

**Chapitre 2 :**  
**Aspects physiques des  
interactions des RNI avec la  
matière – PART 1**

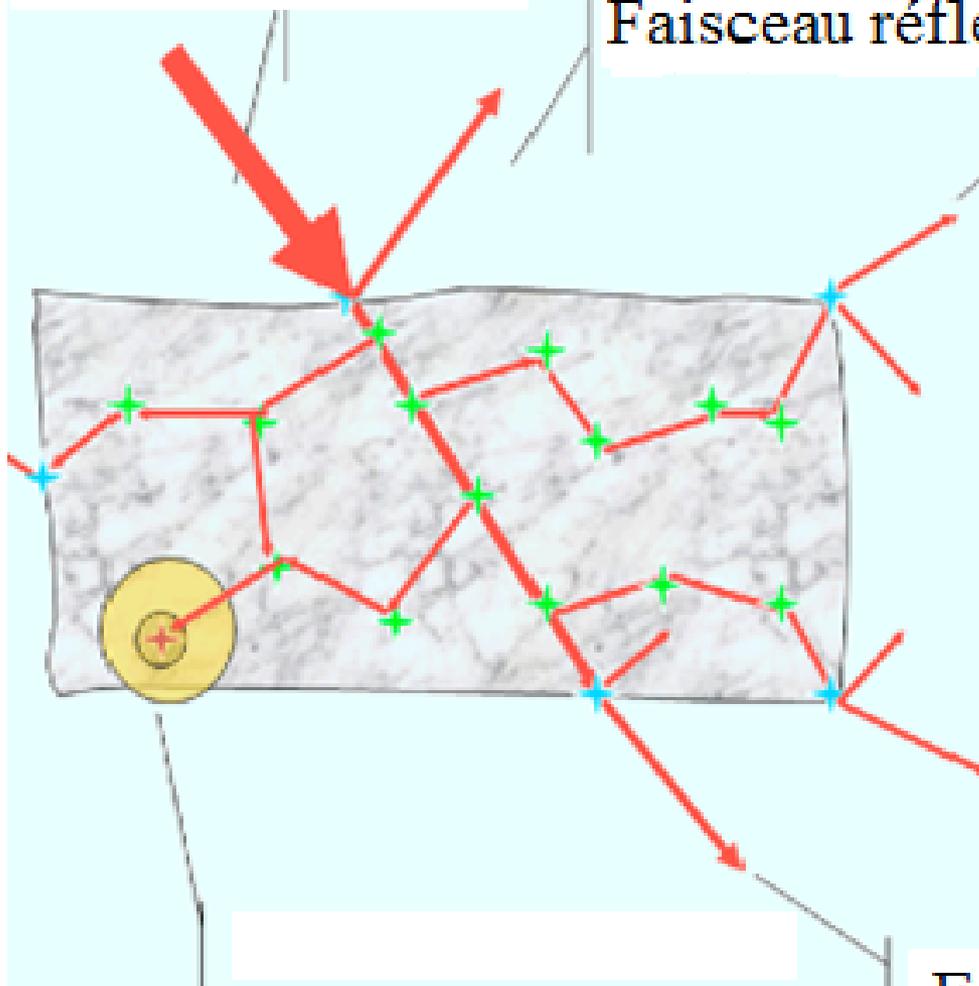
# Il y a cinq effets qui peuvent arriver à la lumière quand elle interagit avec la matière:

- Réflexion au niveau de la matière.
- Transmission à travers la matière.
- Absorption par la matière.
- Diffusion par la matière.
- Réémission par la matière

Faisceau incident

Faisceau réfléchi

Faisceau réfléchi/ diffusé



+ Surface reflection/refraction

+ Volume scattering

+ Absorption

... etc.

Faisceau diffusé/transmis

Faisceau transmis

Energie thermique dissipée



- Nous nous intéressons à la diffusion, à l'absorption et à la réémission de la lumière lorsque la lumière traverse les tissus.
- Les photons de lumière peuvent être absorbés par les électrons dans le tissu.
- Les photons seront hors du faisceau de lumière transmise et l'intensité du faisceau diminue.

Les photons absorbés peuvent être réémis et ces photons réémis peuvent être dans n'importe quelle direction. Ceci contribue également à l'abaissement de l'intensité du faisceau transmis.

Les photons peuvent ne pas être absorbés (et éventuellement réémis) par des électrons dans le tissu. Au lieu de cela, ils peuvent être diffusés par des électrons et si les photons sont diffusés, l'intensité du faisceau diminue.

# Interactions lumière matière

Lorsqu'un atome est soumis à une onde lumineuse trois interactions lumière matière peuvent se produire :

-  l'absorption,
-  l'émission spontanée
-  et l'émission stimulée

# Interactions lumière matière

**(a) absorption**

**(b) émission spontanée**

**(c) émission stimulée**

## Population des niveaux

Soit  $N$  atomes identiques caractérisés par le même diagramme énergétique à «deux niveaux» (on ne considère que les transitions entre ces niveaux):

- E1: niveau fondamental
- E2: état excité
  
- Les électrons peuvent occuper les niveaux E1 et E2.
- $N_1$ : nombre d'atomes dans l'état fondamental
- $N_2$ : nombre d'atomes dans l'état excité.

$$N = N_1 + N_2$$

# Population des niveaux

A titre d'exemple , le rapport des populations entre deux niveaux:

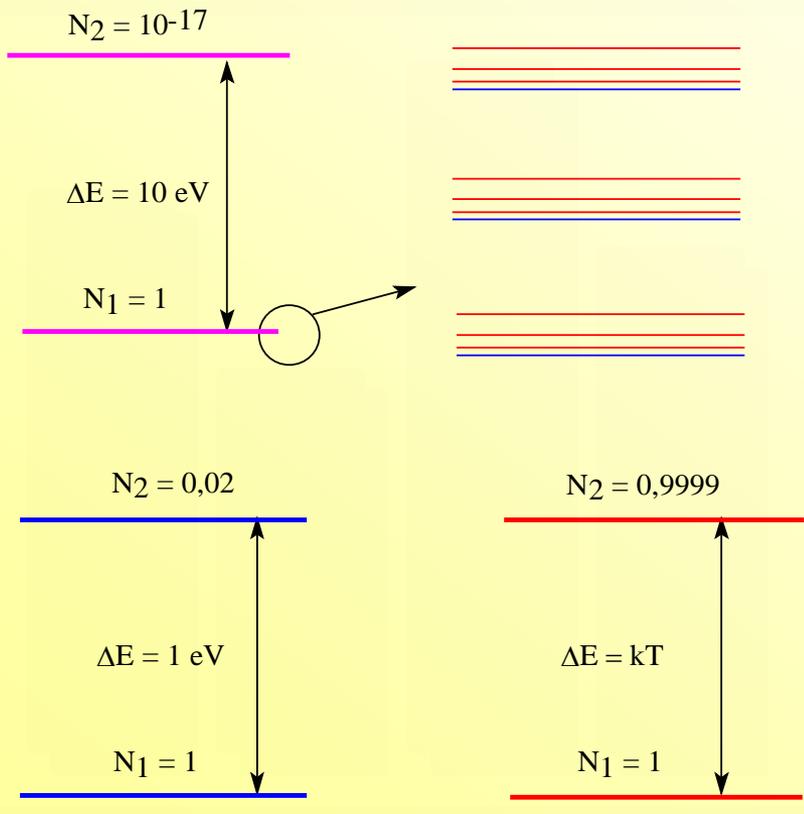
$E_1$  et  $E_2$ . (où  $E_2 > E_1$ )

Vaut

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{g_2}{g_1} \exp\left[-\frac{(E_2 - E_1)}{kT}\right]$$

g niveau de dégénérescence

# Peuplement des niveaux



Cas général

$$\frac{N_m}{N_n} = \frac{g_m}{g_n} \exp\left[-\frac{(E_m - E_n)}{k T}\right]$$

- L'atome, initialement dans un état électronique stable d'énergie  $E_1$ , passe alors dans un état électronique excité d'énergie supérieure  $E_2$
- Ce processus d'absorption est d'autant plus efficace que l'énergie du photon,  $E$  (égale à  $h\mu$ ,  $h$  étant la constante de Planck et  $\mu$  la fréquence d'émission du photon), est proche de l'écart ( $E_2 - E_1$ ) entre les deux niveaux d'énergie de l'atome.

- Les états électroniques excités ne sont pas stables
- Plus ou moins vite, l'ion revient à l'état fondamental en émettant un photon ( (b))

- Soit  $\tau$ , la durée de vie de l'état excité, défini comme étant le temps au bout duquel la densité de population des ions excités est divisée par e après le début de l'émission spontanée
- Le photon est émis dans une direction et avec une polarisation qui sont aléatoires, mais son énergie  $E$  (toujours égale à  $h\nu$ ) est identique à la différence d'énergie  $E_2 - E_1$  entre les deux niveaux atomiques mis en jeu

- La présence d'un rayonnement lumineux incident peut provoquer l'ion excité à l'émission d'un photon ayant les mêmes caractéristiques que le photon incident (figure (c)).
- Cependant, cela n'est possible que lorsque l'énergie de ce photon est « résonnante », c'est-à-dire quand l'énergie  $E$  (égale à  $h\nu$ ) est égale à l'écart d'énergie  $E_2 - E_1$  entre le niveau supérieur (2) et le niveau inférieur (1)

- Dans cette émission induite qui constitue la réciproque du processus d'absorption, le photon créé par l'atome en se désexcitant a
- même fréquence
- et même direction de propagation que le photon incident.
- Ce phénomène, qui permet d'amplifier une onde lumineuse, est à la base du fonctionnement des amplificateurs à fibres dopées aux terres rares.

# Aspect Mathématique

## ☛ Populations :

$$N = N_1 + N_2$$

- $N_1$  nombre d'atomes à l'état fondamental par unité de volume.
- $N_2$  nombre d'atomes à l'état excité par unité de volume.

## ☛ Densité d'énergie dans le milieu :

$$\rho_\nu = N_\nu h\nu$$

- $N_\nu$ : densité de photons d'énergie  $h\nu$ .

## ☛ Taux d'émission spontanée (unité $\text{s}^{-1}\text{m}^{-3}$ ) :

- $\tau_{21}$  est la durée de vie d'émission spontanée

☛ Taux d'absorption (unité  $s^{-1}m^{-3}$ ) :

$$R_a = N_1 \rho_\nu B_{12}$$

☛ Taux d'émission stimulée (unité  $s^{-1}m^{-3}$ ) :

$$R_{st} = N_2 \rho_\nu B_{21}$$

**$A_{21}$ ,  $B_{21}$  et  $B_{12}$  sont appelés coefficients d'Einstein**

- A l'équilibre, le taux d'absorption est égal au taux d'émission :

On en déduit :

$$\rho_\nu = \frac{A_{21}/B_{21}}{\frac{B_{12} N_1}{B_{21} N_2} - 1}$$

Les populations d'électrons sur les différents niveaux d'énergie atomiques suivent la statistique de **Boltzmann**:

La densité d'énergie dans le milieu à l'équilibre à pour expression:

$$\rho_\nu = \frac{A_{21}/B_{21}}{\frac{B_{12}}{B_{21}} \exp(h\nu/kT) - 1}$$

## Inversion de population et pompage

- Pour qu'un signal lumineux soit amplifié, il faut que la probabilité qu'un de ses photons soit absorbé par un ion à l'état fondamental soit inférieure à celle que ce photon provoque la désexcitation d'un ion excité.
- Pour cela il faut que le nombre d'ions à l'état excité soit supérieur à celui des ions à l'état fondamental.
- Dans ce cas, on parle d'inversion de population

# inversion de population

- Pour que le phénomène d'émission stimulée puisse s'amplifier il est nécessaire que :
- $N_b$  atomes excités  $\gg$   $N_b$  d'atomes stables
- plus il y a d'atome excités plus l'émission stimulée sera importante

s'il y a trop d'atomes stables, les photons stimulés émis par les atomes excités voisins, seront absorbés par ces atomes stables

- Cette configuration s'appelle l'inversion de population
- Elle s'obtient par l'apport d'énergie extérieure qui va exciter les atomes du milieu, ce processus est décrit sous le nom de pompage
- Pompage optique découvert seulement en 1949 (A Kesler)

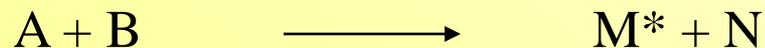
## Il existe différents types de pompage :

-1) pompage optique :

Apport au milieu d'énergie lumineuse : les photons émis par la source

Lumineuse sont absorbés par le milieu et peuplent le niveau d'énergie supérieur

2) pompage chimique



3) pompage électriques

Une décharge électrique peut exciter certains atomes (hélium)

## REMARQUE

- L'inversion de population ne peut être réalisée que pour certains types de milieux
- Milieux pour lesquels les atomes restent suffisamment longtemps dans un état excité
- Nécessité d'avoir un modèle à 3 niveaux d'énergie