

# Composants photoniques



## *Chapitre 4 : Lasers*

### *4.1. Généralités*

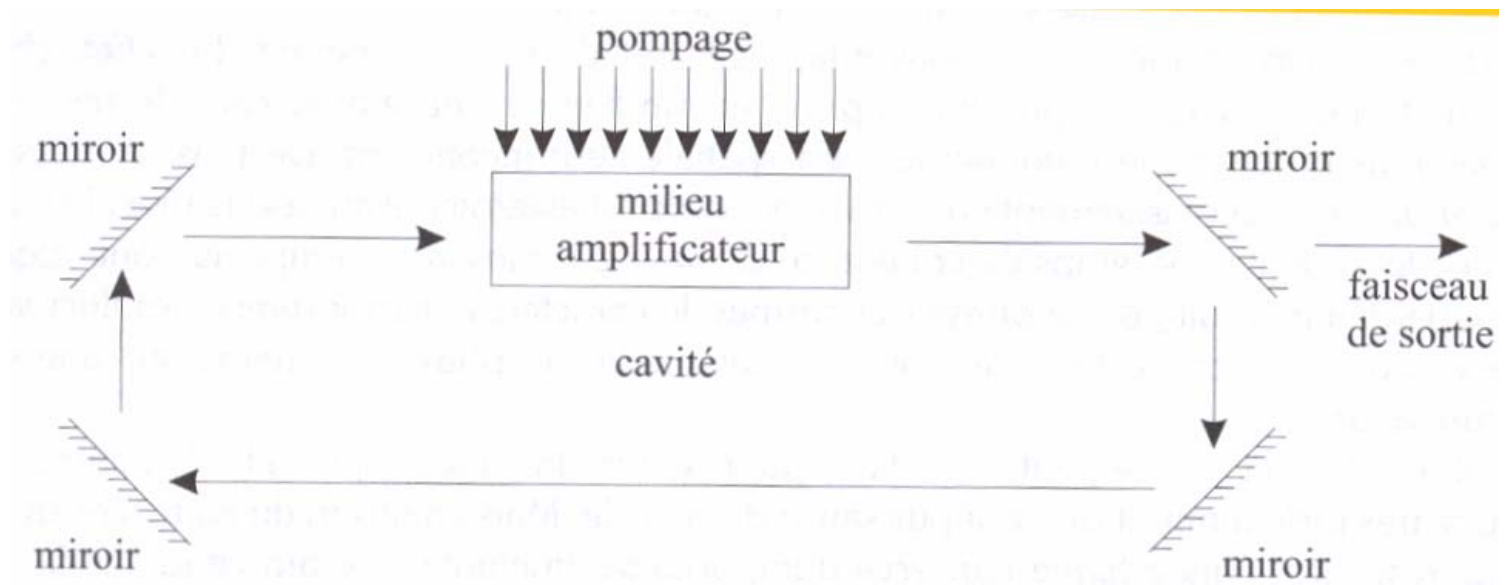
# LASERS



## 4.1.1 Introduction

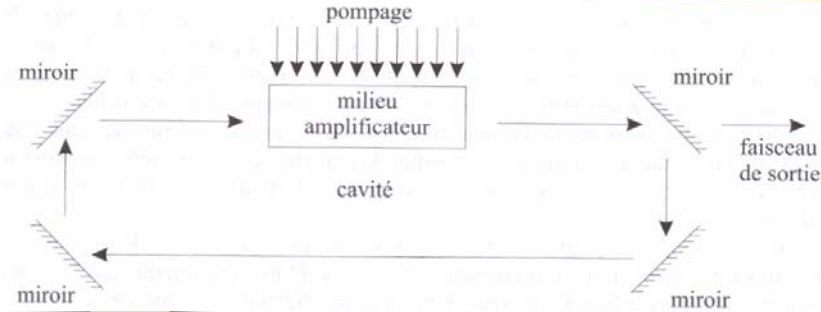
# Qu'est-ce qu'un laser ?

LASER = Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation



Laser = oscillateur optique

# Laser



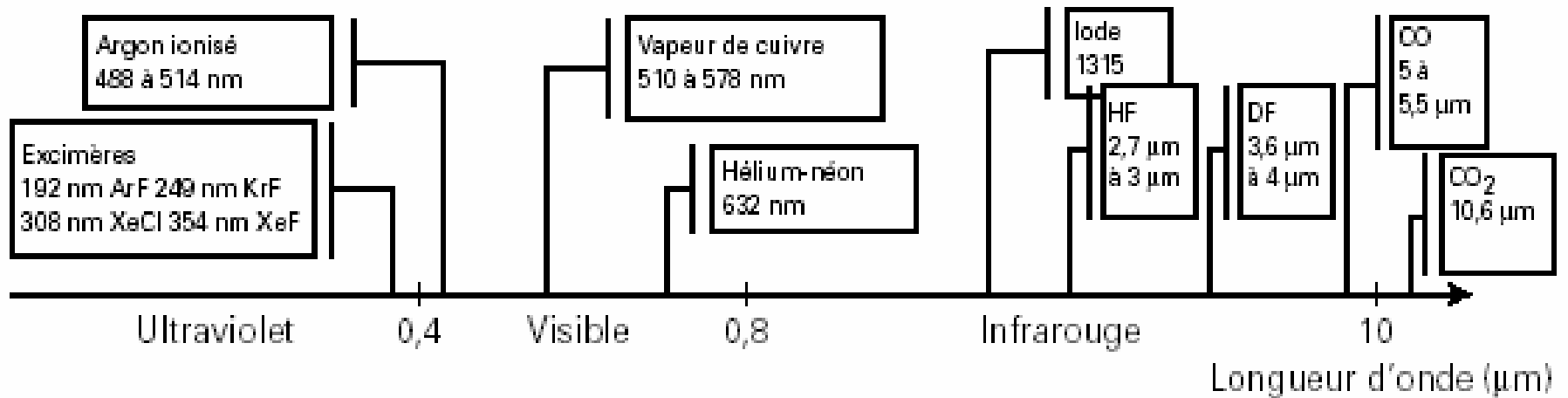
- Trois éléments fondamentaux :
  - Milieu amplificateur : milieu à gain, émission stimulée
  - Pompe : alimentation en énergie
  - Cavité : rétro-action + filtre
- Le milieu amplificateur suffisamment pompé va amplifier le rayonnement : gain. La cavité re-injecte une partie du rayonnement dans le milieu amplificateur : filtre.

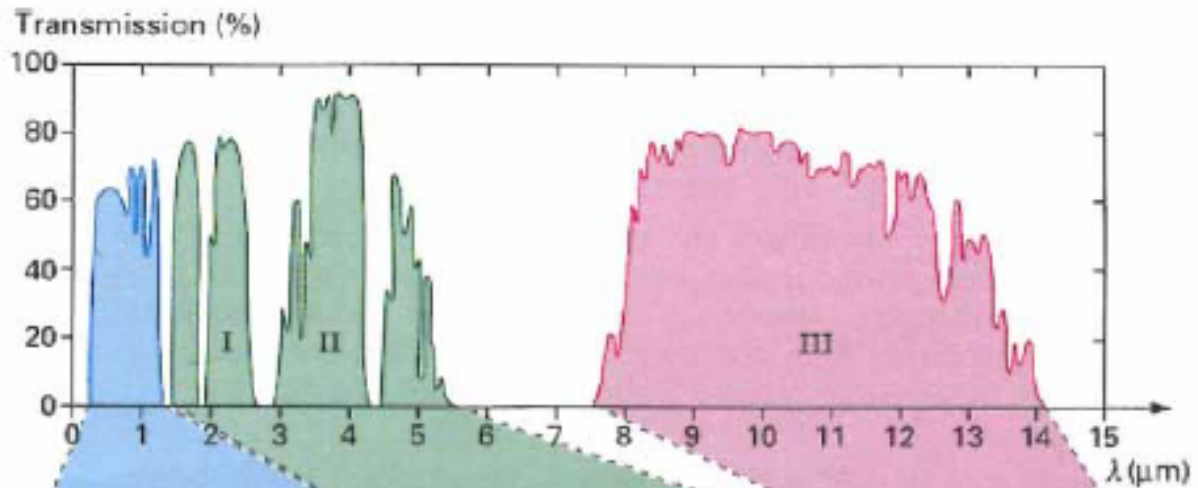
**L'effet laser repose sur l'interaction du milieu amplificateur avec le rayonnement électromagnétique.**

# Types de lasers

- Le milieu amplificateur d'un laser peut être:
  - Gaz
  - Liquide
  - Solide
    - Cristaux (YAG)
    - Fibres optiques (télécom)
    - Semi-conducteurs : GaAs, InP, GaN, GaSb

# Lasers à gaz





Bande	I Visible + très proche IR				II Proche IR				III IR lointain
Type de laser	YAG doublé	Rubis	GaAs	YAG	YAG Raman Erbium	Holmium	CO <sub>2</sub> triplé	Chimique	CO <sub>2</sub>
Longueur d'onde	0,53 μm	0,69 μm	0,9 μm	1,06 μm	1,54 μm	2,07 μm	3,7 μm	3,8 μm	10,6 μm (raie principale)

# Rendement des lasers usuels

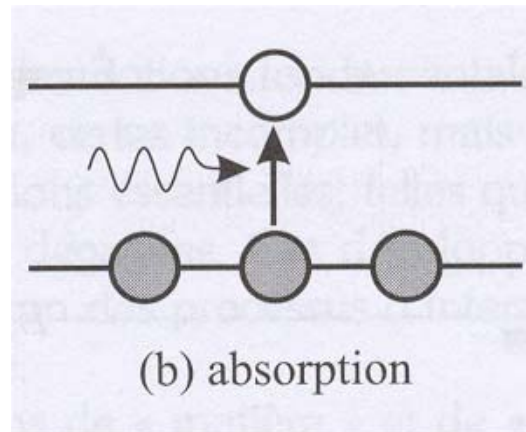
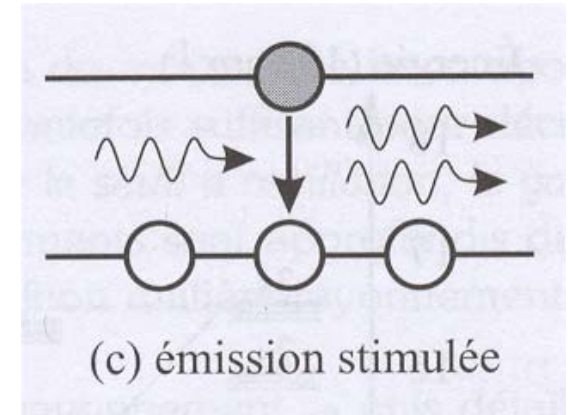
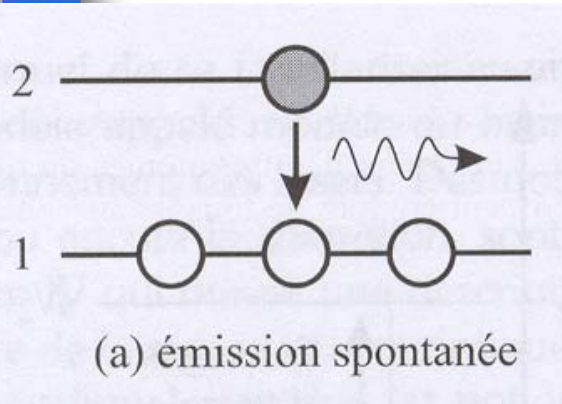
Type de laser		Puissance électrique typique consommée	Puissance optique typique	Rendement à la prise
Gaz	HeCd	1 kW	100 mW	0.002 – 0.02 %
	Ar	40 kW	4 W	0.01 %
	HeNe	100 W	1 mW	0.01 %
	CO <sub>2</sub>	1 kW	10 W	1 %
Terres rares dans une matrice solide	YAG	1 kW	1 W	0.1 %
	YAG pompé par diode laser	100 W	1 W	1 %
Semi-conducteur		500 mW	50 mW	10 – 60 %



# LASERS

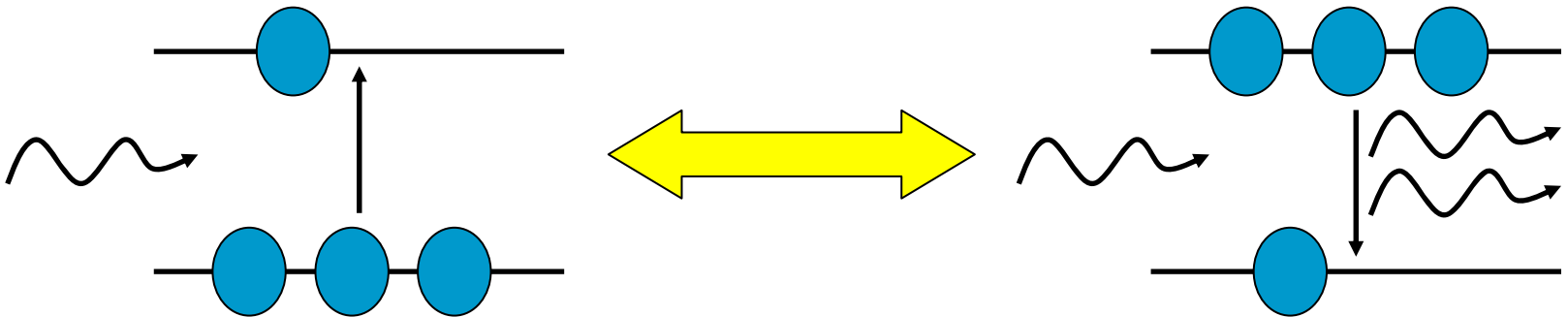
## 4.1.2. Gain du milieu

# Emission spontanée vs stimulée vs absorption



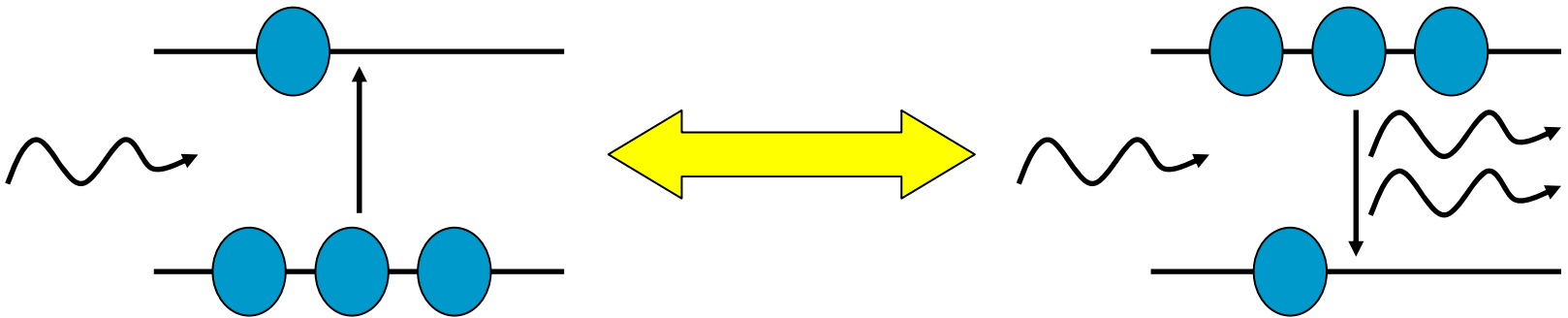
**absorption = inverse de l'émission stimulée**

# Absorption vs Emission stimulée



- Deux « sens opposés » pour un seul phénomène induit par l'interaction entre la matière et le rayonnement:
  - Absorption = transition du niveau d'énergie basse vers le niveau d'énergie haute
  - Émission stimulée = transition du niveau d'énergie haute vers le niveau d'énergie basse

# Absorption vs Emission stimulée

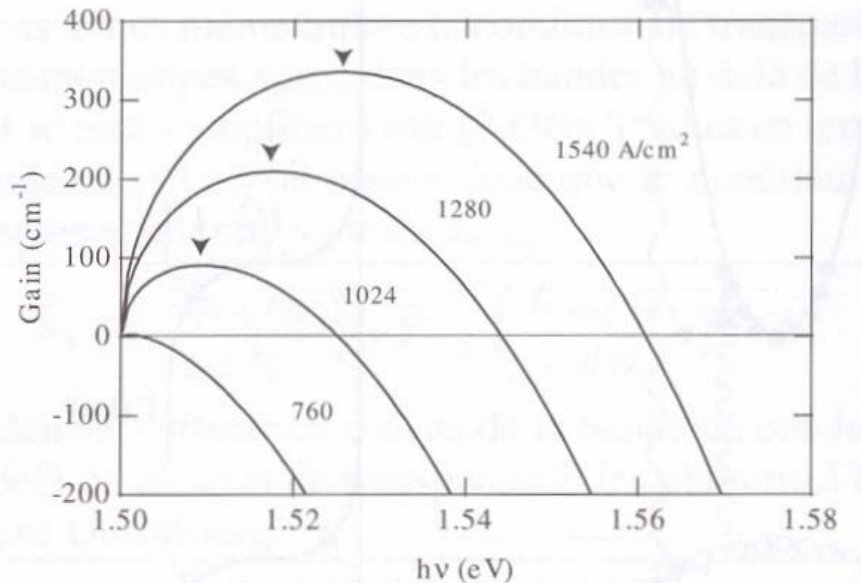


- Naturellement la distribution de population est telle qu'il y a plus d'électrons sur le niveau bas.
- Pour que l'émission stimulée devienne prépondérante il faut qu'il y ait plus d'électrons sur le niveau haut.

**Inversion de population !!**

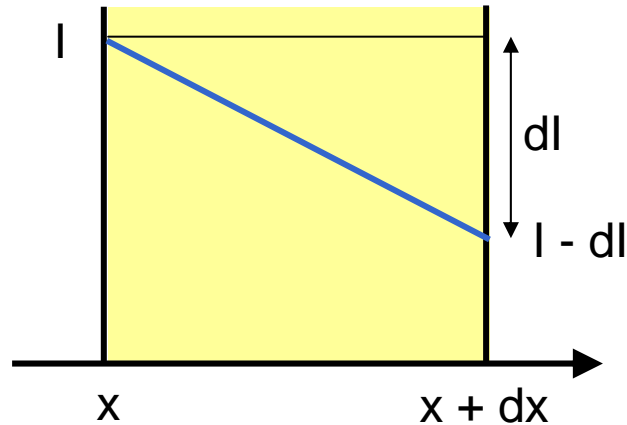
# Pertes – transparence – gain

- A l'équilibre, l'absorption domine : **pertes**.
- Quand on « pompe » le milieu, on augmente la population sur le niveau haut, on **inverse** la population. Pour un niveau de pompage donné, il n'y a plus d'absorption : **transparence**.
- Si on continue à pomper, le matériau amplifie : **gain**. Toute « inversion supplémentaire » fournit des photons stimulés.



Ex : GaAs/AlGaAs QW

# Loi de Beer-Lambert : absorption & gain



$$\frac{dI}{I} = -\alpha \times dx$$

$$I = I_0 \times \exp(-\alpha x)$$

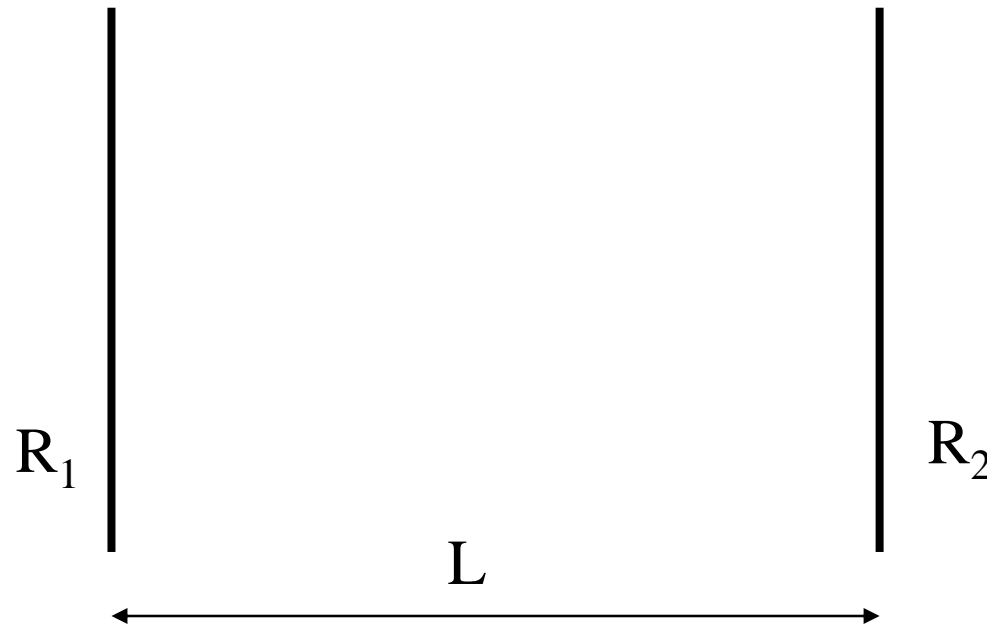
$\alpha > 0$  Pertes ou absorption ( $\text{cm}^{-1}$ )

$\alpha < 0$  Gain ou amplification ( $\text{cm}^{-1}$ )

# LASERS

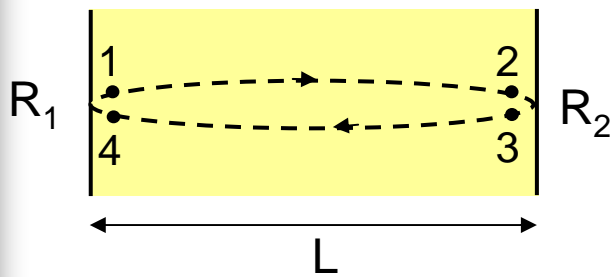
## 4.1.3. Pertes de la cavité

# Cavité Fabry-Pérot (FP)



- Cavité la plus simple: deux miroirs plans parallèles.
- Très simple à mettre en œuvre avec les lasers à semi-conducteurs.





## Pertes de la cavité FP

Considérons une cavité FP qui comprend un milieu de gain  $g$  et pertes internes  $\alpha_i$  est :

En 1 : I

Après un aller (2) :  $I(L) = I(0) \exp[(g - \alpha_i)L]$

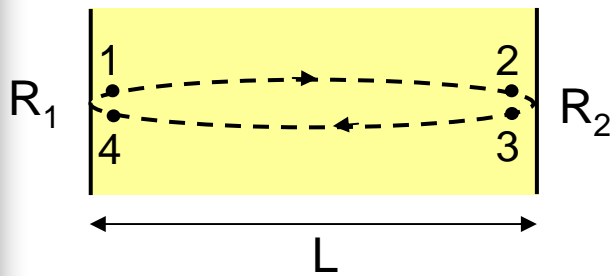
Après réflexion (3) :  $I_{R_1}(L) = R_1 \times I(L)$

Après le retour (4) :  $I_{R_1}(2L) = I_{R_1}(L) \exp[(g - \alpha_i)L]$

Après réflexion (1) :  $I_{R_1 R_2}(2L) = R_2 \times I_{R_1}(2L)$

$$I_{AR}(2L) = I(0) \times R_1 R_2 \times \exp[2(g - \alpha_i)L]$$

## Pertes de la cavité



$$I_{AR}(2L) = I(0) \times R_1 R_2 \times \exp[2(g - \alpha_i)L]$$

Globalement, on aura amplification si l'intensité après un AR est supérieure à l'intensité initiale.

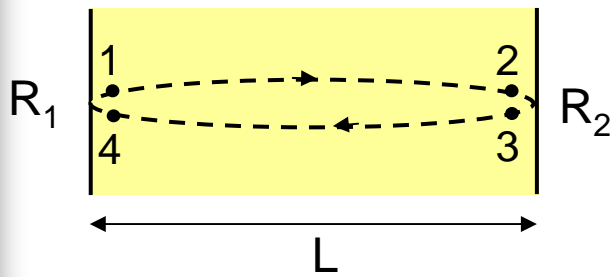
A la limite :  $I_{AR}(2L) = I(0)$

$$\Rightarrow 1 = R_1 R_2 \exp[2(g - \alpha_i)L]$$

$$\Rightarrow g = \alpha_i + (1/2L) \ln(1/R_1 R_2)$$

$$\Rightarrow g = \alpha_i + \alpha_{FP}$$

## Pertes de la cavité



$$\alpha_{FP} = \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_1 R_2}$$

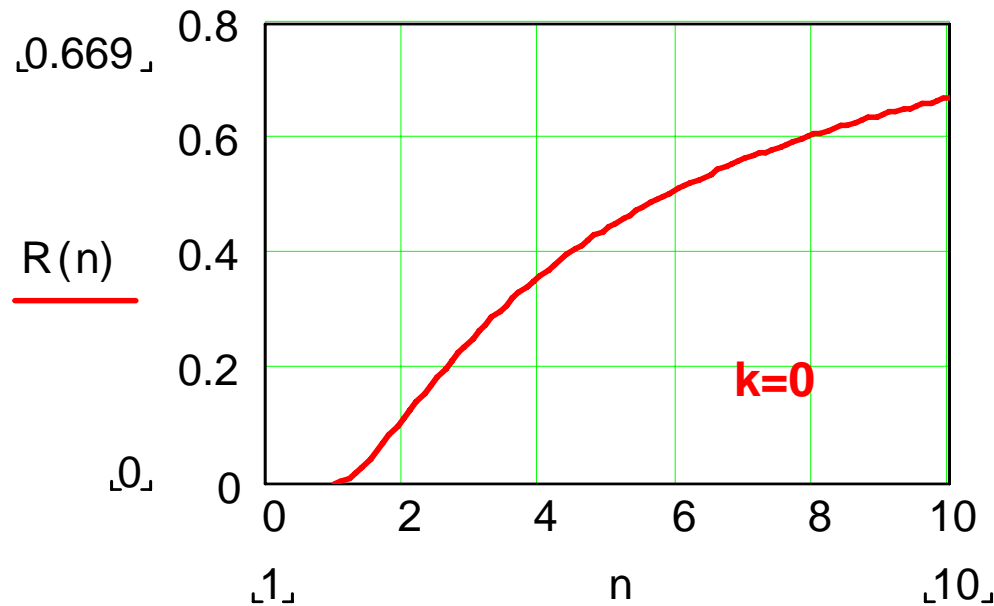
– Si  $R_1 = R_2 = R$ ,

$$\alpha_{FP} = \frac{1}{L} \ln \frac{1}{R}$$

# Pertes Fabry-Perot $\alpha_{FP}$

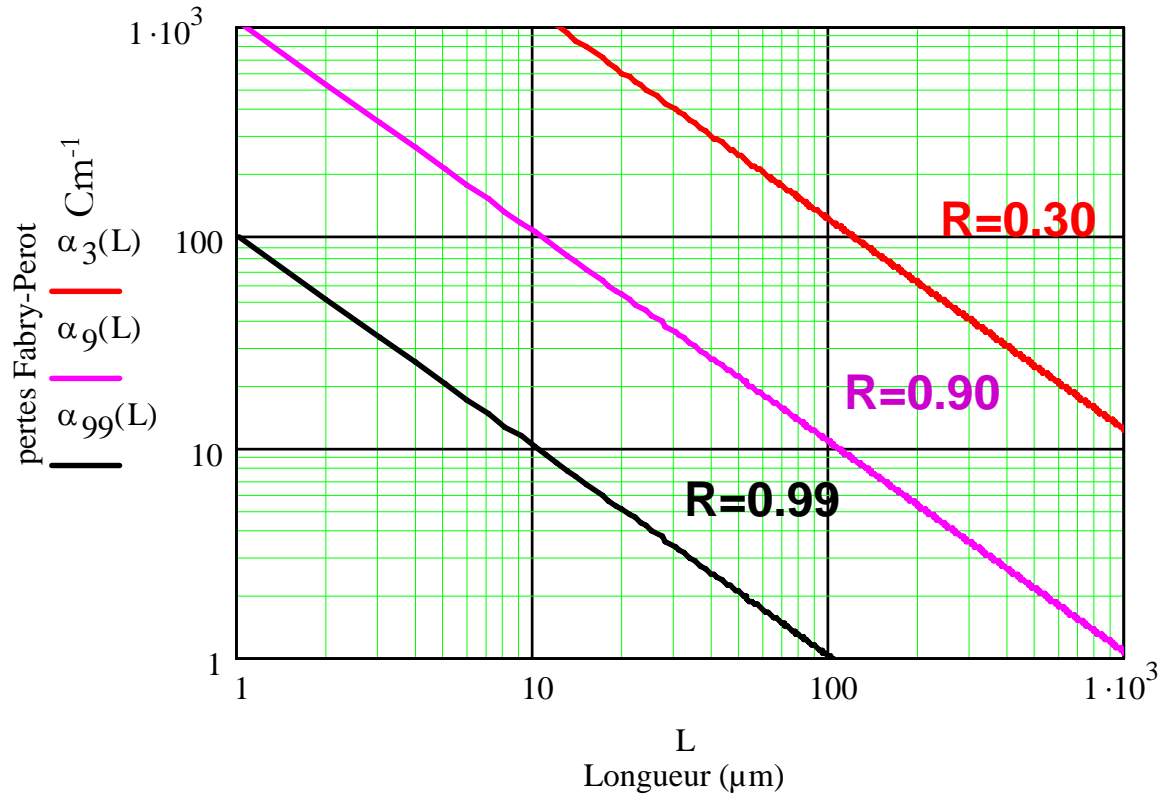
Pouvoir réflecteur d'un matériau  
d'indice complexe  $N=n-ik$  :

$$R = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2}$$



# Pertes Fabry-Perot $\alpha_{FP}$

$$\alpha_{FP} = \frac{1}{L} \ln\left(\frac{1}{R}\right)$$



# Pertes de la cavité FP

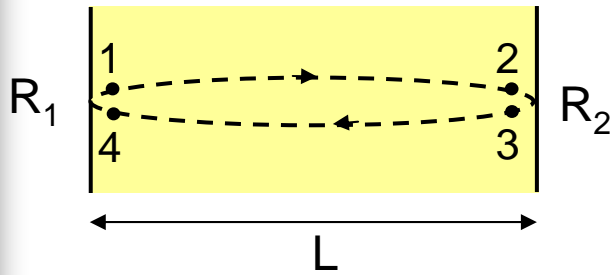
- Si on veut diminuer les pertes d'une cavité FP, il faut augmenter sa longueur.
- Problème: dans un laser à semi-conducteurs, plus la cavité est longue et plus la probabilité d'avoir un défaut est grande... compromis à trouver.
- Si la cavité est courte (ex: VCSELS) il faut des miroirs à très haute réflectivité pour limiter les pertes.
- Problème: croissance ou dépôt d'un miroir de forte réflectivité = opération complexe

# LASERS



## 4.1.4. Seuil du laser

# Seuil Laser

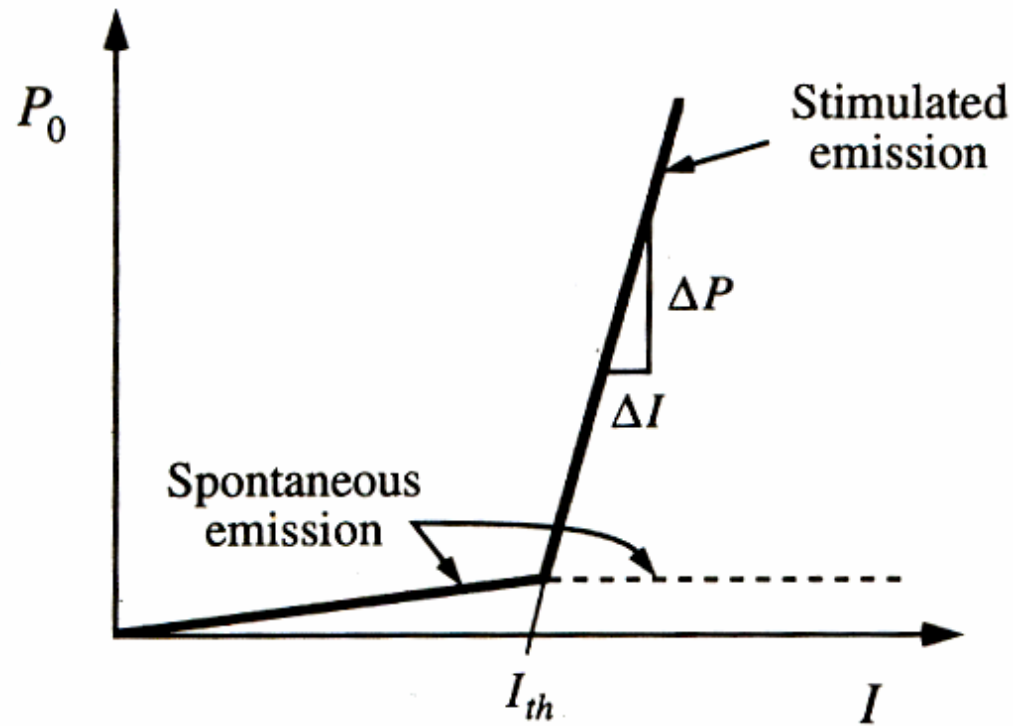
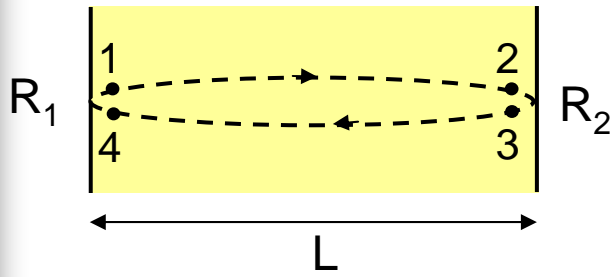


- Au seuil le gain compense exactement les pertes intrinsèques du milieu amplificateur plus les pertes à la réflexion sur les miroirs de la cavité:

$$\Rightarrow \mathbf{g} = \alpha_i + \alpha_{FP}$$



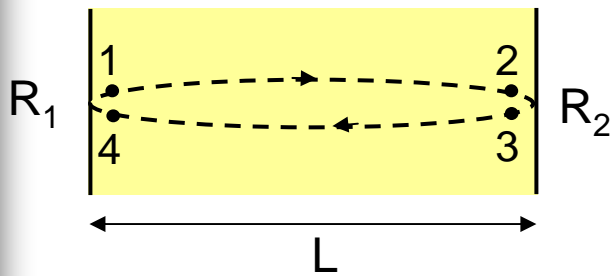
# Seuil Laser



# LASERS

## 4.1.5. Modes de la cavité

# Modes dans cavité Fabry-Pérot



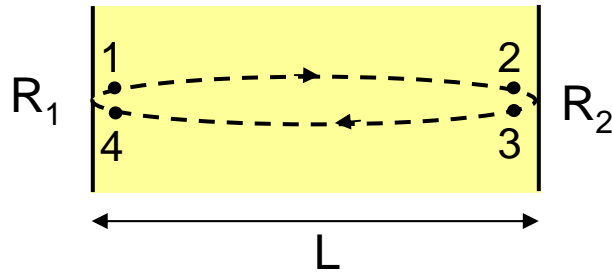
- Le déphasage entre les ondes « aller » et « retour » vaut:

$$\phi = 2\pi \frac{\delta}{\lambda} \quad \text{avec} \quad \delta = 2Lxn = 2nL$$

- Interférences constructives pour  $\phi = 2m\pi$

- Soit :  $2nL = m\lambda$  ou encore  $\lambda_m = \frac{2nL}{m}$

# Espacement intermodes dans une cavité Fabry-Pérot



$$2nL = m\lambda_m$$

$$m = 2nL / \lambda_m$$

- Si on considère  $n = \text{cste}$ :

$$\lambda_m = \frac{2nL}{m} \Rightarrow d\lambda_m = -2nL \frac{dm}{m^2} \Rightarrow \frac{d\lambda_m}{dm} = -\frac{2nL}{m^2}$$

$$\frac{d\lambda_m}{dm} = -\frac{\lambda_m^2}{2nL}$$

**Espacement intermodes:  $\Delta\lambda = \lambda^2/2nL$**