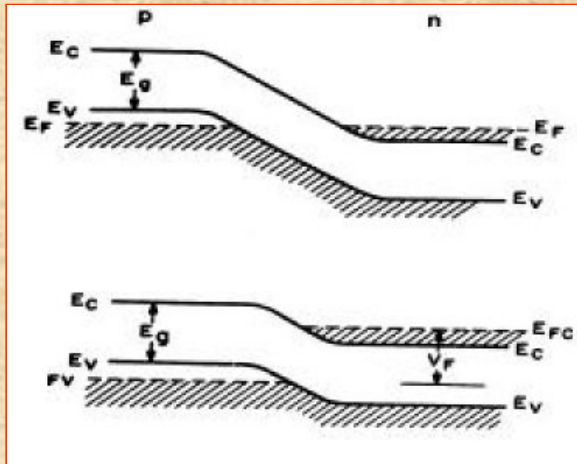
Pompage dans un semi-conducteur

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



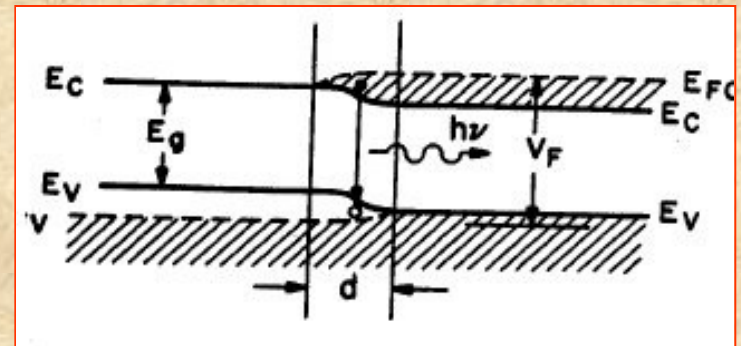
On réunit deux semi-conducteurs, l'un dopé p, l'autre dopé n.

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.

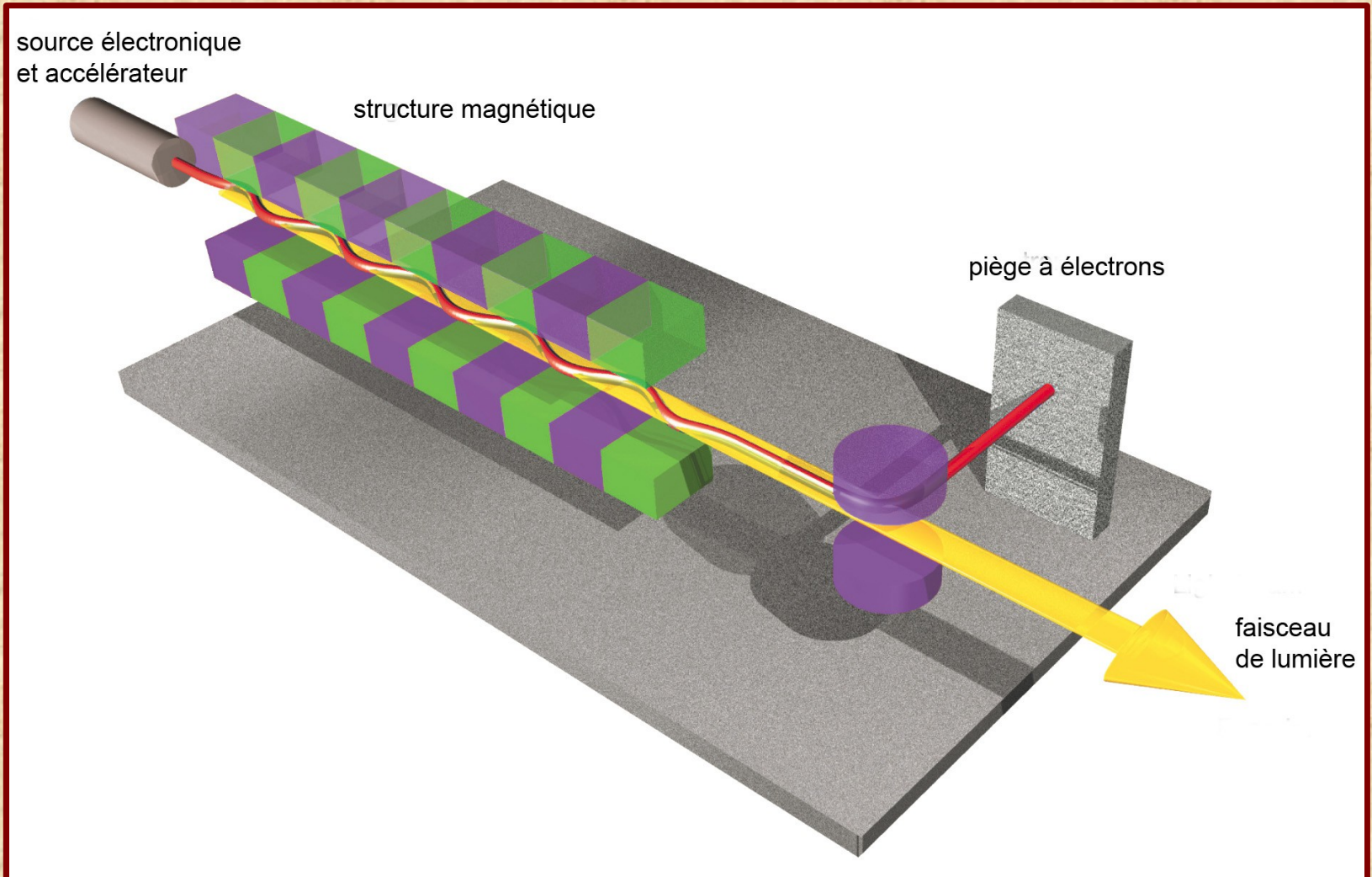
= INVERSION DE POPULATION



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

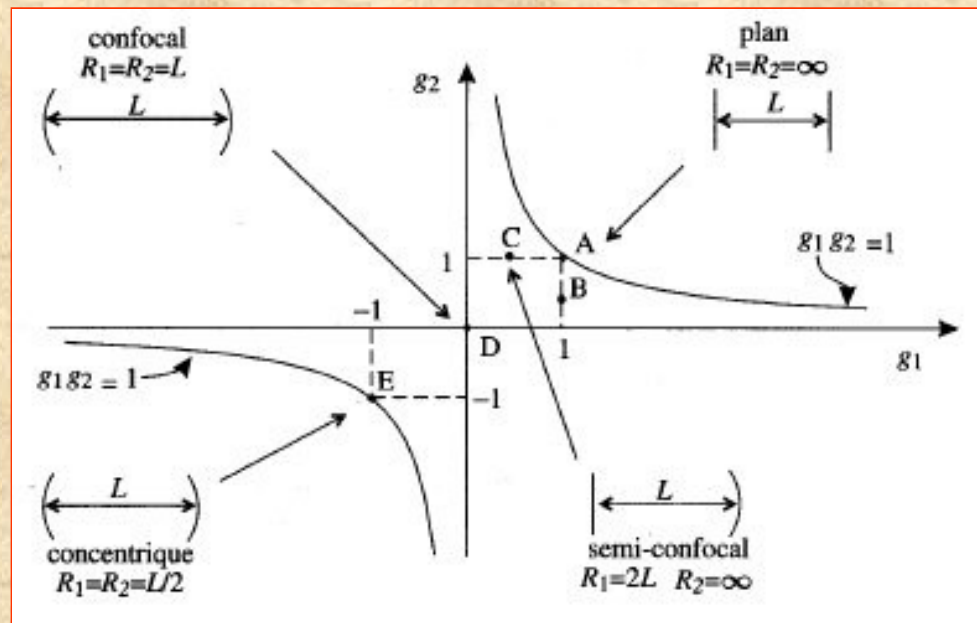
CONDITIONS DE STABILITE

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

$$g_1 = 1 - L/R_1$$

$$g_2 = 1 - L/R_2$$

$$0 < g_1 g_2 < 1$$

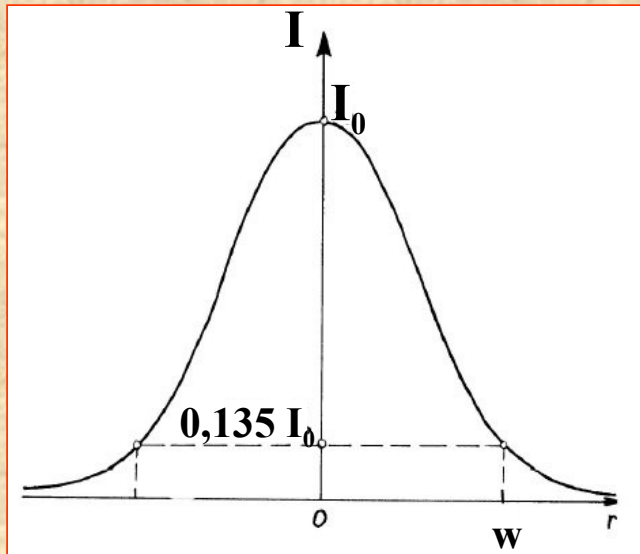


Le faisceau dans la cavité

Les faisceaux lasers sont similaires aux ondes planes

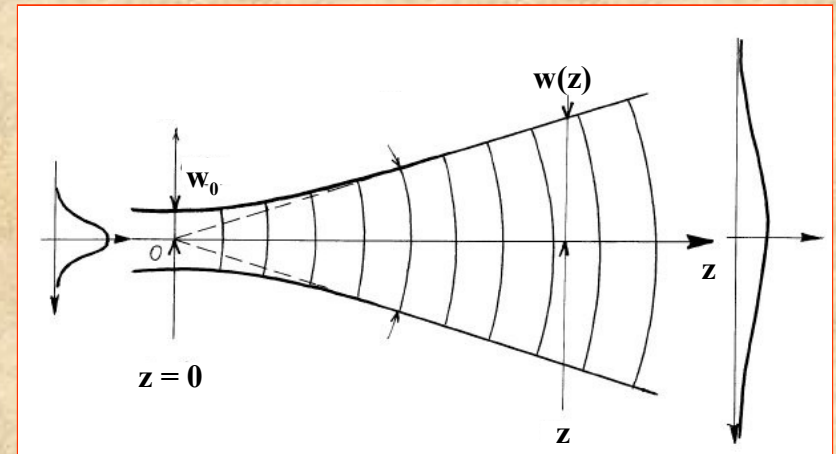
MAIS leur distribution n'est pas uniforme :

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



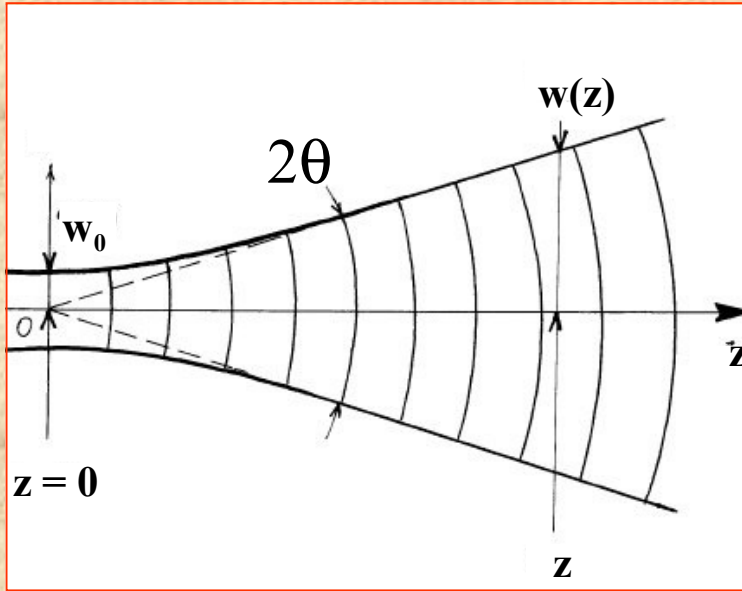
(waist)

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 :

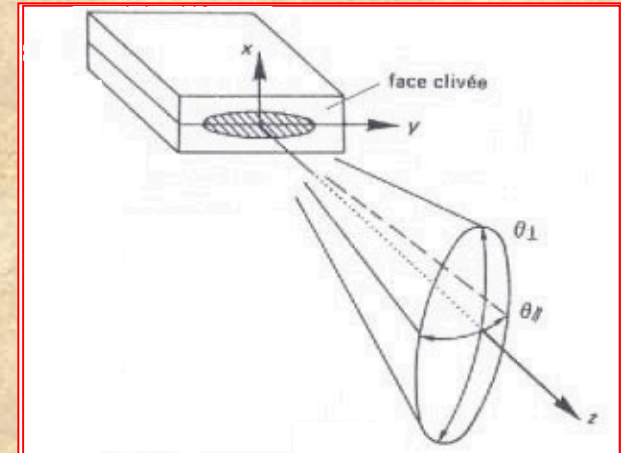
$$w(z) = w_0 [1 + \alpha^2]^{1/2}$$

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

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

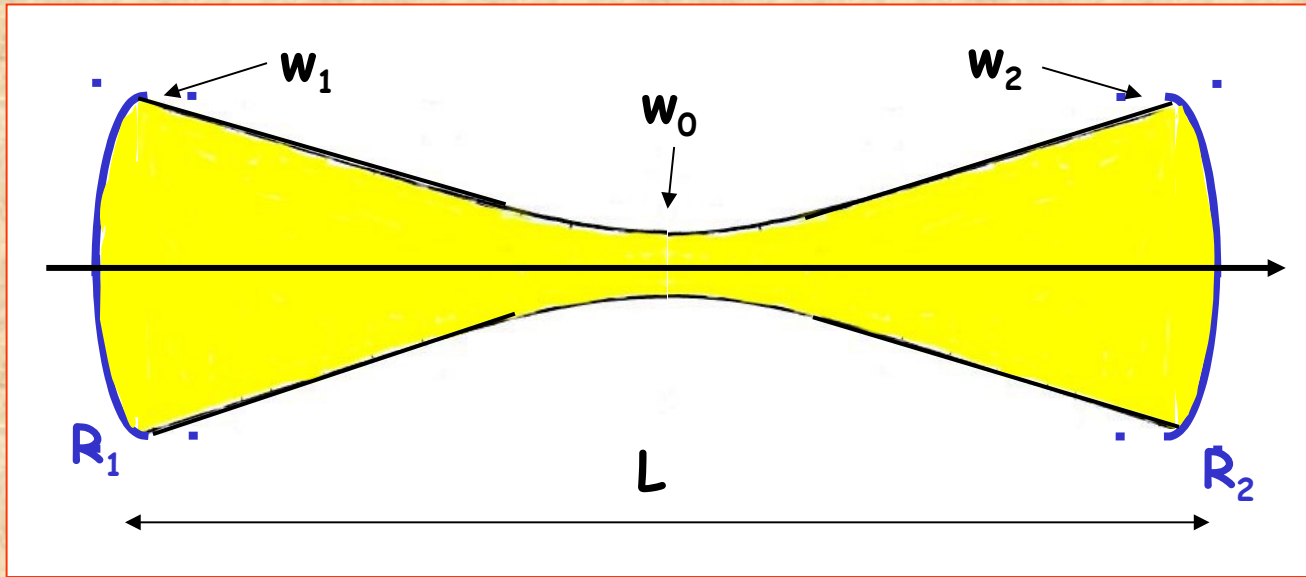
A grande distance de w_0 , la ceinture du faisceau décrit une hyperbole dont les asymptotes sont inclinées par rapport à l'axe de propagation d'un angle θ tel que :

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



θ 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

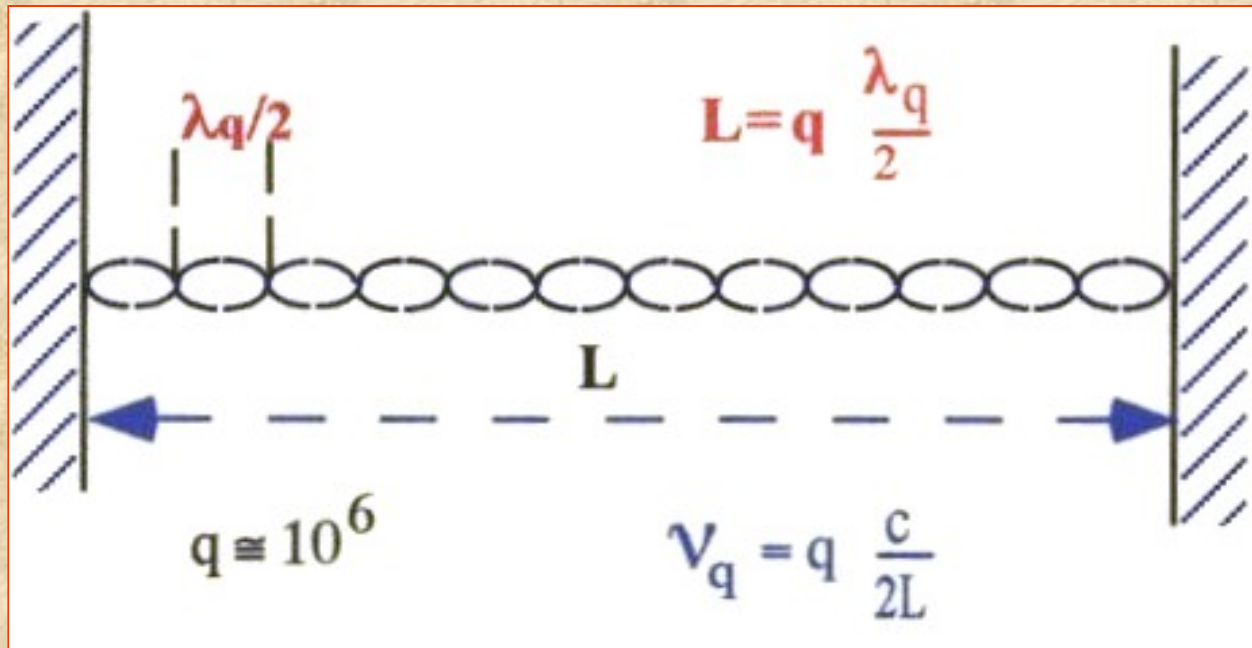
Les faisceaux à l'intérieur de la cavité ne sont pas limités transversalement. Les miroirs ne peuvent donc les réfléchir en totalité. Une partie du rayonnement s'échappe lors de chaque réflexion.



SEUIL : GAIN = PERTES

Fonctionnement multimode du laser

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

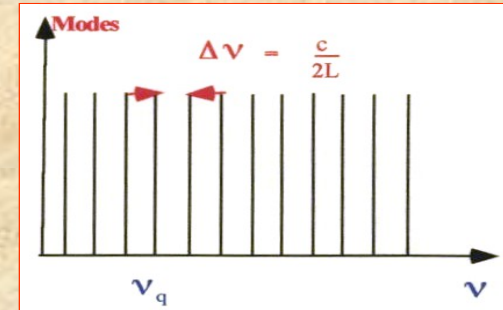


Les ondes qui peuvent se stabiliser suivant l'axe de la cavité correspondent à un certain nombre de **modes longitudinaux** (diverses valeurs de q).

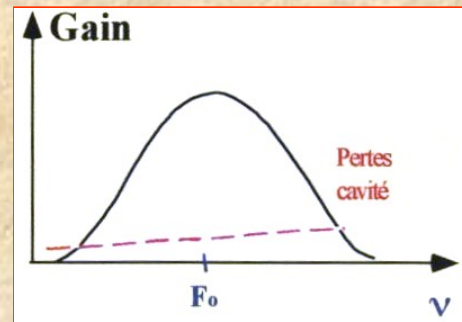
Fonctionnement multimode du laser

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)

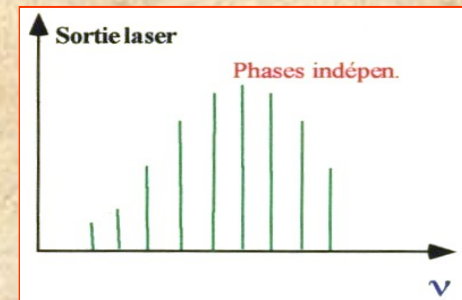


- Milieu amplificateur



- Laser multimode

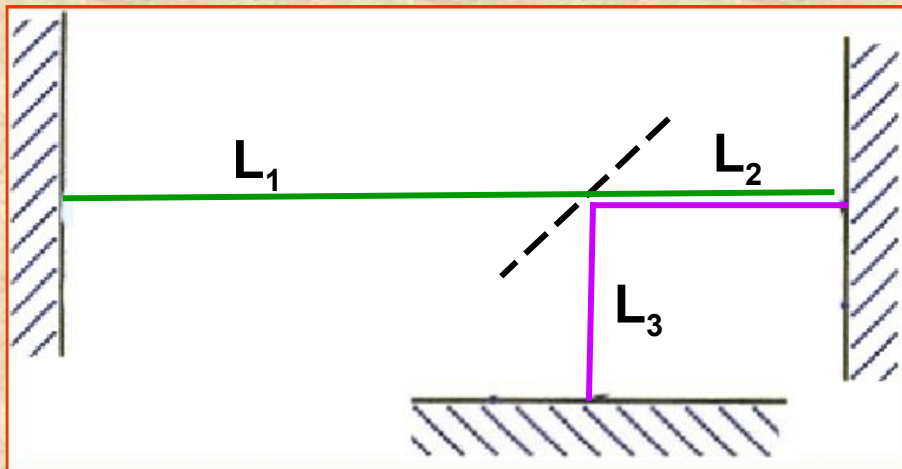
Plusieurs modes peuvent être excités simultanément



➔ 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 CO_2
- Résonateurs couplés
→ Dispositif de Fox-Smith



Conditions d'oscillation :

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

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

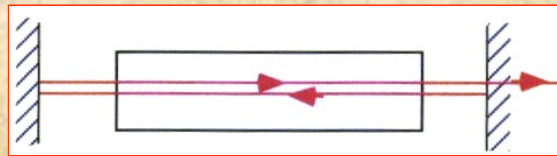
La cavité courte ($L_2 + L_3$)
sert d'élément sélectif

La réflexion sur les optiques

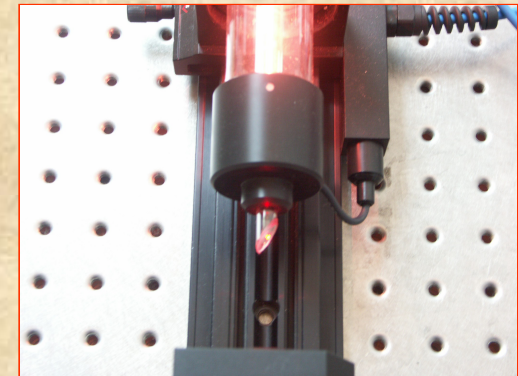
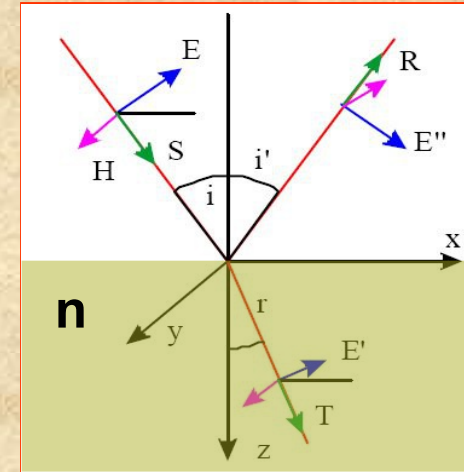
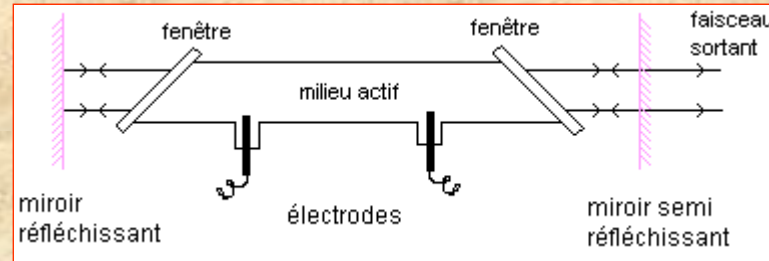
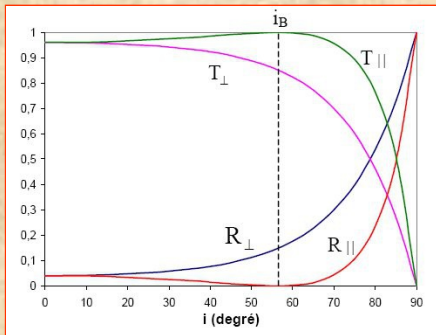
La réflexion sur un élément réfractif peut être

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

1^{ère} solution : traitement antireflet

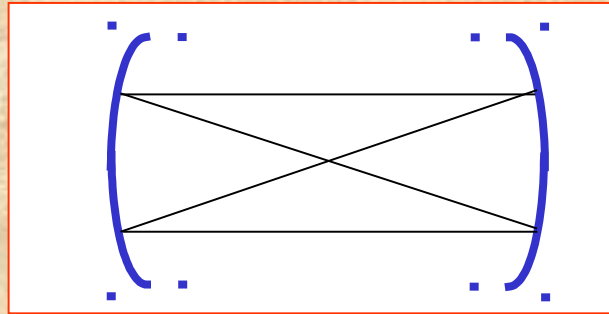


2^{ème} solution : fenêtres à incidence de Brewster : $\tan i_B = n$



Structure transverse du faisceau laser

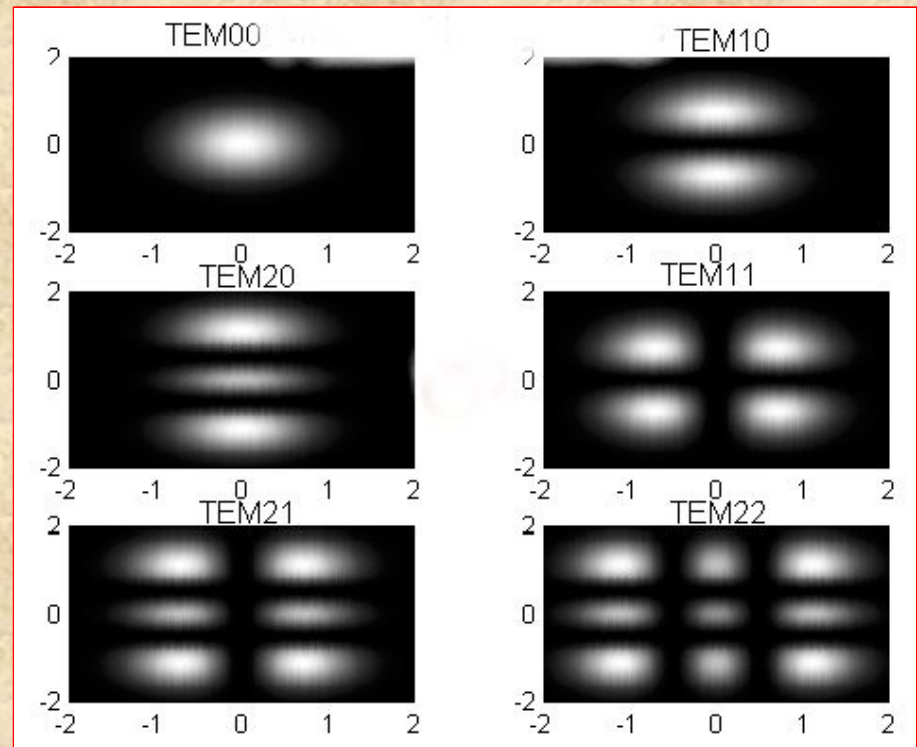
Il peut exister des ondes se propageant juste à côté de l'axe optique de la cavité et qui peuvent se renouveler après un chemin optique assez compliqué.



Modes TEM_{qr}

q : nombre de minima sur l'axe horizontal transverse

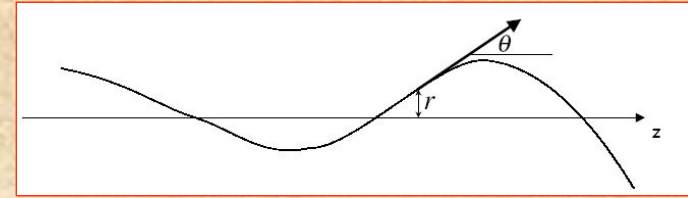
r : nombre de minima sur l'axe vertical transverse



Propagation des faisceaux gaussiens

Un rayon paraxial est caractérisé par :

- sa distance r par rapport à l'axe optique z
- son angle θ par rapport à cet axe



Les quantités r_2 et θ_2 à la sortie d'une succession d'éléments optiques dépendent linéairement des quantités d'entrée r_1 et θ_1 :

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

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

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

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

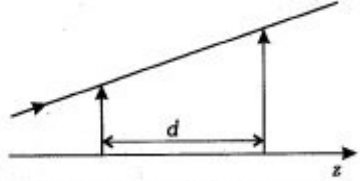
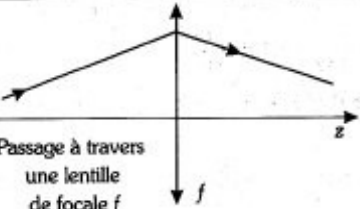

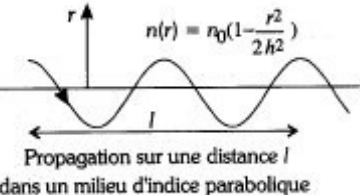
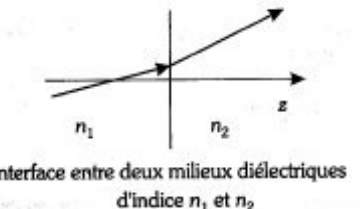
Propagation des faisceaux gaussiens

Propagation libre : $q_2 = q_1 + d$

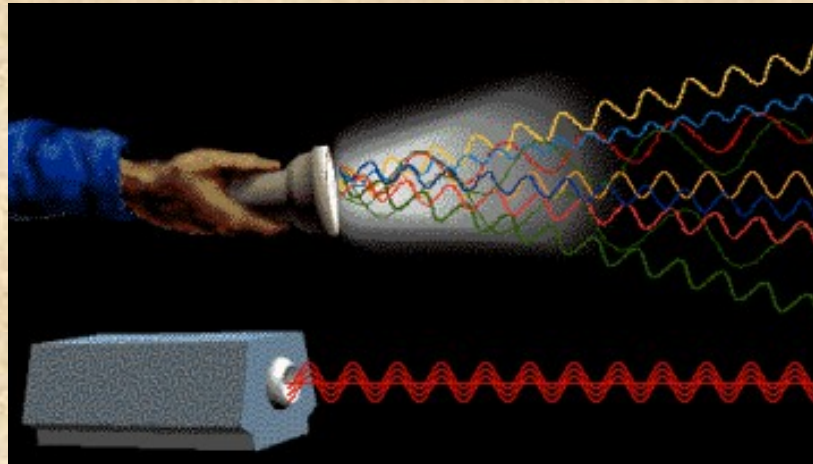
Si $q_1 = i \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$ et $\frac{1}{q_2} = \frac{1}{R} - \frac{i \lambda}{\pi w(d)^2}$

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 d</p> | $\begin{pmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ |
|  <p>Passage à travers une lentille de focale f</p> | $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix}$ |
|  <p>Réflexion sur un miroir de rayon de courbure R</p> | $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -2/R & 1 \end{pmatrix}$ |
|  <p>Propagation sur une distance l 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 n_1 et n_2</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