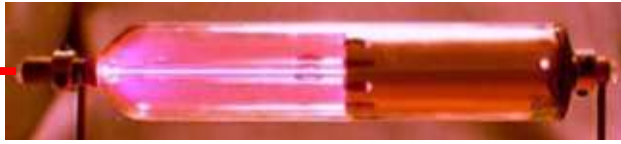


## Etude d'un laser Hélium-Néon (He-Ne) en Kit

### Cavité optique et faisceaux gaussiens



#### I) Introduction

Si on place un milieu amplificateur, c'est-à-dire possédant un gain optique, dans une cavité résonnante de forte surtension, l'effet de contre-réaction conduit à l'apparition d'une oscillation laser (**L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation). Les caractéristiques spatio-temporelles du faisceau lumineux ainsi généré sont en grande partie déterminées par les paramètres géométriques de la cavité. De manière très schématique, la cavité impose en effet à toutes les sources élémentaires d'émettre en phase, ce qui conduit à l'existence d'une corrélation spatiale et temporelle quasi-parfaite entre les fronts d'onde du faisceau laser. Cette propriété spécifique du laser conduit à des caractéristiques exceptionnelles d'intensité, de pureté spectrale, de directivité et de cohérence, en comparaison avec les faisceaux émis par des sources classiques de lumière.

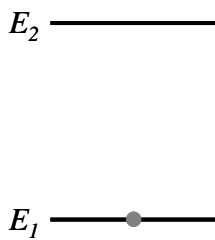
Ce TP détaille l'utilisation du laser He-Ne "en kit", et la mise en évidence de ses principales caractéristiques en fonction des paramètres de la cavité. On montrera également la possibilité de focaliser le faisceau laser, de manière à concentrer toute la puissance lumineuse sur une tache de dimension très petite.

#### II) Emission spontanée et émission stimulée de la lumière

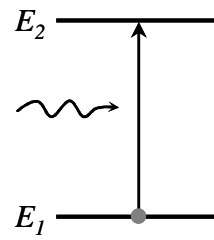
Comme chacun le sait, les atomes possèdent des électrons qui ne peuvent se trouver que sur certains niveaux d'énergie quantifiés. Il leur est cependant possible de passer d'un niveau à l'autre en absorbant ou en libérant de l'énergie sous forme de photon. Ainsi, un atome qui absorbe un *photon* se retrouve dans un état dit *excité* et l'un de ses électrons passe d'un niveau d'énergie inférieure  $E_1$  à un niveau d'énergie supérieure  $E_2$ . Inversement, un atome se *désexcite* lorsque l'un de ses électrons retourne vers un niveau d'énergie moins élevée en émettant un photon. La fréquence du photon émis ou absorbé est directement liée à la différence d'énergie entre les deux niveaux  $E_1$  et  $E_2$  par la relation suivante :

$$\Delta E = E_2 - E_1 = h\nu$$

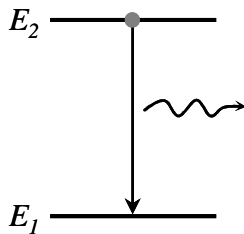
où  $\nu$  est la fréquence du photon et  $h$  la constante de Planck.



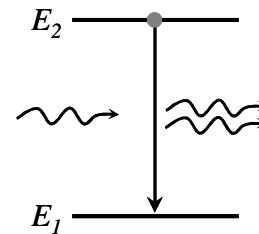
2 niveaux énergétiques d'un atome avec un électron sur le niveau  $E_1$



**Absorption:** un photon d'énergie  $h\nu$  fait passer l'électron sur le niveau supérieur  $E_2$ :  $\Delta E = E_2 - E_1 = h\nu$



**Emission spontanée:** un photon d'énergie  $h\nu = E_2 - E_1$  est émis lorsque l'électron retourne spontanément sur le niveau  $E_1$



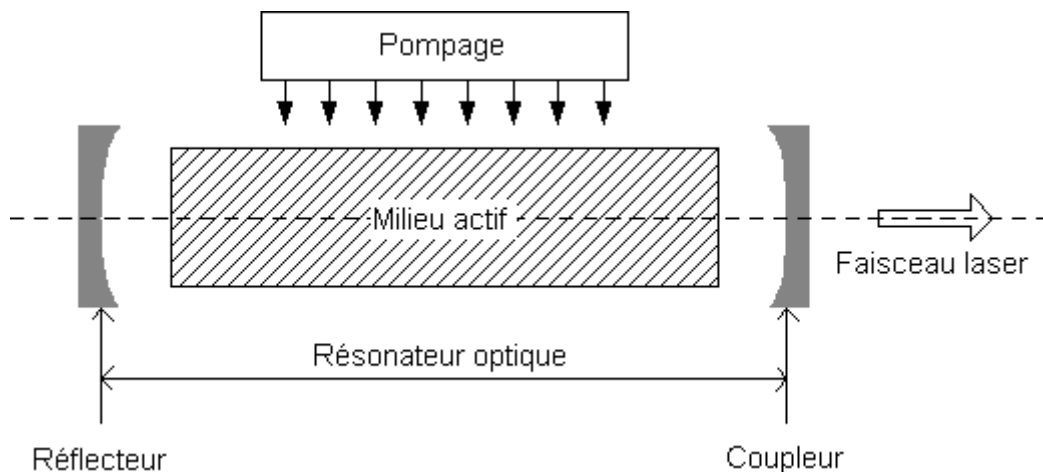
**Emission stimulée:** un photon incident d'énergie  $h\nu = E_2 - E_1$  stimule le passage de l'électron du niveau  $E_2$  vers le niveau  $E_1$ . Un photon est alors émis par émission stimulée. En sortie les deux photons ont même direction de propagation, polarisation et fréquence c'est l'**effet laser**

L'émission stimulée est au cœur même du fonctionnement des lasers. Elle se produit quand il y a **inversion de population** c'est à dire quand une majorité importante des atomes ou molécules du milieu actif sont dans un niveau d'énergie supérieure  $N_2 > N_1$ . Cet état est obtenu par un apport d'énergie extérieur tel qu'une décharge électrique ou un flash lumineux: c'est le **pompage**. L'inversion de population favorise le processus d'émission stimulée. Un photon, en rencontrant un atome excité du milieu dans lequel il se trouve, en provoque la désexcitation et le forcera à émettre un deuxième photon en tout point similaire à celui qui a permis à l'atome de se désexciter: il transporte la même quantité d'énergie et a, par conséquent, la même fréquence, il se propage dans la même direction et il oscille en phase avec lui. La lumière ainsi produite est dite **cohérente**.

### III) Principe de fonctionnement d'un laser

#### a) Schéma général

Le processus d'émission stimulée n'est pas suffisant pour produire à lui seul un faisceau laser. C'est pourquoi le milieu actif est placé dans une cavité optique résonante constituée de deux miroirs entre lesquels est placé le milieu actif. Le premier miroir, le *réflecteur*, est totalement réfléchissant alors que le second, le *coupleur* laisse sortir une partie du faisceau lumineux. Le résonateur contribue en grande partie à l'amplification de la lumière dans le laser. Les photons, en étant réfléchis par les miroirs, peuvent traverser plusieurs fois le milieu actif et provoquer l'émission stimulée d'un plus grand nombre de photons. Un système laser peut être schématisé de la façon suivante:

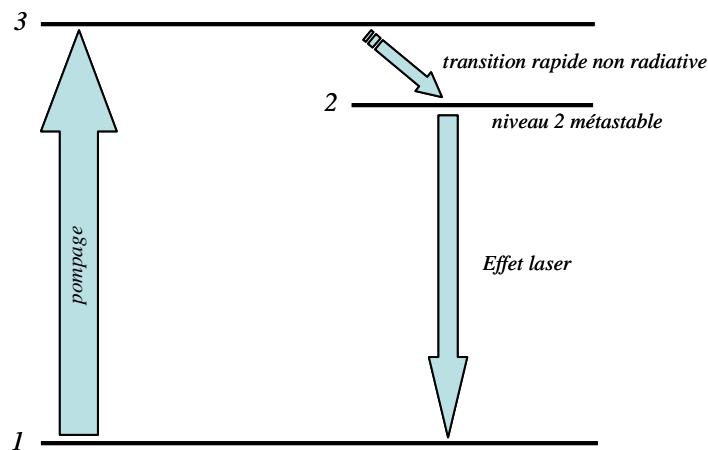


*Schéma typique d'un laser avec un milieu actif (gaz, cristal ...), une cavité résonnante (type Fabry-Perot ...) et un système de pompage (flash optique, décharge électrique ..).*

#### b) 2, 3, 4 niveaux d'énergie ?

Pour réaliser un gain laser suffisant, il faut utiliser un système à plus de deux niveaux d'énergie. En effet dans un système à deux niveaux d'énergie la probabilité d'émission stimulée est à peu près égale à la probabilité d'absorption. Il est donc impossible, même avec un pompage très efficace, d'obtenir une inversion de population et on a au maximum  $N_2 = N_1$ .

En pratique les systèmes les plus courant mettent en jeu 3 ou 4 niveaux d'énergie représentés ci-dessous:

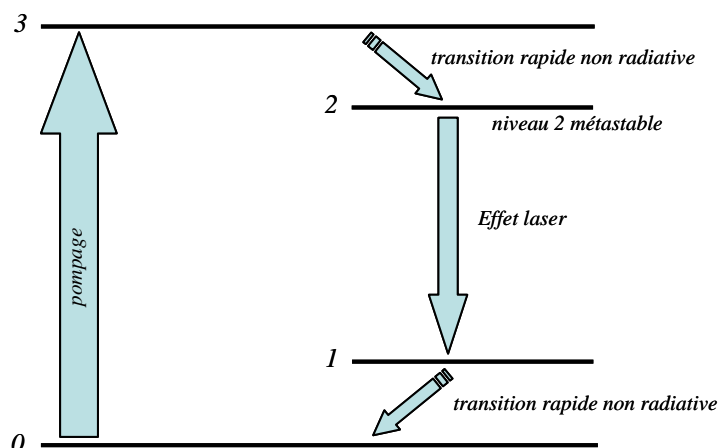


**Système à 3 niveaux:** départ de l'état fondamental **1** vers un état **3** (par pompage optique ou électrique). Les électrons du niveau **3** perdent rapidement de l'énergie (sans émission de photons) au profit de l'état métastable **2** qui est l'état excité de la transition laser **2**→**1**. L'inversion de population est réalisée lorsque le nombre  $N_2$  d'atomes excités dans l'état **2** est supérieur au nombre  $N_1$  d'atomes dans l'état **1**.

*(note: un état métastable est un état de durée de vie beaucoup plus longue que les autres états excités impliqués)*

On veut  $N_2 - N_1$  le plus grand possible ce qui est difficile dans une configuration à trois niveaux car le niveau fondamental **1** est toujours très peuplé. Les premiers lasers utilisant un cristal de Rubis fonctionnaient sur ce principe avec une transition **3**→**2** de l'ordre de  $10^{-7}$  s et un niveau métastable **2** de durée de vie de l'ordre de  $3 \cdot 10^{-3}$  s permettant une émission laser à  $\lambda = 694 \text{ nm}$ .

La solution pour optimiser l'inversion de population a été de mettre en jeu un quatrième niveau de durée de vie très courte intermédiaire entre la transition laser et le niveau fondamental:



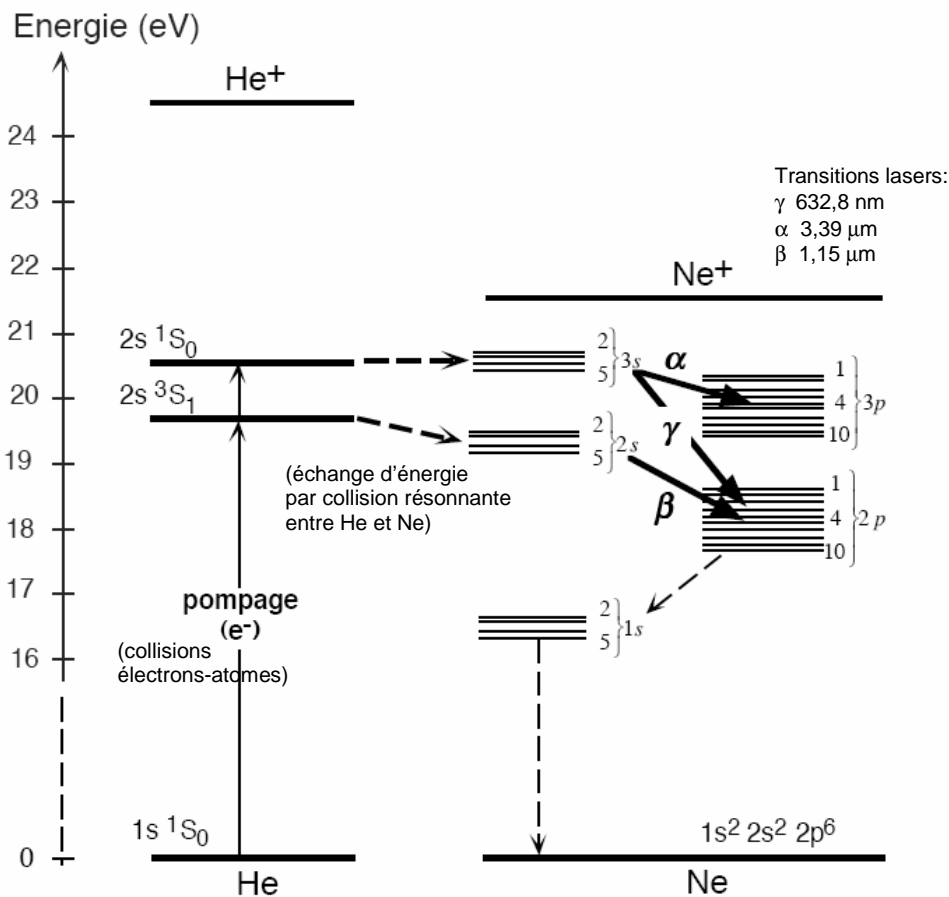
**Système à 4 niveaux:** l'état final de la transition laser n'est pas l'état fondamental mais un état de très courte durée de vie permettant d'obtenir facilement une inversion de population  $N_2 - N_1$  beaucoup plus grande ( $N_1$  très petit)

**IV) Le laser He-Ne**

**a) Niveaux d'énergie et longueurs d'ondes d'émission**

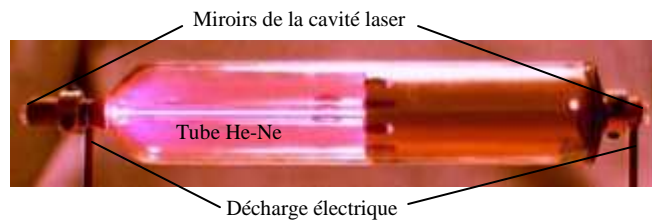
Le laser hélium-néon (He-Ne) a été le premier laser à gaz à 4 niveaux construit. Il possède une petite puissance de sortie et est peu coûteux à produire.

Bien qu'il ne constitue pas le milieu actif lui-même, l'hélium joue un rôle essentiel dans le processus de pompage qui aboutit à l'inversion de population sur les atomes de Néon par un processus d'échange d'énergie par collision résonnante. Au final c'est le néon qui émet de la lumière. Le laser He-Ne est particulièrement utilisé pour son émission dans le rouge, à  $632,8\text{ nm}$ , bien qu'il puisse émettre à d'autres longueurs d'onde.



*Niveaux d'énergie des atomes He et Ne et principales raies laser possibles. Les différentes raies situées dans le visible correspondent aux transitions  $\gamma$ . Les lasers He-Ne rouge fonctionnent sur la raie rouge à  $632,8\text{ nm}$  et les He-Ne vert fonctionnent sur la raie à  $543,5\text{ nm}$  pour laquelle le gain optique est plus faible. Le premier laser He-Ne à été construit en 1961 par Ali Javan et fonctionnait sur la raie à  $1,15\ \mu\text{m}$ .*

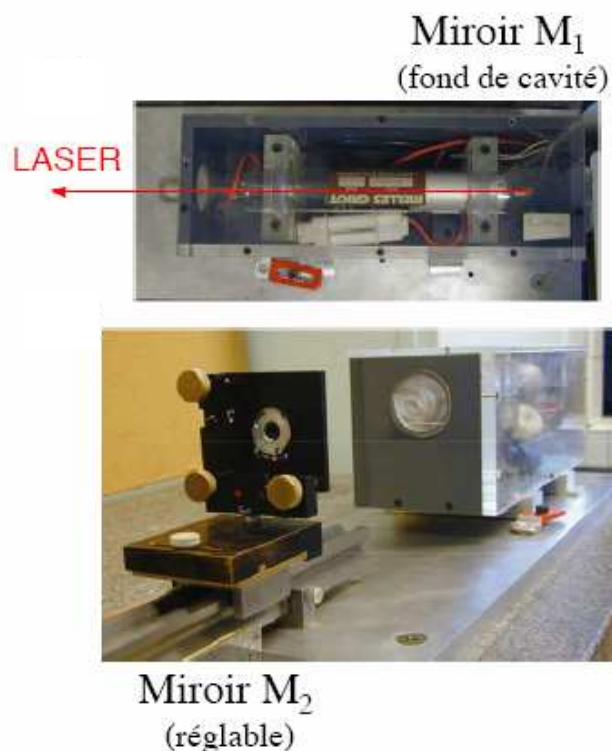
## b) Alignement de la cavité laser



*Tube laser He-Ne commercial en fonctionnement. On distingue nettement au centre du tube la lumière émise par fluorescence de l'hélium.*

Dans les lasers He-Ne commerciaux, les deux miroirs sont directement soudés sur une structure métallique, auquel le tube en verre est également rendu solidaire. Cet assemblage permet de maintenir l'alignement de la cavité optique constant au cours du temps, et de faire fonctionner le laser sur son mode fondamental Gaussien. La durée de vie d'un tube He-Ne est actuellement en moyenne de 20 000 heures. Les deux électrodes situées aux extrémités du tube sont portées à une différence de potentiel de plusieurs milliers de volts provoquant une décharge électrique dans le mélange gazeux qui correspond à un courant de quelques milliampères.

Sur le laser en kit, le miroir sphérique de sortie  $M_2$  ( $R=98\%$ ) a été désolidarisé du tube et fixé sur un support réglable, lui-même posé sur un rail de façon à pouvoir choisir la longueur  $L$  de la cavité laser:



Pour que la cavité puisse fonctionner en laser, il faut qu'après un aller-retour, le faisceau à l'intérieur de la cavité laser se reboucle sur lui-même. Les réglages du miroir sphérique de sortie  $M_2$  permettent de faire laser le système. La procédure de réglage consiste à interposer entre la sortie du tube et le miroir  $M_2$  un petit diaphragme que l'on centrera sur la fluorescence du tube, toujours

présente. On fera en sorte que cette lumière de fluorescence soit réfléchié par le miroir  $M_2$  et repasse par le même diaphragme rebouclant ainsi le système et permettant de faire apparaître le faisceau laser.

### c) Critère de stabilité du laser

Une étude approfondie d'une cavité résonnante de longueur  $L$  montre qu'il existe certaines conditions de stabilité, que l'on vérifiera expérimentalement, pour que l'effet laser puisse exister:

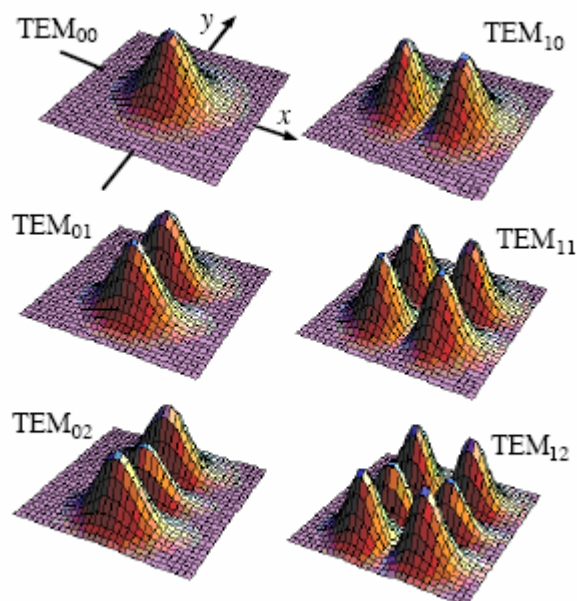
$$0 < L < R_1 \text{ ou } R_2 < L < R_1 + R_2$$

avec  $R_1$  et  $R_2$  les rayons de courbure des miroirs sphériques.

- Vérifier expérimentalement cette condition en modifiant la longueur  $L$  de la cavité laser et montrer qu'il existe une zone où l'effet laser est absent.

### d) Modes de résonance de la cavité

En dérégulant un peu l'alignement de la cavité laser il est possible d'observer d'autres configurations stables donnant plusieurs "taches" lasers distinctes. On parle alors de modes transverses du laser que l'on note en général: **TEM<sub>mn</sub>** (Transverse **E**lectrique **M**agnétique) où les indices  $m$  et  $n$  indiquent le nombre de minimums relatifs à chaque coordonnée d'espace  $x$  et  $y$  (on a considéré que dans la cavité les champs électrique et magnétique de l'onde sont approximativement perpendiculaires à l'axe optique  $z$ )



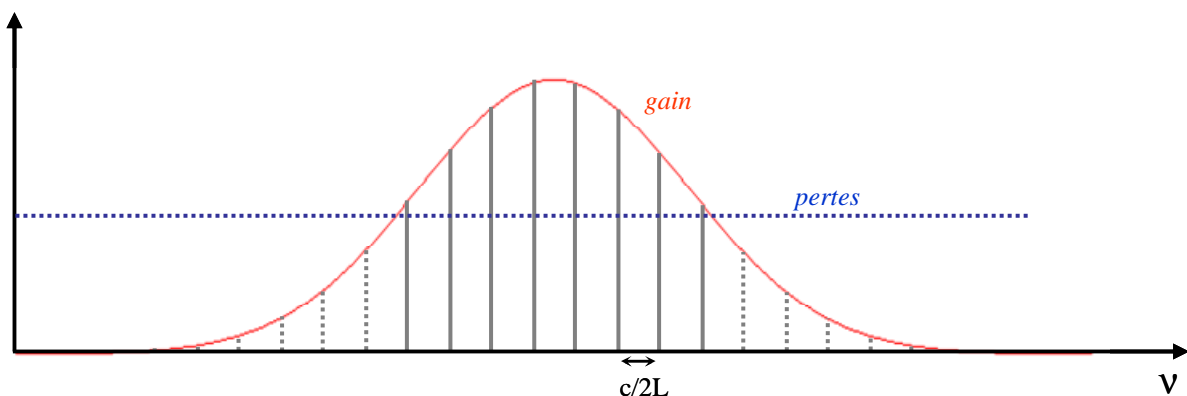
*Répartition de l'intensité lumineuse dans le plan transverse à la direction de propagation pour quelques modes gaussiens **TEM<sub>mn</sub>** ( $m$  et  $n$  correspondent aux nombres de zéro de l'amplitude dans les directions transverse  $x$  et  $y$ )*

Comme dans toute cavité possédant des parois réfléchissantes, il existe aussi une certaine répartition de l'intensité lumineuse suivant l'axe  $z$  du laser. En effet du fait des conditions d'interférences constructives dans la cavité, il ne peut exister que certaines fréquences particulières menant à un système d'ondes stationnaires stables le long de l'axe  $z$ . Ces fréquences particulières, que l'on retrouve dans le faisceau laser de sortie, sont appelées *modes longitudinaux* données par la formule:

$$\nu_{mnq} = \frac{c}{2L} \left[ q + \frac{1}{\pi} (m+n+1) \text{Ar} \cos \sqrt{\left(1 - \frac{L}{R_1}\right) \left(1 - \frac{L}{R_2}\right)} \right]$$

On a donc introduit le paramètre  $q$  correspondant à la structure longitudinale du mode de résonance que l'on notera maintenant  $\text{TEM}_{mnq}$ , avec les indices  $m$  et  $n$  caractérisant toujours les modes transverses associés.

Dans le cas d'une cavité laser parfaitement alignée, fonctionnant sur le mode Gaussien fondamental  $\text{TEM}_{00q}$  (celui des lasers commerciaux), le spectre du faisceau laser fait apparaître plusieurs fréquences très proches séparées de  $\Delta\nu = \nu_{q+1} - \nu_q = \frac{c}{2L}$ :



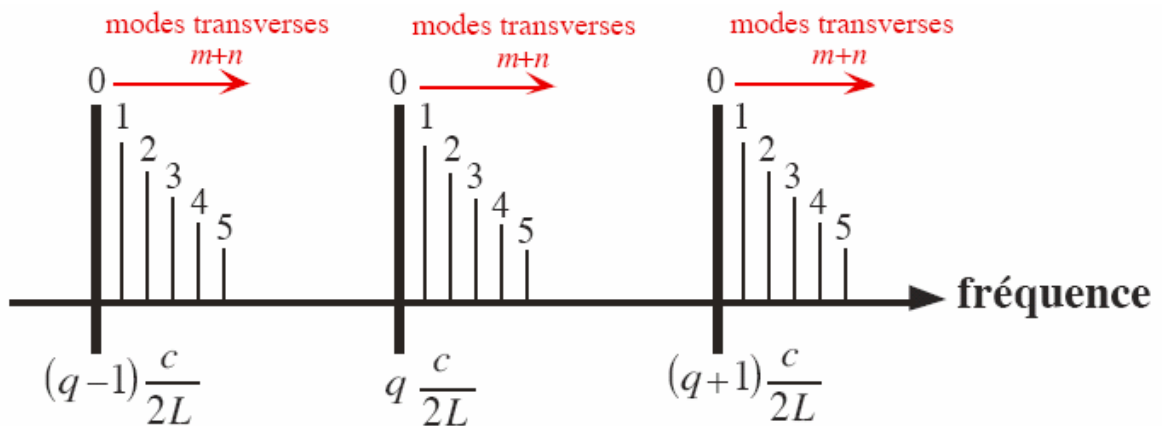
*Principe de fonctionnement d'un laser multimodes. Seules certaines fréquences (modes longitudinaux de la cavité) sont amplifiées si on a la condition: gain > pertes*

On peut faire, au premier ordre, le parallèle avec les modes de vibration d'une corde de longueur  $L$ . La distance entre deux noeuds ou deux ventres consécutifs est de  $\frac{\lambda}{2}$  et nous obtenons dans ce cas une formule bien connue reliant la longueur  $L$  de la cavité et le nombre entier  $q$  de fuseaux de l'onde stationnaire:

$$L = q \frac{\lambda}{2} \Rightarrow \nu_q = q \frac{c}{2L} \Rightarrow \Delta\nu = \nu_{q+1} - \nu_q = \frac{c}{2L}$$



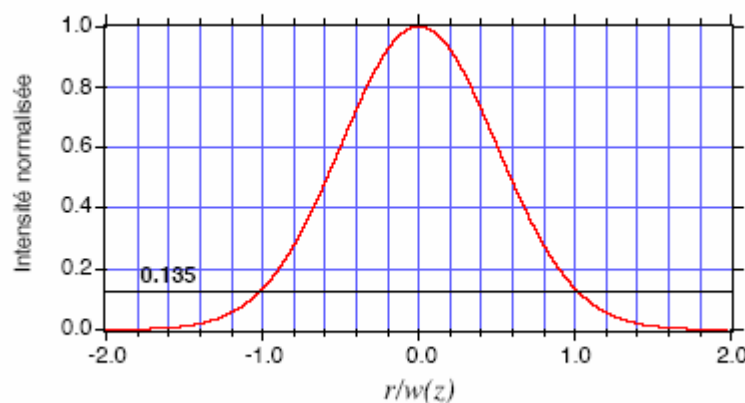
- A l'aide d'un analyseur de spectre et d'une photodiode rapide, montrer qu'il est possible, par un phénomène de battement entre les différents modes du laser, de mesurer l'écart en fréquence  $\Delta\nu$  entre deux modes consécutifs. Précision.
- En jouant sur l'alignement de la cavité, montrer que l'on peut aussi observer d'autres battements associés aux modes transverses  $TEM_{mnq}$  comme schématisé sur la figure ci-dessous:



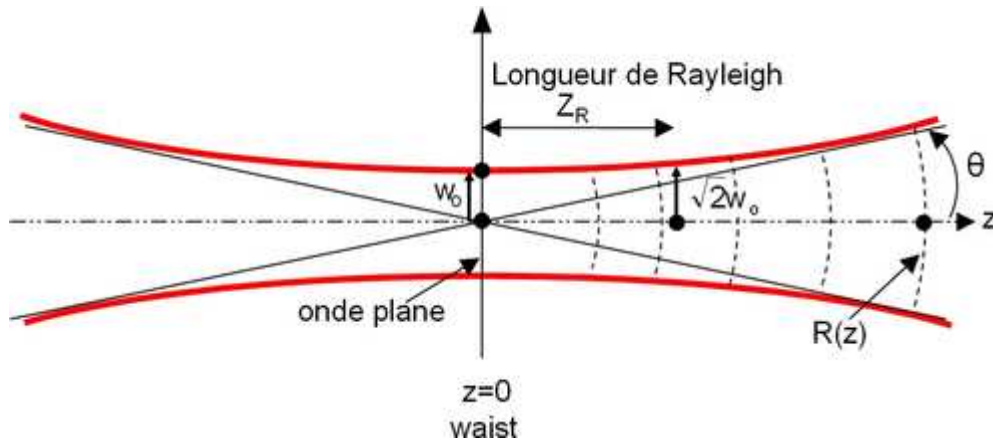
Modes  $TEM_{mnq}$  de résonance d'une cavité à miroirs sphériques. L'indice  $q$  correspond à la structure longitudinale du mode de résonance, tandis que les indices  $(m,n)$  caractérisent les modes transverses associés.

**e) Modes Gaussien fondamental  $TEM_{00}$**

Dans cette partie, par un réglage précis de la cavité, on cherchera à privilégier le mode Gaussien fondamental du laser. Pour ce mode particulier  $TEM_{00}$ , l'intensité lumineuse, proportionnelle au carré du champ électrique, est donnée par:  $I(r, z) = I_0 \exp(-2 \frac{r^2}{w(z)^2})$



Profil transverse du mode Gaussien  $TEM_{00}$ . Le waist  $w(z)$  correspond au rayon  $r$  pour lequel l'intensité a diminuée d'un facteur  $1/e^2=0,135$  par rapport à sa valeur au centre.



La taille caractéristique du faisceau  $w(z)$  est donnée à partir du col ou waist  $w_0$  situé dans le plan par

convention à l'origine  $z=0$ :  $w(z) = w_0 \sqrt{1 + \frac{z^2}{z_R^2}}$  où  $z_R$  est la longueur de Rayleigh en

$$w(z_R) = w_0 \sqrt{2}$$

A l'aide de la caméra CCD Caliens, il est possible d'obtenir directement des coupes transverses du faisceau laser pour un  $z$  donné et ainsi démontrer le caractère Gaussien du mode fondamental  $TEM_{00}$ .

## Acquisitions sur la CCD CALIENS

- Logiciel "CALIENS". Acquisition + exporter l'image en fichier texte

## Traitement des profils laser dans IGOR

- Data → Load Waves → Load general text pour importer un fichier réalisé avec Caliens.
- Windows → New graph pour tracer le profil (l'abscisse est en pixels 1 pixel CCD = 14 μm)
- Analysis → Curve fitting → "gauss"

$$I = y_0 + A \exp\left(-\left(\frac{x - x_0}{width}\right)^2\right) \quad \text{fit Gaussien sur Igor}$$

On écrit généralement l'intensité laser:  $I(r, z) = I_0 \exp\left(-2\frac{r^2}{w(z)^2}\right)$  avec  $w(z)$  la taille caractéristique en  $\frac{I_0}{e^2}$  du faisceau laser en un point  $z$  de l'axe. Le fit "gauss" se présente donc avec des notations un peu particulières:  $r = x - x_0$  avec  $x_0$  la position du maximum de la Gaussienne ( $r = 0$ ),  $w(z) = \sqrt{2} width$ ,  $I_0 = A$  avec un éventuel fond d'intensité  $y_0$ .

Pour obtenir la largeur  $w(z)$ , il faut auparavant aider un peu IGOR en entrant des valeurs approchées pour le fit dans "curve fitting" → "coefficients".

Avec le tableau des valeurs expérimentales des waist  $w(z)$  en fonction de  $z$  il est possible de vérifier la formule théorique:

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \frac{(z - z_0)^2}{z_R^2}}$$

Un fit de votre fabrication, permet de retrouver les paramètres:  $w_0$  (col ou waist de taille minimale),  $z_R$  (longueur de Rayleigh) et  $z_0$  (position sur l'axe  $z$  du plan où se situe le waist de taille minimale  $w_0$ ). Par convention, on renormalise l'axe des  $z$  en prenant l'origine en  $z = 0$  pour obtenir:

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \frac{z^2}{z_R^2}}$$

**Matériel:**

- Banc laser sur rail + miroir réglable + diaphragme
- Analyseur de spectre + photodiode rapide
- CCD Caliens + accessoires
- Ordinateur portable + connexion internet
- Réglet 1 mètre.