

# Annexe B

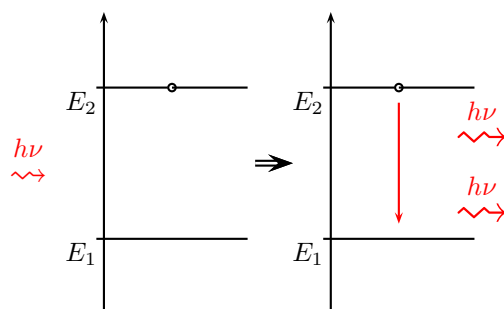
## Lasers

### B.1 Principe de fonctionnement

L'acronyme L.A.S.E.R. signifie Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Ce type de source fonctionne donc par amplification du phénomène d'émission stimulée. Le phénomène d'émission stimulée, prédit théoriquement par Einstein en 1917, a été observé bien plus tard, et les premiers lasers ont été mis au point dans les années 1950, grâce au système de pompage optique inventé en 1950 par Alfred Kastler.

#### B.1.1 Émission stimulée et milieu amplificateur

L'émission stimulée consiste à provoquer l'émission, par un atome dans un état excité  $E_2$ , d'un photon d'énergie  $h\nu$ , par absorption d'un photon de même énergie  $h\nu$ . Ainsi l'atome rejoint l'état fondamental  $E_1$  en émettant deux photons (le photon incident, absorbé, est ensuite réémis) de même énergie  $h\nu$ , même direction, et même phase.

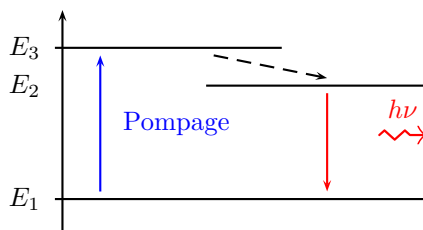


Pour chaque photon incident, un photon supplémentaire est émis, il s'agit bien d'un phénomène d'amplification. D'où le nom donné à la source de ce rayonnement dans un laser : "milieu amplificateur".

Ce phénomène est en concurrence avec l'émission spontanée, beaucoup plus probable. Il faut donc fournir de l'énergie au milieu amplificateur de sorte que suffisamment d'atomes se trouvent dans un état excité, et suffisamment de photons d'énergie  $h\nu$  sont émis pour provoquer une émission stimulée avant que l'émission spontanée ait lieu.

#### B.1.2 Pompage optique et inversion de population

Un système de pompage optique fournit de l'énergie au milieu amplificateur par décharge électriques (en continu ou par impulsions) ou par un faisceau lumineux.



Les atomes du milieu amplificateur sont amenés à un niveau d'énergie  $E_3 > E_2$ , d'où ils se désexcitent très rapidement vers  $E_2$  (qui doit être, de préférence, un état métastable, i.e. avec une assez longue durée de vie). Ceci crée une "inversion de population" : le nombre d'atome dans l'état  $E_2$  est supérieur au nombre d'atomes dans l'état  $E_1$ .

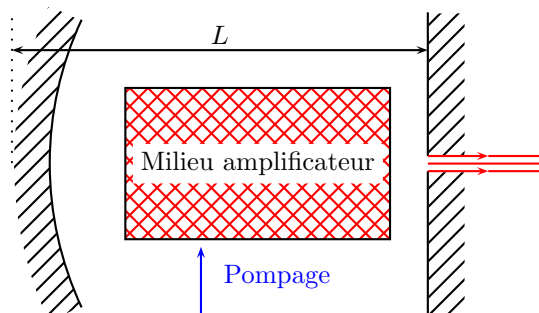
### B.1.3 Domaines de longueurs d'onde de l'oscillateur optique

Les atomes du milieu amplificateur oscillent constamment entre les états  $E_1$  et  $E_2$  : on a donc un oscillateur optique. Le pompage optique permet de compenser les pertes et de maintenir une amplitude (en termes de nombre de photons émis) constante.

Différents domaines de longueurs d'onde sont accessibles selon le matériau amplificateur (MA) utilisé. En général, un rayonnement UV ou visible est produit par un MA sous forme atomique, et un rayonnement IR nécessite un MA sous forme cristalline ou moléculaire. Voici quelques exemples :

- laser He-Ne (MA gazeux) :  $632,8\text{ nm}$  ou  $3,39\ \mu\text{m}$  (systèmes d'alignement et arts du spectacle) ;
- laser à rubis (MA solide cristallin) :  $694\text{ nm}$  (les premiers lasers mis au point) ;
- laser Nd :YAG (MA solide cristallin  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  dopé au néodyme) :  $1064\text{ nm}$  (très utilisés en chirurgie et dans l'industrie) ;
- laser Rhodamine 6G (MA solution de colorant dans du méthanol) :  $551\text{ nm}$  (MA peu onéreux et réglage très précis de la longueur d'onde émise) ;
- laser  $\text{CO}_2$  (MA gazeux) :  $10,6\ \mu\text{m}$  (lasers puissants utilisés pour la gravure ou la découpe de matériaux).

### B.1.4 Cavité résonnante et modes



Le milieu amplificateur d'un laser est placé au milieu d'une cavité résonnante, composée d'un miroir concave à une extrémité, et d'un miroir plan à l'autre extrémité, dont une petite partie de la surface, semi-transparente, laisse sortir le faisceau. La lumière émise effectue de nombreux allers et retours dans cette cavité, ce qui accentue le phénomène d'amplification.

Les dimensions de la cavité conditionnent la stabilité du faisceau laser sortant. En effet, les ondes lumineuses se propageant dans l'un et l'autre sens de la cavité se superposent, et par un phénomène d'interférence, il ressort que pour qu'une onde se propage dans une cavité de longueur  $L$ , sa longueur d'onde doit vérifier :  $2L = k\lambda$ ,  $k \in \mathbb{N}^*$ . Ceci permet aussi de sélectionner un mode, i.e. une longueur d'onde parmi les différents rayonnements que peut émettre le milieu amplificateur choisi (cf. exemples donnés plus haut).

## B.2 Propriétés et applications

Chaque propriété du laser est mise à profit dans une ou plusieurs applications, dont vous verrez quelques illustrations en TD.

### B.2.1 Monochromaticité

Le principe de l'émission stimulée fait du laser une source de lumière monochromatique. Voici quelques applications :

- des mesures de vitesse par effet Doppler ;
- le refroidissement d'atomes.

### B.2.2 Directivité

La conformation de la cavité résonnante et la petite ouverture par laquelle sort le faisceau laser en font une source très directive. L'angle d'ouverture d'un faisceau laser est de l'ordre de  $\theta \sim 10^{-3} \text{ rad}$ , ce qui veut dire qu'un laser produit une tache lumineuse de 10 cm de diamètre sur un écran situé à 100 m (diamètre du faisceau sortant  $\sim 0,5 \text{ mm}$ ).

La directivité d'un faisceau laser est mise à profit pour des mesures indirectes de distance, consistant en la mesure du temps nécessaire pour parcourir une certaine distance (aller + retour). Cette méthode est utilisée par exemple, par les géomètres (travaux de repérage et/ou de construction), les astronomes (mesure de la distance Terre-Lune), et aussi pour repérer et analyser les polluants atmosphériques (aérosols, poussières). La directivité du faisceau lumineux assure que la lumière réfléchi sera observable, même, par ex. après un long trajet aller-retour dans l'espace.

### B.2.3 Cohérence

Les photons émis à un instant donné par un laser sont émis en phase : on dit que le laser est une source de lumière cohérente. Ceci est très utile pour des expériences et applications à bases d'interférences, i.e. où les déphasages doivent être mesurés avec précision : stockage optique de données (CD, DVD), détection d'ondes gravitationnelles par interférométrie (cf. chapitre 2).

### B.2.4 Concentration d'énergie

Le faisceau d'un laser concentre une appréciable quantité d'énergie. Prenons l'exemple d'un laser He-Ne de faible puissance :  $P = 0,2 \text{ W}$  concentrée sur un faisceau de diamètre  $d = 0,4 \text{ mm}$ . La puissance surfacique de ce laser vaut  $P_S = P / (\pi d^2 / 4) = 6.10^6 \text{ W.m}^{-2}$ . Ceci est déjà bien supérieur à la puissance surfacique reçue du Soleil :  $P_S \simeq 1 \text{ kW.m}^{-2}$ . Des lasers de différentes puissance ont été étudiés dans le TD 2.

On peut concentrer encore plus de puissance sans augmenter le coût énergétique avec un laser à impulsions. En effet :  $E = P \Delta t$ , donc plus l'impulsion est courte plus la puissance émise est importante, à énergie totale nécessaire constante.

Ces caractéristiques sont utilisées dans divers domaines :

- industrie : découpes et soudures ;
- chirurgie, par ex. dermoabrasion ou chirurgie ophtalmologique ;
- recherche : démarrage de réactions de fusion thermonucléaire en réacteur.