

Physique du laser

I Principe de l'amplification de la lumière

1. Grandeurs décrivant le rayonnement
2. Interaction du rayonnement avec la matière
3. Coefficients d'Einstein
 - a. Écriture simplifiée
 - b. Durée de vie de l'état excité
 - c. Profil de résonance atomique
4. Condition d'amplification
5. Méthodes d'inversion (HP)

II Le laser : un oscillateur quantique

1. Principe d'un oscillateur à réaction
2. Cas du laser
3. Gain de la cavité amplificatrice
4. Condition de démarrage du laser
5. Sélection de longueur d'onde par la cavité
6. Limitation de la puissance

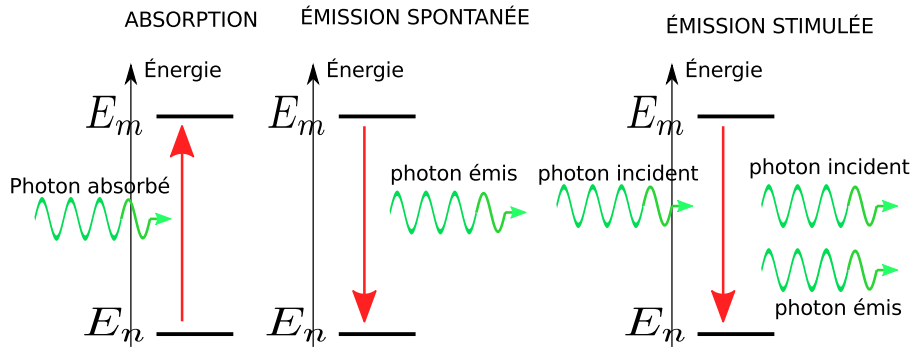


FIGURE 1 – Trois processus d'interaction entre un atome et le rayonnement

Émission spontanée

L'émission spontanée traduit la tendance naturelle d'un atome excité à revenir vers un état d'énergie plus basse après un temps plus ou moins long. Un photon émis spontanément ne possède aucune corrélation avec ceux du rayonnement qui pourrait déjà régner autour de l'atome : sa direction de propagation, sa polarisation et sa phase sont quelconques.

Émission stimulée

Lorsque l'atome au niveau excité se trouve dans un champ de rayonnement, un photon de fréquence égale à ν_{nm} ou voisine de cette valeur peut provoquer son retour vers le niveau inférieur avec émission d'un photon de même fréquence ν_{nm} . Ce processus se nomme émission stimulée. Les propriétés des photons d'émission stimulée sont nettement différentes de celles des photons émis spontanément. *Un photon d'émission stimulée présente la même fréquence, la même phase, la même polarisation et la même direction de propagation que le photon stimulateur.* À partir d'un photon incident, on obtient deux photons parfaitement identiques.

L'émission stimulée a été introduite de manière heuristique par Einstein en 1916 pour étudier le rayonnement thermique. En mécanique quantique moderne, on la comprend comme le résultat d'un couplage entre le champ électromagnétique de l'onde incidente et l'atome. Elle est la pierre angulaire sur laquelle repose le fonctionnement des lasers.

Coefficients d'Einstein

Considérons des atomes plongés dans un rayonnement de densité spectrale énergétique $\rho(\nu)$. La probabilité pour qu'un atome au niveau d'énergie E_2 émette spontanément un photon et passe au niveau d'énergie E_1 pendant dt vaut

$$dP_{\text{esp}} = A_{21}dt$$

La probabilité pour qu'un atome au niveau d'énergie E_1 absorbe un photon et passe au niveau d'énergie E_2 pendant dt vaut

$$dP_{\text{abs}} = B_{12}\rho(\nu_0)dt$$

La probabilité pour qu'un atome au niveau d'énergie E_2 émette un photon stimulé et passe au niveau d'énergie E_1 pendant dt vaut

$$dP_{\text{est}} = B_{21}\rho(\nu_0)dt$$

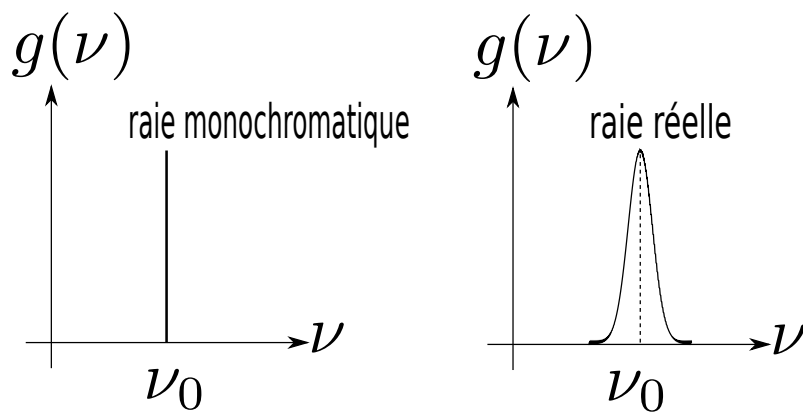
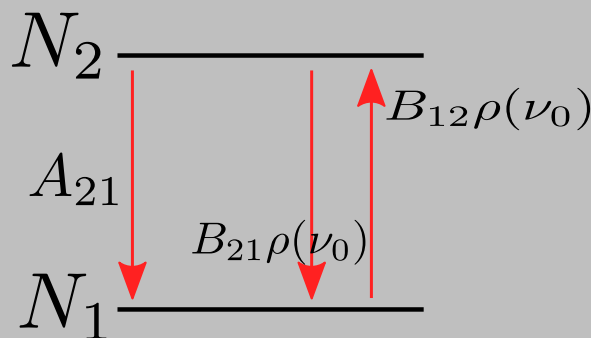


FIGURE 2 – Profil spectral d'une raie.

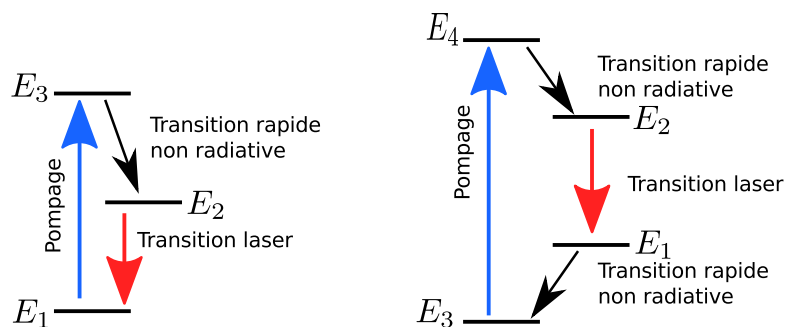


FIGURE 3 – Schéma de pompage dans un système à trois niveaux ou à quatre niveaux

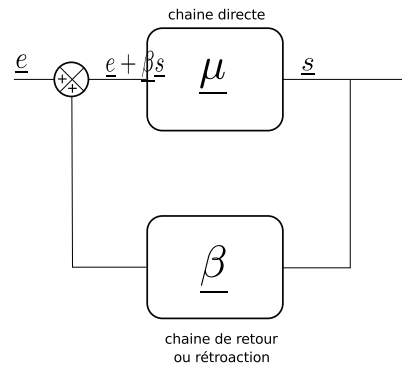


FIGURE 4 – Schéma-bloc d'un système bouclé pouvant conduire à des oscillations

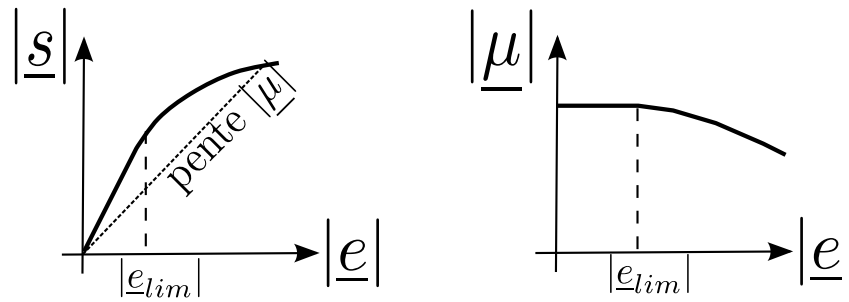


FIGURE 5 – Non-linéarité d'un amplificateur

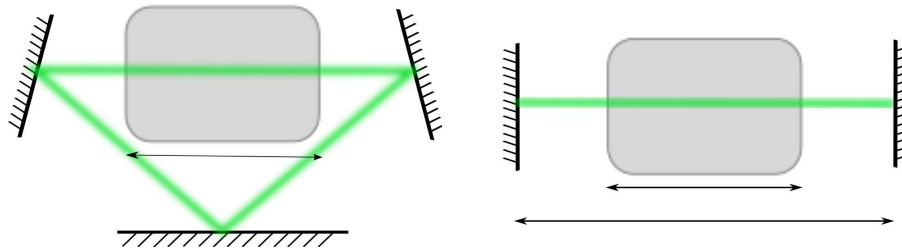


FIGURE 6 – Laser à cavité en anneau (partie gauche) ou à cavité linéaire (partie droite)

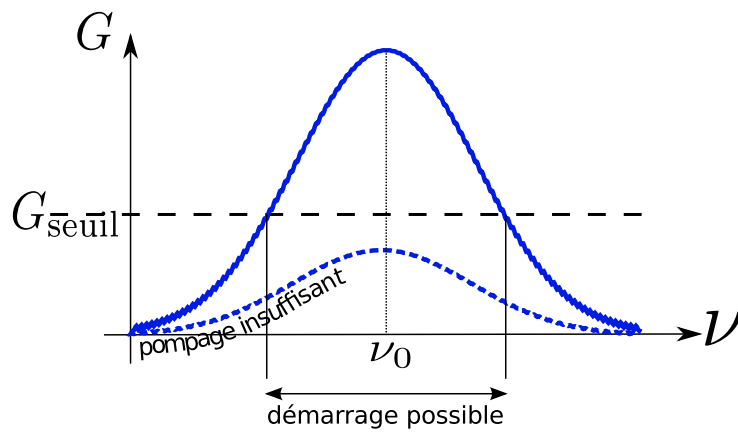


FIGURE 7 – Analyse de la condition de démarrage d'un laser en fonction de la fréquence

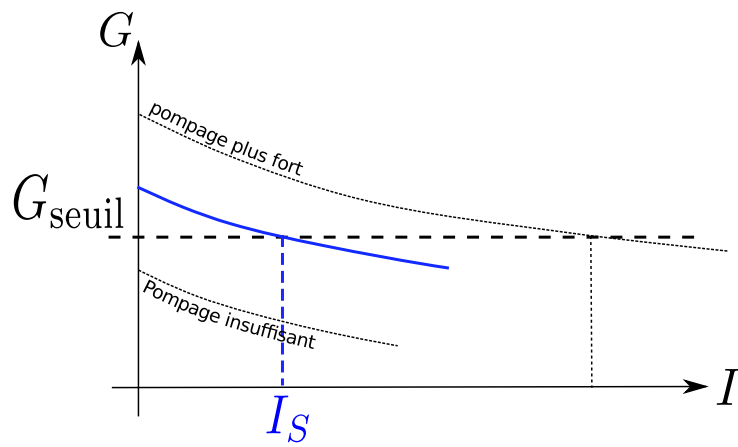


FIGURE 8 – Fixation de l'intensité dans la cavité en régime permanent

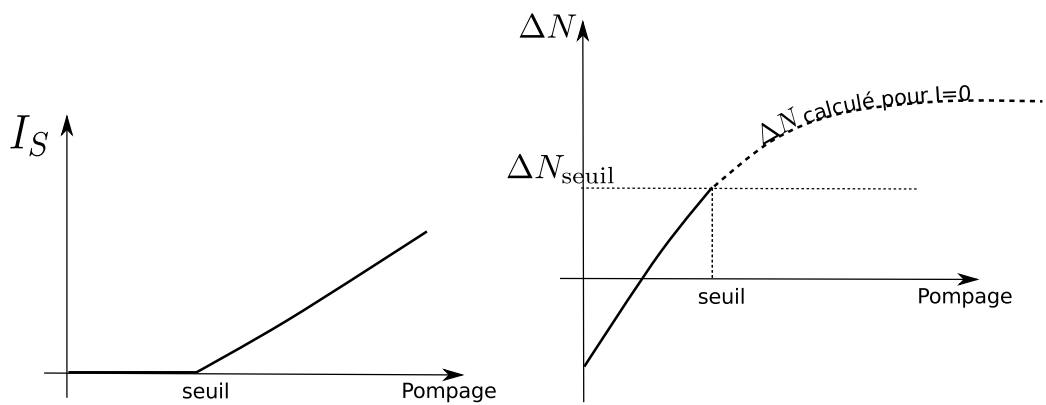


FIGURE 9 – Évolutions de l'intensité et de l'inversion de population en régime permanent en fonction du pompage