

# Laser : principes et applications

Niveau : L3

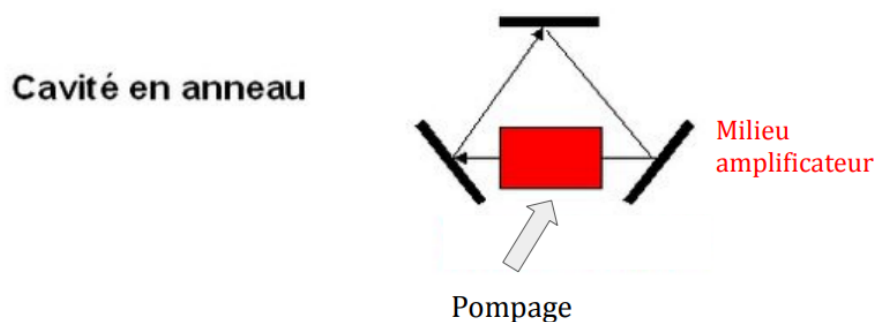
Prérequis : modèle d'Einstein (interaction lumière-matière), quantification de l'énergie, inégalité de Heisenberg, distribution de Maxwell-Boltzmann, loi de Planck, interférences

## Introduction

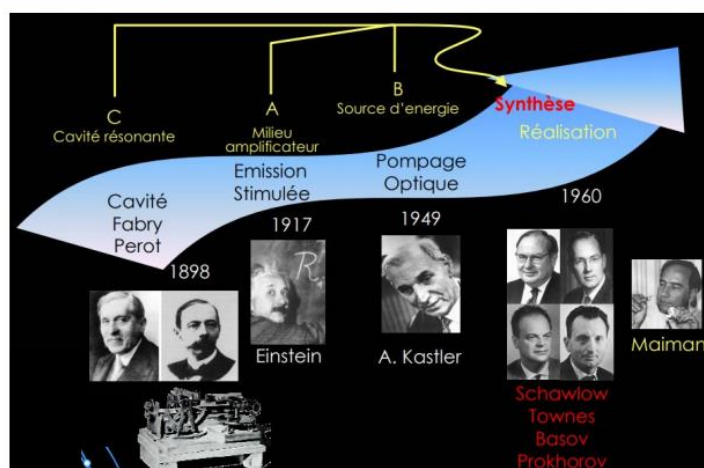
Les lasers (Light Amplification by Stimulated Emission Radiation) sont partout dans notre quotidien : codes-barres, chirurgie esthétique, lecture de CD/DVD, télémétrie...

Un laser est un dispositif qui amplifie la lumière et la rassemble en un faisceau étroit. Il est constitué d'un milieu amplificateur et d'une cavité optique (constituée de deux miroirs, dont l'un au moins est partiellement réfléchissant). Le rayonnement provient d'une émission stimulée réalisée à l'aide d'un pompage.

## Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation



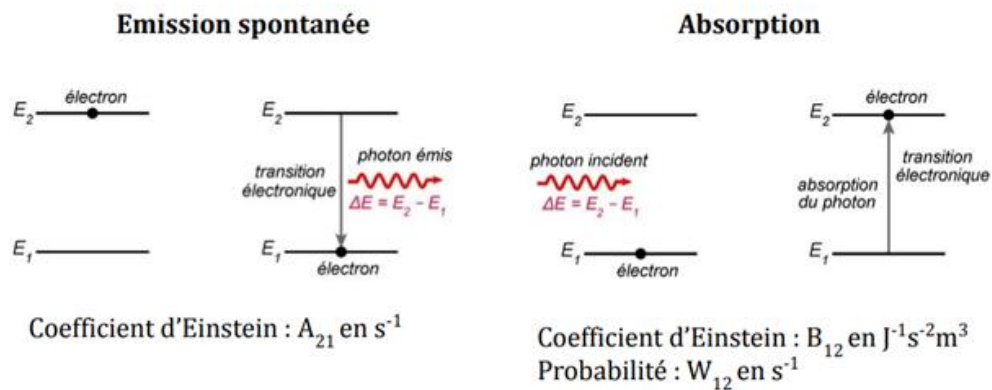
## Historique du LASER



# I Création d'une lumière laser

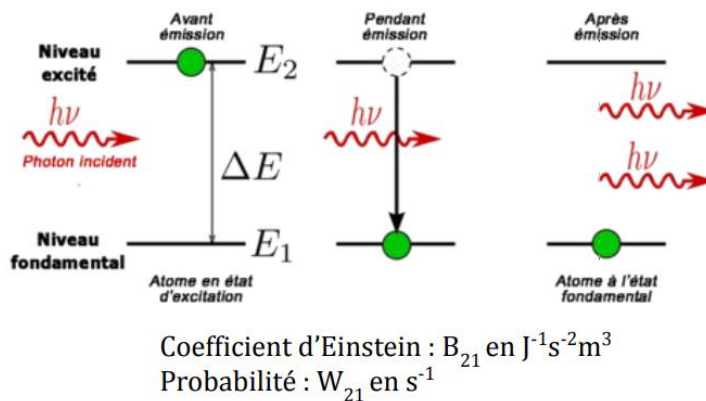
Animation

## Modèle d'Einstein de l'interaction lumière-matière



## Modèle d'Einstein de l'interaction lumière-matière

### Emission stimulée : à la base de la lumière LASER



## Relations entre les coefficients

Pour des niveaux d'énergie non dégénérés, on a :

$$B_{21} = B_{12}$$

$$W_{21} = W_{12}$$

$$W \propto B u$$

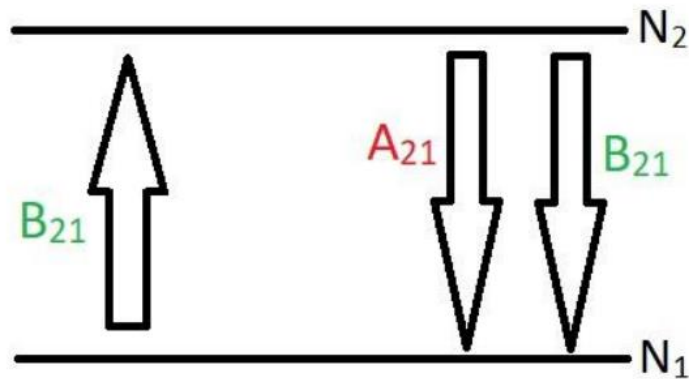
$$\frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3}$$

## 1) Amplification de la lumière

### a) Système à 2 niveaux

On considère un milieu à élargissement spectral homogène.

#### Systeme à 2 niveaux



Pour un système à 2 niveaux, les équations de populations s'écrivent :

$$\frac{dN_1}{dt} = -(A_{21} + W_{21})N_2 + W_{12}N_1 \text{ et } \frac{dN_2}{dt} = (A_{21} + W_{21})N_2 - W_{12}N_1$$

$W_{12}$  et  $W_{21}$  sont les taux de transitions associés aux coefficients d'Einstein  $B_{12}$  et  $B_{21}$ .

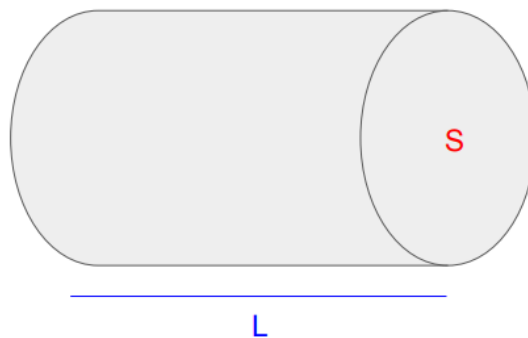
On considère que le milieu amplificateur est un cylindre et on fait un bilan de puissance. On néglige l'émission spontanée car isotrope (attention cependant : l'émission spontanée est importante pour lancer le laser).

#### Relations utiles sur le rayonnement

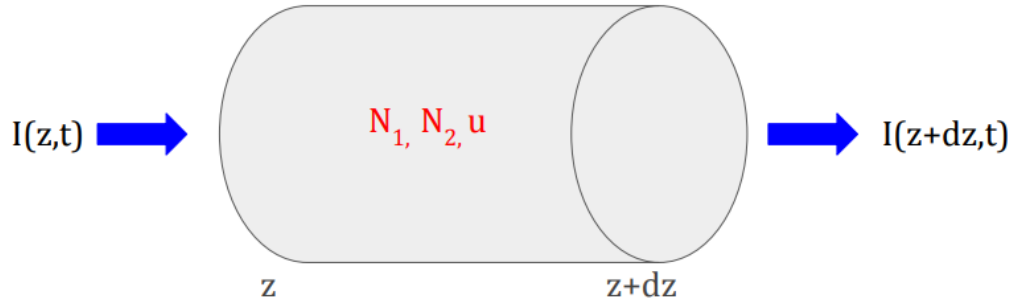
Densité volumique d'énergie du faisceau :  $u=E/SL$

Intensité lumineuse du faisceau :  $I=cu$

Section efficace pour les processus induits :  $\sigma=W/\Phi$  où  $\Phi$  flux de photons



## Bilan de puissance



On obtient :  $\frac{1}{I} \left( \frac{1}{c} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial I}{\partial z} \right) = \sigma(N_2 - N_1)$ ,  $\sigma$  est la section efficace.

On définit le coefficient d'amplification  $\alpha$  en  $m^{-1}$  (qui est aussi le gain linéique) : terme de gauche de l'équation, et la différence de population  $\Delta N$ .

On veut une amplification, donc  $\alpha > 0$ , ce qui correspond à  $\Delta N > 0$  (inversion de population).

En régime stationnaire, on obtient :  $(A_{21} + W_{21})N_2 = W_{12}N_1$ , or  $\Delta N = N_2 - N_1$  et  $N = N_1 + N_2$

Donc  $N_2 = N_1 \frac{W_{12}}{A_{21} + W_{21}}$ , soit  $N = N_1 \left( 1 + \frac{W_{12}}{A_{21} + W_{21}} \right)$ , soit  $N_1 = N \frac{A_{21} + W_{21}}{A_{21} + W_{21} + W_{12}}$  et  $N_2 = N \frac{W_{12}}{A_{21} + W_{21} + W_{12}}$

Donc  $\Delta N = N \frac{W_{12} - W_{21} - A_{21}}{A_{21} + W_{21} + W_{12}} = -\frac{A_{21}}{2W}$  car  $W_{12} = W_{21} = W$

On ne peut donc pas faire un laser avec un système à 2 niveaux, au mieux  $N_1 = N_2$  (fort pompage).

## Inversion de population

*Physique atomique, Einstein :*

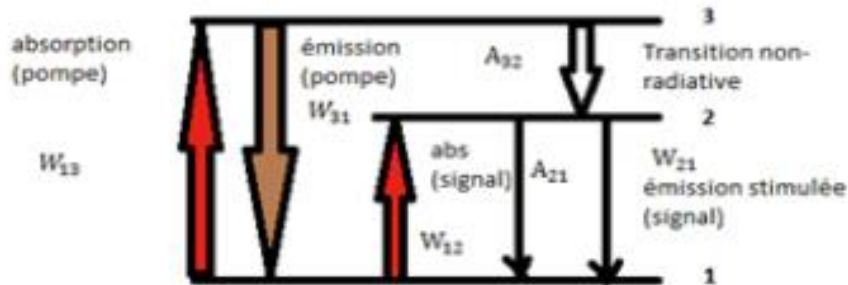
« Pour une transition donnée la probabilité d'émission stimulée (pour 1 atome dans l'état excité éclairé par 1 photon) est égale à la probabilité d'absorption (pour 1 atome dans l'état fondamental éclairé par un photon) »

**⇒ Impossible de réaliser une inversion de population pour un système à 2 niveaux !**

On peut tracer  $N_1$  et  $N_2$  en fonction de  $I$ .

De plus, pour les systèmes qu'on peut inverser, la condition d'amplification n'est pas réalisée à l'équilibre thermique (avec ordre de grandeur de transitions énergétiques à comparer à l'énergie d'agitation thermique) : il va donc falloir pomper le milieu pour amener plus d'atomes sur 2 que sur 1.

Et pour un système à 3 niveaux ?



$$N_t = N_1 + N_2 + N_3$$

$$\frac{dN_3}{dt} = N_1 \cdot W_{13} - N_3 \cdot W_{31} - N_3 \cdot A_{32}$$

$$\frac{dN_2}{dt} = N_1 \cdot W_{12} - N_2 \cdot W_{21} - N_2 \cdot A_{21} + N_3 \cdot A_{32}$$

Dans un milieu amplificateur, l'évolution des populations dans les niveaux d'énergie atteignent un régime stationnaire ( $W_{13} \neq 0$  pour  $t < 0$ ), donc les dérivées temporelles de  $N_2$  et  $N_3$  sont nulles.

On suppose que  $A_{32} \gg W_{13}$  et  $W_{13} = W_{31}$

$$\frac{dN_3}{dt} = 0 \quad \Leftrightarrow \quad N_1 \cdot W_{13} - N_3 \cdot A_{32} = 0$$

$$\Leftrightarrow \quad N_3 = N_1 \cdot \frac{W_{13}}{A_{32}}$$

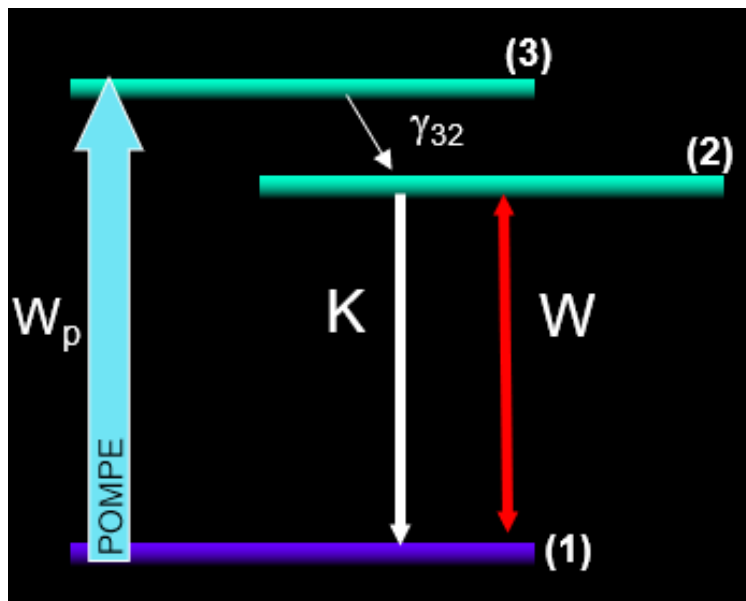
$$N_1 \gg N_3 \quad \Leftrightarrow \quad N_t \simeq N_1 + N_2$$

On peut négliger  $N_3$  dans l'expression de  $N$  car la durée de vie du niveau 3 est très petite devant la durée de vie des autres niveaux.

$$\frac{dN_2}{dt} = N_1 \cdot W_{12} - N_2 \cdot W_{21} - N_2 \cdot A_{21} + N_3 \cdot A_{32}$$

$$\frac{dN_2}{dt} = 0 \quad \Leftrightarrow \quad N_2 = \frac{N_t \cdot (W_{12} + W_{13})}{W_{21} + W_{12} + A_{21} + W_{13}}$$

Ainsi,  $\Delta N = N \frac{2(W + W_{13})}{2W + W_{13} + A_{21}} - N = N \frac{W_{13} - A_{21}}{2W + W_{13} + A_{21}}$ , il faut que  $W_{13} > A_{21}$ , pour réaliser cette condition il faut un pompage efficace.

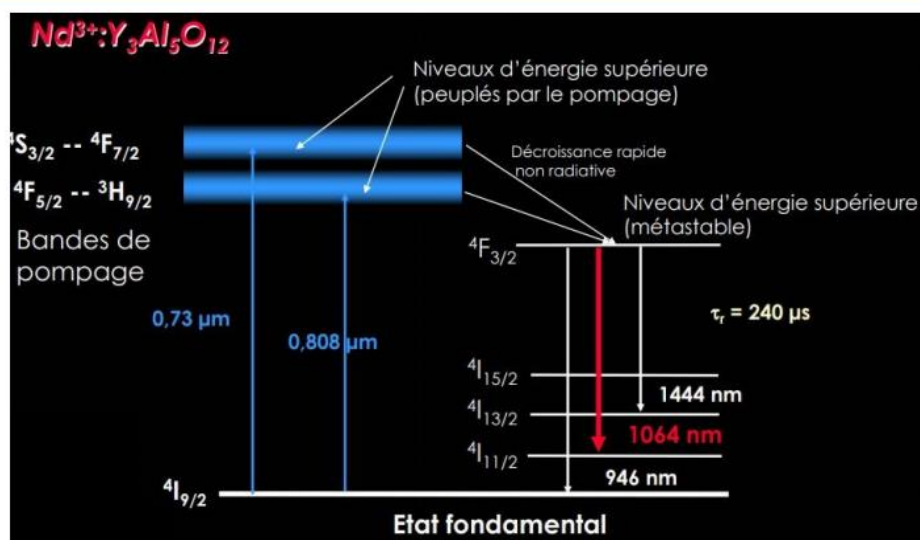


On préférera utiliser un système à 4 niveaux.

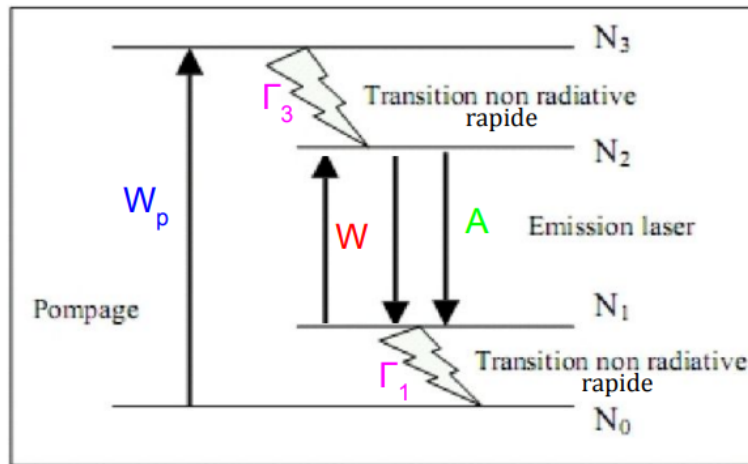
## b) Système à 4 niveaux

Ex : laser Nd-YAG

### Laser à 4 niveaux néodyme-YAG



## Laser à 4 niveaux



## Laser à 4 niveaux : équations de population

$$\frac{dN_0}{dt} = \Gamma_1 N_1 - W_p N_0$$

$$\frac{dN_1}{dt} = -\Gamma_1 N_1 - W N_1 + W N_2 + A N_2$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \Gamma_3 N_3 + W N_1 - W N_2 - A N_2$$

$$\frac{dN_3}{dt} = -\Gamma_3 N_3 + W_p N_0$$

Après calculs, on obtient :  $\Delta N = \frac{N \frac{W_p}{A} (1 - \frac{A}{\Gamma_1})}{1 + \frac{W}{A}}$

L'inversion de population est réalisée si  $\Gamma_1 > A$ , ce qui est réalisé par hypothèse (transitions non radiatives rapides).

On définit  $\Delta N^0$  la différence de population non saturée et  $\alpha^0$  le coefficient d'amplification non saturé tels que :  $\frac{\Delta N}{\Delta N^0} = \frac{\alpha}{\alpha^0} = \frac{1}{1 + \frac{I}{I_s}}$

➔ Phénomène de saturation :  $\Delta N^0$  et  $\alpha^0$  sont les valeurs maximales qu'on peut avoir

On définit le gain :  $G = \frac{I(l)}{I(0)}$  où  $l$  est la longueur du milieu amplificateur : on regarde l'intensité après et avant le milieu amplificateur et on veut que  $G$  soit positif.

Avec le bilan d'énergie sur le cylindre en régime stationnaire, on voit que  $\alpha$  est proportionnel à la différence de population et que  $G$  évolue comme une exponentielle de la différence de population.

## 2) Cavité : résonateur optique

On veut que la cavité soit stable, c'est-à-dire qu'elle confine le rayonnement laser proche de l'axe optique.

On cherche les modes pouvant se propager : ce sont ceux qui se retrouvent en phase avec eux-mêmes comme un tour de la cavité (j'ai pris une cavité en anneau) :  $\nu_p = \frac{pc}{d}$ ,  $p$  est un entier naturel,  $d$  est la taille de la cavité.

On peut tracer la répartition des modes qui peuvent se propager en fonction de la fréquence (peigne).

Cependant cette cavité apporte des pertes : au niveau des miroirs surtout (en particulier celui qui transmet le rayon laser). On peut définir un coefficient de pertes  $\alpha_p$  évalué pour le milieu amplificateur inactif et par unité de longueur du milieu amplificateur.

## 3) Fonctionnement du laser

Maintenant qu'on a étudié tous les éléments, mettons tout ça ensemble :

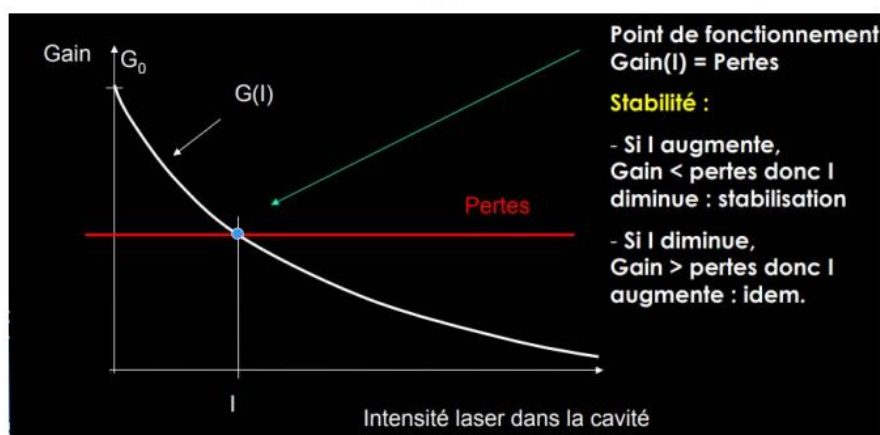
Après un tour de cavité, l'intensité vaut :  $I(d) = I(0)Ge^{-\alpha_p l}$ . Il faut que  $G > e^{\alpha_p l}$  pour avoir  $I(d) > I(0)$ .

➔ Amorçage du laser (sinon tous les photons partent dans les pertes)

Ensuite en régime permanent : ajustement du gain pour compenser les pertes  $G = e^{\alpha_p l}$  (car  $I$  augmente quand l'oscillation a démarré mais en parallèle  $G$  diminue car la différence de population également : saturation)

### Bilan du fonctionnement du laser

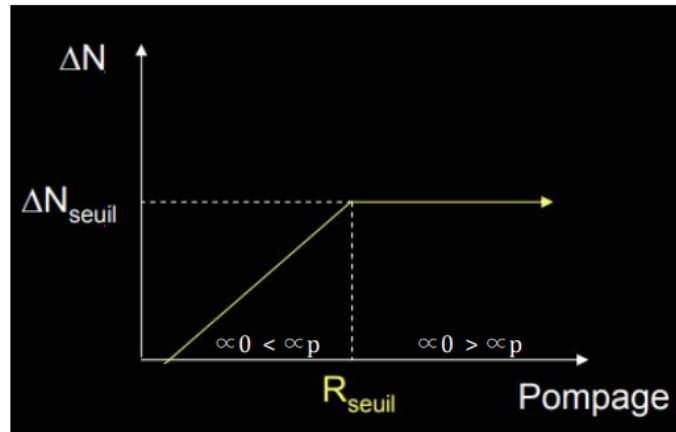
Condition sur le gain : gain = pertes





## Bilan du fonctionnement du laser

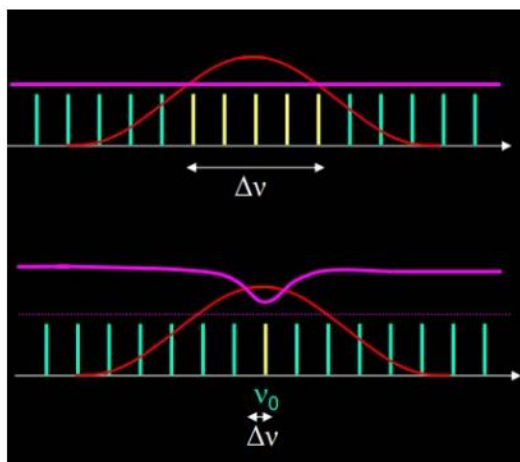
Condition sur le gain : gain = pertes



## Bilan du fonctionnement du laser

Condition sur le gain : gain = pertes

Condition sur la cavité : résonance



pertes

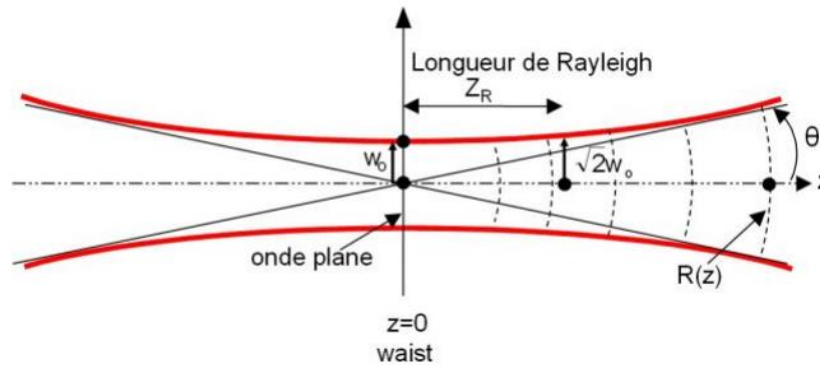
gain

modes possibles avec la cavité

Maintenant que nous avons expliqué le principe de fonctionnement du laser, voyons comment il a été exploité pour développer des instruments utiles au plus grand nombre mais également aux scientifiques et industriels.

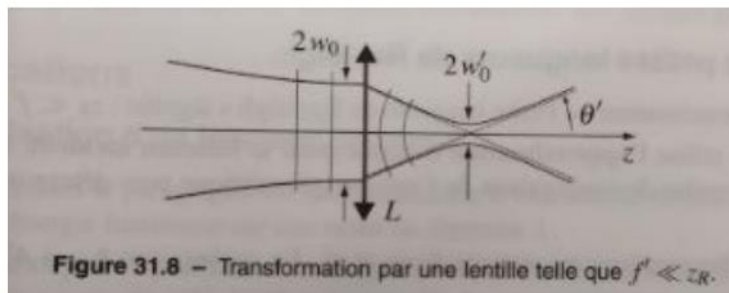
## II Applications

## Faisceau gaussien



Rayon du faisceau :  $w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_0}\right)^2}$  . Angle d'ouverture :  $2\theta = \frac{\lambda}{\pi w_0}$

## Focalisation d'un faisceau gaussien par une lentille



$$w'_0 = \frac{\lambda f'}{\pi w_0}$$

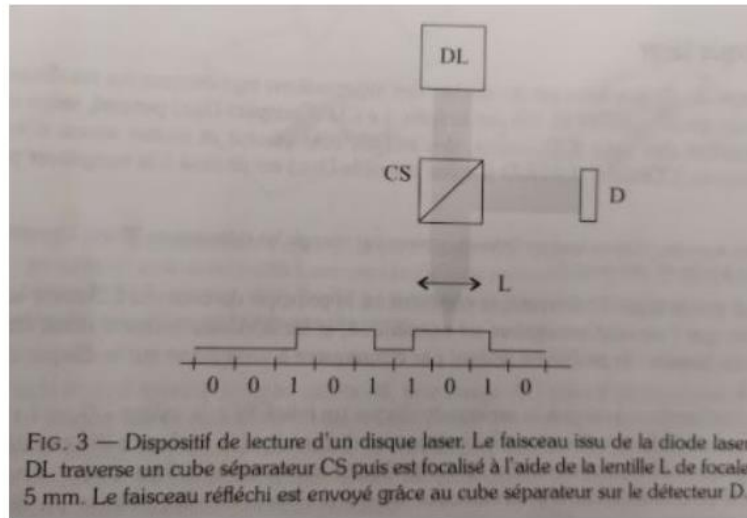
### 1) Lecture de disques

- ➔ Codage binaire tel que 0 est "plat" (trou ou plateau) et 1 est un changement de relief (passage d'un trou à un plateau et vice-versa).

Un détecteur repère ces changements de relief en étudiant la réflexion d'un rayon laser : la taille des trous est choisie de sorte à avoir interférences destructives entre les rayons incident et réfléchi quand le rayon passe dans un trou, le détecteur peut donc repérer les variations d'intensité.

On cherche un rayonnement de plus faible longueur d'onde possible car la longueur d'onde est proportionnelle à la largeur du faisceau gaussien en sortie d'une lentille : on cherche à augmenter la capacité de stockage sur une même surface de disque.

## Lecture de CD, DVD, Blu-Ray



## Lecture de CD, DVD, Blu-Ray

| Nom | Année | Longueur d'onde | Domaine    | Capacité |
|-----|-------|-----------------|------------|----------|
| CD  | 1982  | 780 nm          | infrarouge | 0,8 Go   |
| DVD | 1997  | 650 nm          | rouge      | 8 Go     |
| BD  | 2006  | 405 nm          | bleu       | 100 Go   |

## 2) Télémétrie

Exemple d'application du laser Nd-YAG (en régime impulsionnel) : Mesure de la distance Terre-Lune par temps de vol.

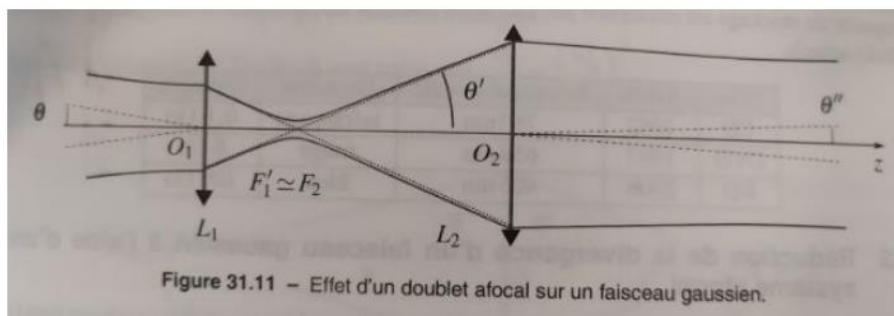
Problèmes d'élargissement des faisceaux gaussiens : diamètre du faisceau en sortie du télescope de l'ordre de 10 mm qui arrive sur la Lune avec un diamètre de 150 km ! Or les récepteurs sur la Lune ont une taille de l'ordre du mètre, ce qui fait qu'il y a beaucoup de photons perdus (de même pour le retour).

Pour régler (partiellement) ce problème, on utilise un doublet afocal. Malgré tout, très peu de photons sont reçus : il faut regarder sur beaucoup d'impulsions pour en déduire la distance Terre-Lune.

## Télémétrie laser Terre-Lune



## Effet d'un doublet afocal sur un faisceau gaussien



## Conclusion

Dans cette leçon nous avons vu le fonctionnement continu d'un laser. Mais il existe aussi des lasers impulsionnels comme nous venons de le voir. Il y a notamment des recherches pour créer de plus en plus courtes impulsions.

## Bibliographie

-Lees lasers, Dangoisse

-J'intègre PC-PC\*, Dunod

-[http://www-lpl.univ-paris13.fr/pon/lumen/documents/Cours\\_complet.pdf](http://www-lpl.univ-paris13.fr/pon/lumen/documents/Cours_complet.pdf)

-[https://youtu.be/UDxdq\\_ogqR8](https://youtu.be/UDxdq_ogqR8)