

CH V. LASER et ses applications

I. Définition :

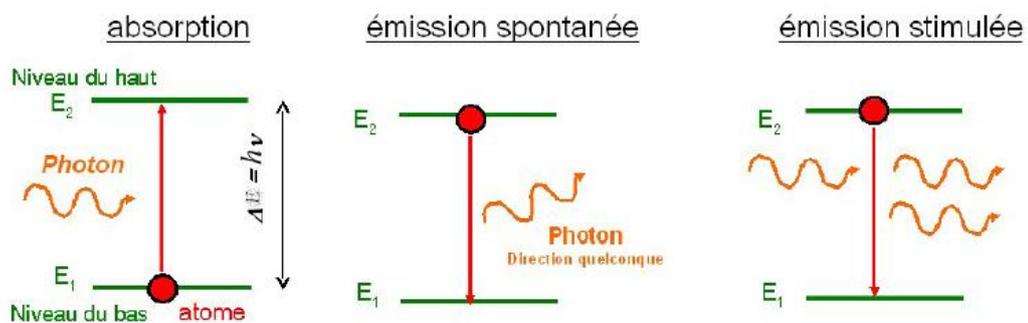
Le mot laser veut dire Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation c.-à-d. "amplification de lumière par émission stimulée". Les lasers sont des dispositifs qui produisent ou amplifient un rayonnement cohérent pour des longueurs d'onde situées dans le domaine optique des ondes électromagnétique couvrant l'infrarouge, le visible et l'ultraviolet.

En 1958, Richard Townes et Arthur Schawlow posent les bases théoriques du laser et en 1960 Theodore Maiman réalise le premier laser.

II. Bases physiques :

1. Emission-absorption :

Il existe trois mécanismes d'interaction schématisés



• Absorption : Un atome du niveau du bas peut monter dans le niveau du haut par effet d'absorption d'un photon de fréquence $h\nu$.

• Emission spontanée : Un atome du niveau du haut peut se désexciter spontanément vers le niveau du bas et engendrer l'émission d'un photon de fréquence $h\nu$ si la transition entre E_2 et E_1 est radiative. Ce photon a une direction et une phase aléatoire.

• Émission stimulée : par l'action d'un photon incident, un atome du niveau du haut peut également se désexciter en émettant un photon dit "stimulé" dont les propriétés sont exactement les mêmes que le photon incident.

il faut donc trouver des conditions qui permettent de privilégier l'émission stimulée au détriment de l'absorption et de l'émission spontanée la solution est de jouer sur les populations des niveaux : il faut s'arranger pour avoir plus d'atomes sur le niveau du haut que sur le niveau du bas. L'astuce va donc consister à éclairer fortement le milieu, un bon moyen pour cela est le confinement des photons dans une cavité.

2. Inversion de population et pompage

À l'équilibre thermodynamique, les populations des deux niveaux sont données par la loi de Boltzmann



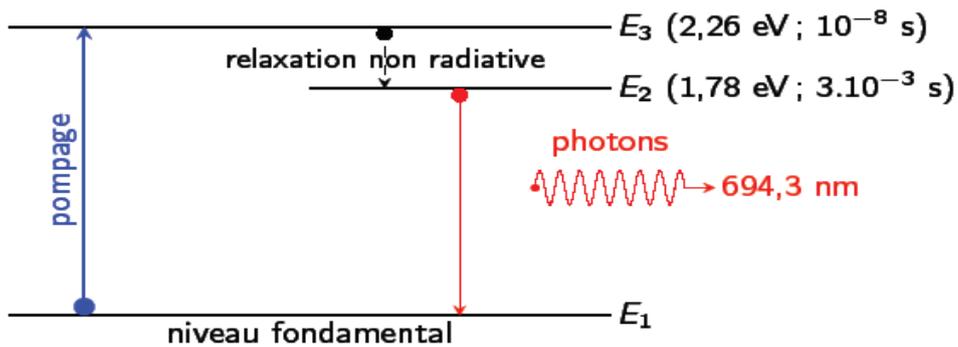
$$N_i = C^{te} e^{-E_i/k_B T} \quad \text{avec} \quad k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$$



$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-\Delta E/k_B T} = e^{-h\nu/k_B T} < 1$$

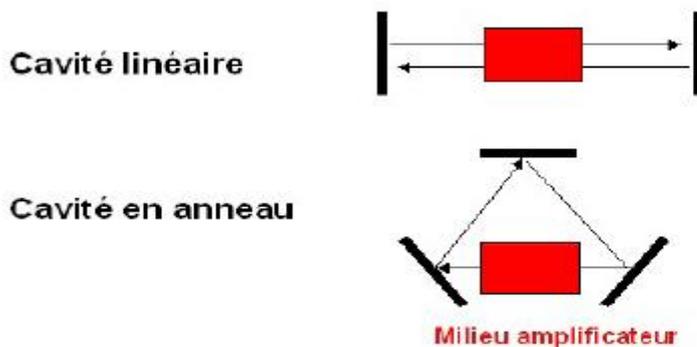
En général on a $dN_i = A_{ij} N_j dt$ A_{ij} la probabilité de transition ou coefficient d'Einstein.

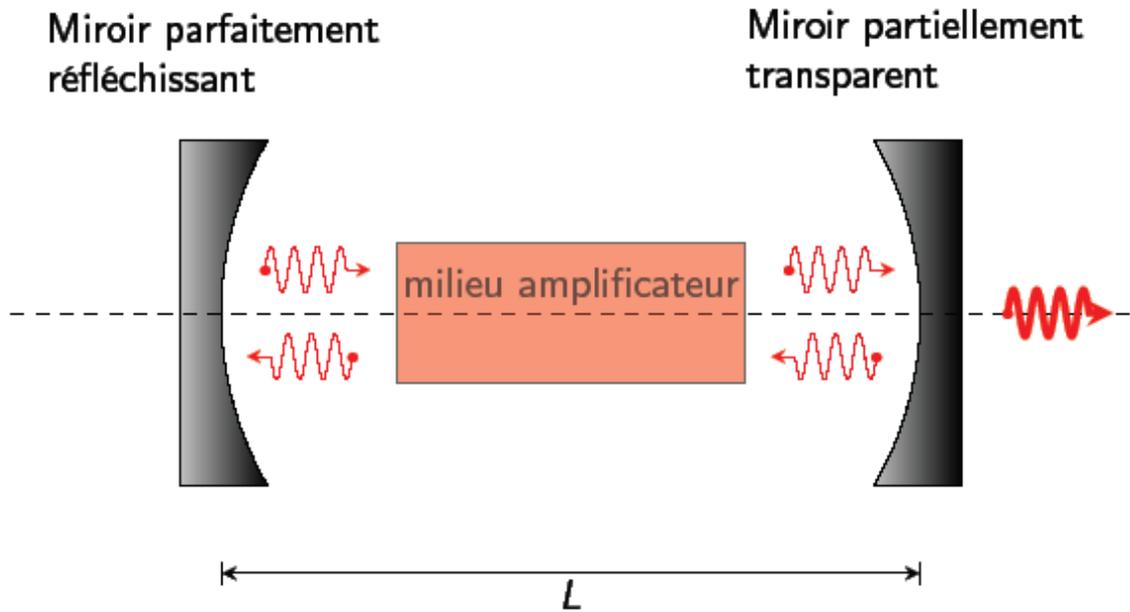
But : "inverser les populations" par un apport d'énergie extérieure d'origine optique, électrique voire ou chimique.



3. Cavité

La cavité ou résonateur optique est composée de miroirs qui permettent à la lumière de passer de nombreuses fois dans le milieu amplificateur. On peut trouver deux types de cavités : des cavités dites "linéaires" (la lumière fait des allers et retour) ou des cavités en anneau (la lumière fait des tours).

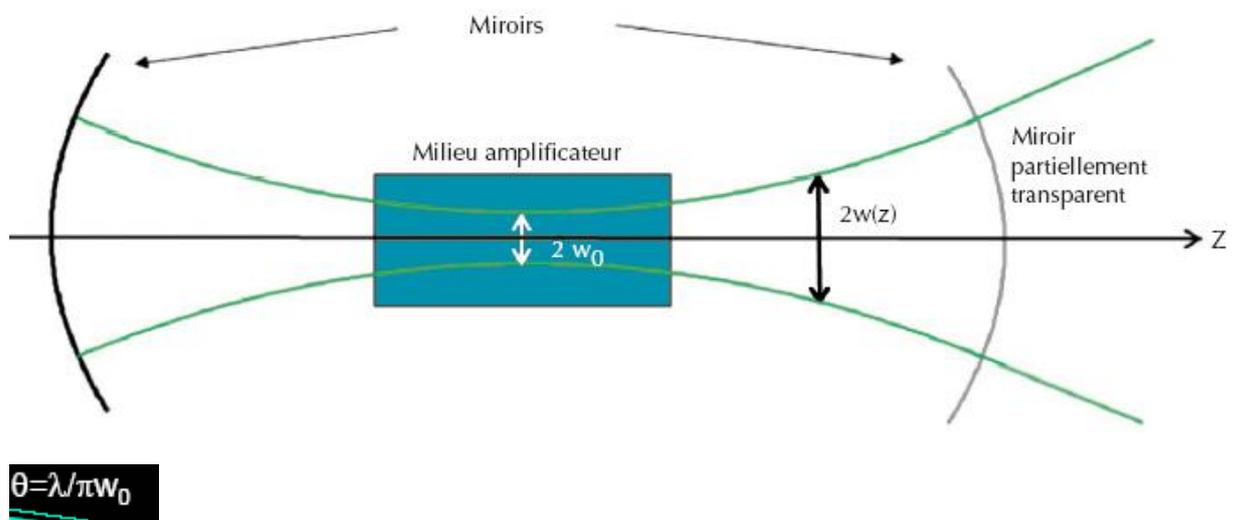




On suppose dans la suite une cavité linéaire.

Parmi tous les photons spontanés émis au départ par la “lampe-milieu amplificateur”, la cavité sélectionne un pinceau de lumière particulier (une onde gaussienne) et le nombre de photons portés par ce pinceau est rendu considérable par le processus d’émission stimulée existant à chaque aller et retour.

Le rayon du faisceau laser prend une valeur minimale, appelée col du faisceau notée w_0 . Cette valeur dépend du rayon de courbure des miroirs de la cavité. Le rayon du faisceau (noté w) évolue au cours de la propagation le long de l’axe z suivant la relation $w(z) = w_0 [1 + (z/z_R)^2]^{1/2}$. La longueur de Rayleigh, notée $z_R = \pi w_0^2 / \lambda$.



III. Types des LASERs :

1. Les lasers à gaz

Les lasers à gaz ont pour point commun de partager la même source de pompage : l'électricité. Les espèces gazeuses sont portées dans l'état excité de façon directe par collision avec des électrons ou de façon indirecte par collision avec d'autres gaz, eux-mêmes excités électriquement.

Les lasers à gaz couvrent tout le spectre optique, depuis l'ultraviolet jusqu'à l'infrarouge lointain. Cependant, le spectre n'est pas couvert continûment : les lasers à gaz émettent des raies très fines spectralement.

Parmi les lasers à gaz les plus courants, on trouve (de l'UV à l'IR lointain) :

- les excimères (ArF : 193 nm, KrF : 249 nm, XeCl : 308 nm)
- laser à argon ionisé (raies dans le bleu et le vert)
- laser hélium néon (c'est le néon qui est utilisé pour l'effet laser) 632,8 nm , 543,3 nm , 1,15 μm , 3,39 μm .
- laser CO₂ : très nombreuses raies autour de 9,6 μm et 10,6 μm

2. Les lasers à colorant

Les lasers à colorant utilisent des molécules organiques émettant en général dans le visible (d'où leur nom de colorant). Ces molécules sont diluées dans un solvant (en général alcoolique, comme l'éthylène glycol ou le méthanol).

Le pompage des lasers à colorant est optique : soit par des lampes à arc, soit, dans la majorité des cas par d'autres lasers (lasers à gaz ou laser à solide).

Le spectre couvert est l'intégralité du visible.

3. Les lasers à solide

Dans les lasers à solides, on distingue les lasers à semi-conducteur (ou diodes laser) pompées électriquement et des solides à matrice cristalline ou vitreuse, pompés optiquement.

Les diodes lasers utilisent les recombinaisons entre les paires "électron-trou" existant dans les semi-conducteurs pour émettre de la lumière sous forme d'émission stimulée. Le pompage est électrique avec un rendement qui peut atteindre 60%. Selon les matériaux choisis (GaN, GaAlInP, AlGaAs,...) les longueurs d'onde peuvent couvrir du proche UV à l'infrarouge proche.

IV. Applications :

Les applications lasers utilisent les propriétés de cohérence spatiale et temporelle du laser. Elles peuvent être classées plus ou moins en fonction de la réflexion ou de l'absorption du laser. Ainsi, deux grandes familles apparaissent, celle contenant des applications de transfert d'information, et celle traitant d'un transfert de puissance.

1. Transfert d'information

- Holographie
- Lecture et enregistrement de support optique numérique (CD, DVD, Laser Disc...)
- Electro photographie (ou « xérogaphie »), procédé des imprimantes laser
- Télécommunications via réseaux de fibres optiques
- Transmission inter-satellitaire
- Désignateur laser de cibles lors d'attaques par des munitions guidées

2. Métrologie

- Télédétection
- Collimation d'instrument optique (exemple : télescope newton)
- Granulométrie et vélocimétrie
- Mesure de distance (télémétrie par interférométrie)
- Vibrométrie
- Étude de l'atmosphère (Lidar)
- Métrologie des fréquences optiques
- Caractérisation des matériaux par ellipsométrie ou spectroscopie
- Visualisation d'écoulements (tomographie laser)

3. Transfert de puissance

- Refroidissement d'atomes par laser
- Imprimerie : périphériques d'écriture de plaques offset ([CtP](#))
- Centrale solaire orbitale
- Transmission d'énergie sans fil

4. Procédés laser et matériaux

- Fusion superficielle de matériaux
- Soudure de matériau homogène ou hétérogène
- Découpe
- Perçage par percussion mécanique
- Fabrication additive
- Décapage de surface
- Durcissement de surface
- Choc par ablation laser (test d'adhérence à l'interface de matériaux hétérogènes...)
- Dopage laser des semi-conducteurs

5. Interaction laser/matière : phénomènes physiques

- Photoacoustique

- Acousto-optique (voir aussi Modulateur acousto-optique)
- Fluorescence induite par laser
- Diffusion dynamique de la lumière
- Accélération laser-plasma
- Filamentation laser

6. Applications médicales

- Ophtalmologie
- Dermatologie : épilation laser, détatouage laser, ...
- Dentisterie : laser dentaire Erbium, laser dentaire YAP
- Physiothérapie (débridement)
- Trépanation
- traitement de certains types de douleurs avec un laser basse énergie : l'efficacité semble probante mais le mécanisme d'action reste inconnu

7. Nucléaire

- Fusion nucléaire contrôlée laser Mégajoule

8. Applications militaires

- Armes anti-satellite, anti-missile, incapacitantes, déminage... (Boeing YAL-1 ; IDS dit Programme StarWars)
- Pod de désignation laser
- Aide à la visée

9. Applications policières

- Utilisation pour la détection d'empreintes latentes dans le domaine de la criminalistique
- Cinémomètre laser portable et autonome qui permet de détecter la vitesse des véhicules sur une voie ouverte à la circulation publique

10. Artistique

- Spectacle « son et lumière »
- Harpe laser
- Projection d'image sur écran dans les salles de cinéma numérique