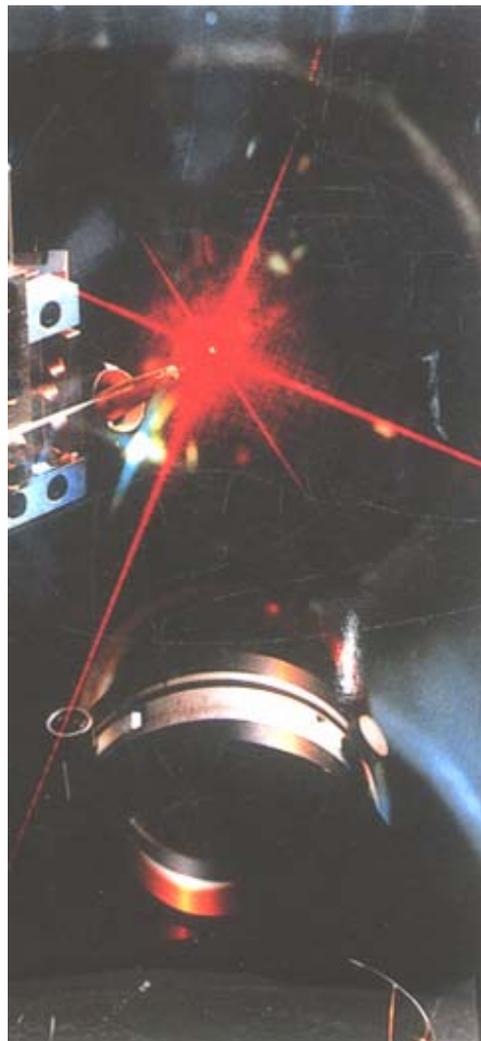


Dossier PS10 :

Les Lasers

Principe, fonctionnement et applications



*Responsable uv : M. Briand
Semestre Automne 1998*

Sommaire

Historique	3
Description sommaire d'un laser	4
I Principe de fonctionnement d'un laser.....	5
1 - Absorption, émission spontanée, émission stimulée	5
2 - Inversion de population, amplification, pompage	6
3 - La cavité résonante.....	8
II Propriétés spécifiques de la lumière laser	13
1 - Interférences, Cohérence	13
2 - Directivité du faisceau laser	13
3 - Densité	14
4 - Monochromaticité de la lumière laser	14
5 - Puissance énergétique du laser	14
III Les différents lasers	15
1 - Les lasers à solides.....	15
2 - Les lasers à gaz.....	16
3 - Les lasers à colorants	17
4 - Les lasers à excimères	17
5 - Les lasers chimiques.....	17
IV Applications des lasers	18
1 - Applications énergétiques	18
2 - Applications au transport de l'information	20
Annexe.....	24
I Eléments de chimie	25
1 - Emission de la lumière par les corps portés à haute température	25
2 - Emission de la lumière par les gaz et les vapeurs.....	25
3 - Domaines de longueurs d'onde	26
4 - Réalisation du premier laser.....	26
II Biographies	27

Historique

Les travaux d'Albert Einstein qui posèrent les lois théoriques pour la réalisation des lasers datent de plus de 80 ans. En effet, c'est en 1917 qu'il a publié ses fameux travaux sur l'absorption et l'émission de lumière où il mentionne les différences entre émission spontanée et émission stimulée.

C'est au cours des années 1960 que l'on a vu apparaître de nouvelles sources lumineuses : les lasers (pour Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation ; amplification de lumière par émission stimulée de rayonnements).

En 1958, les Américains Schawlow et Townes ont proposé le principe du laser. Maiman fit fonctionner en 1960 le premier laser à rubis (*cf. annexe*), la réalisation du premier laser à gaz, utilisant le mélange gazeux He-Ne est dû en 1961 à Javan, Bennett et Herriot. Depuis le développement des lasers a pris depuis une importance scientifique considérable, avec des applications aussi diverses que nombreuses que nous détaillerons dans le dernier chapitre.

Dans ce dossier, nous tâcherons de détailler au mieux les éléments de fonctionnement du laser, d'expliquer succinctement le principe des différents lasers et nous énumérerons enfin quelques-unes de ses applications afin de voir à quel point le laser a pris une place importante dans le monde actuel. Une annexe détaille les éléments pré-requis pour la compréhension du laser.

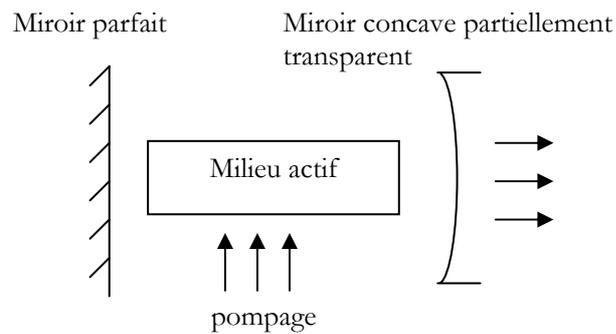
Description sommaire d'un laser

Avant toute étude et afin de bien comprendre le principe de fonctionnement du laser, tâchons d'avoir constamment en tête un « schéma équivalent » de celui-ci.

Dans tout laser, on trouve les mêmes éléments fondamentaux qui font du laser un oscillateur dans le domaine optique, à savoir :

- **Un milieu actif** au sein duquel le rayonnement est émis et amplifié
- **Une cavité** jouant le rôle du résonateur, limitée par des faces partiellement réfléchissantes entre lesquelles est placé le milieu actif, il augmente l'amplification et effectue une sélection dans les fréquences émises.
- **Un dispositif de pompage** qui permet de produire l'inversion de population dans le milieu actif.

Schématisation d'un laser :



I Principe de fonctionnement d'un laser

1 - Absorption, émission spontanée, émission stimulée

Considérons deux niveaux d'énergie E_1 et E_2 . Entre ces deux niveaux d'énergie trois espèces de phénomènes peuvent se produire :

- L'atome au niveau E_1 absorbe un photon incident d'énergie :

$$h \cdot \nu = E_2 - E_1$$

et passe du niveau E_1 au niveau E_2 , il y a ici **absorption**.

- Après un temps très court, il retombe au niveau E_1 en émettant un photon dans une direction quelconque d'énergie :

$$h \cdot \nu = E_2 - E_1$$

C'est **l'émission spontanée**. Ce processus est pratiquement celui de toutes les sources lumineuses ; par exemple dans une lampe électrique, les atomes sont excités par la chaleur produite par le passage du courant électrique. En revenant à des états de plus basse énergie, ils émettent sous forme de lumière l'énergie qu'ils avaient absorbée.

- Il existe un second type d'émission : **l'émission stimulée** (ou induite) prévue par Einstein. Lorsqu'un atome se trouve déjà au niveau excité E_2 , un photon incident d'énergie :

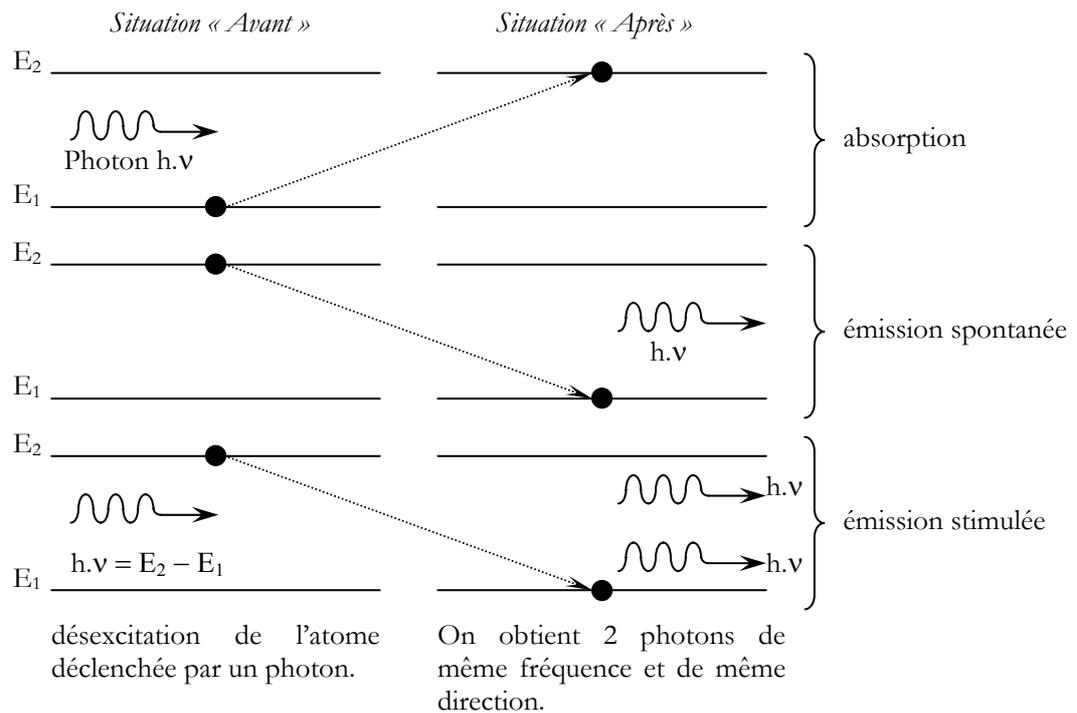
$$h \cdot \nu = E_2 - E_1$$

peut forcer l'atome à revenir au niveau E_1 . L'atome émet un second photon d'énergie :

$$h \cdot \nu = E_2 - E_1$$

et le fait est que les deux ondes associées à ces deux photons sont en phase (les deux photons sont identiques).

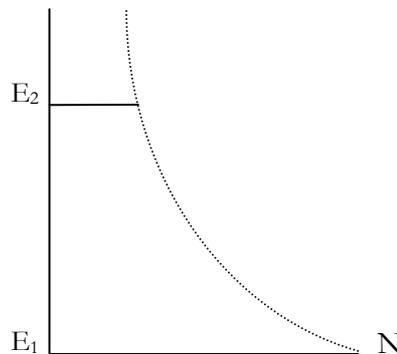
Par métaphore, l'émission spontanée peut être comparée à la cacophonie d'un orchestre, c'est un processus **incohérent**. Quant à l'absorption et l'émission stimulée, elles peuvent être comparées à une symphonie dirigée par un chef d'orchestre, ce sont des interactions **cohérentes** (c'est à dire que pour les deux phénomènes, l'échange d'énergie correspond à une onde en relation de phase avec l'onde primaire ; cf. propriétés spécifiques de la lumière laser).



2 - Inversion de population, amplification, pompage

• **Inversion de population :**

L'étude statistique des phénomènes montre que la population des niveaux d'énergie décroît lorsque l'énergie peut être représentée par la courbe :

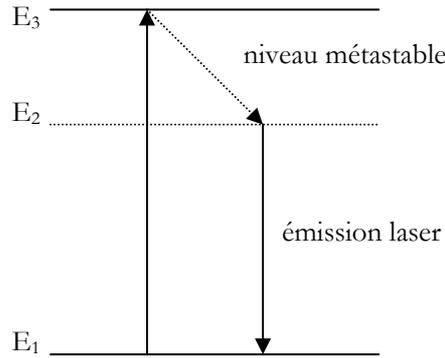


La longueur des traits horizontaux est proportionnelle au nombre N des atomes qui occupent ce niveau. On remarque qu'il y a plus d'atomes dans le niveau de plus basse énergie E_1 .

conséquence : Un photon incident a plus de chances d'être absorbé en faisant passer un atome du milieu considéré du niveau E_1 à un niveau supérieur E_2 que de provoquer l'émission stimulée. Ceci veut dire que l'intensité de la lumière incidente va diminuer au cours de la traversée du milieu. Il y a absorption du rayonnement incident.

Il est possible de créer un état de non équilibre thermique dans lequel les atomes sont plus nombreux au niveau excité E_2 qu'au niveau E_1 . On dit qu'il y a **inversion de population**. L'existence des états métastables va permettre de réaliser cette inversion. Considérons un milieu dont les atomes peuvent occuper les trois niveaux d'énergie (fig. ci-dessous). Le niveau E_2 est un niveau métastable dont la durée de vie est grande par rapport à celle du niveau E_3 . Par exemple, sous l'action d'une source lumineuse puissante, les atomes passent du niveau E_1 au niveau E_3 . Ils restent dans cet état un temps très court au niveau métastable E_2 où ils restent beaucoup plus longtemps (environ cent millions de fois plus qu'en E_3).

La population du niveau E_2 devient ainsi plus grande que celle du niveau E_1 : il y a inversion de population.



• **Le pompage :**

Nous avons considéré comme acquise l'inversion de population n_2 et n_1 entre E_2 et E_1 (n_2 est le nombre des atomes à un niveau d'énergie E_2 en caractéristique de sa nature chimique et n_1 le nombre d'atomes à un état d'énergie inférieur E_1). Or l'obtention de cette inversion est en pratique très difficile. Même dans le cas où l'oscillation peut être obtenue, c'est le « pompage » qui limite certaines des performances que l'on peut attendre du laser.

Le « pompage » est le remplissage du niveau excité E_2 aux dépens du niveau fondamental E_1 en fournissant de l'énergie aux atomes. L'inversion de la population étant réalisée, l'interaction d'un photon incident avec l'atome peut provoquer outre le phénomène d'absorption, l'émission stimulée. Le milieu laser devient amplificateur, puisque l'émission de photons est supérieure à l'absorption.

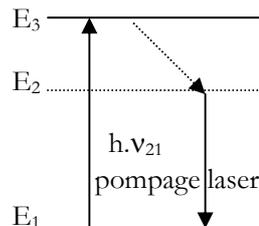
Différents procédés permettent de peupler le niveau excité E_2 afin d'aboutir à l'inversion de population recherchée :

Le pompage optique : De même qu'un atome excité dans l'état E_2 à une certaine probabilité X_{21} de perdre spontanément de l'énergie en passant à un état d'énergie inférieure E_1 tout en émettant un photon, si on envoie sur l'atome dans l'état E_2 de la lumière à une fréquence ν_{21} telle que $h \cdot \nu_{21} = E_2 - E_1$, l'atome a une probabilité Y_{21} de passer à l'état E_2 .

Remarque : Dans les lasers à rubis ou à colorants, on utilise des lampes flash spéciales pour réaliser l'inversion de population ; on parle dans ce cas de pompage optique, une décharge électrique peut aussi provoquer l'inversion de population par collisions entre atomes.

Le pompage optique à trois niveaux :

Supposons que l'atome du corps considéré possède au-dessus du niveau fondamental, deux niveaux E_1 et E_2 , les autres niveaux étant suffisamment loin pour ne pas intervenir. L'ensemble se présente de la façon suivante :



On envoie sur le système de la lumière à la fréquence ν_{21} . Il y a donc absorption d'un photon d'énergie $h \cdot \nu_{21} = E_2 - E_1$ puis il y a transition de E_2 à E_1 .

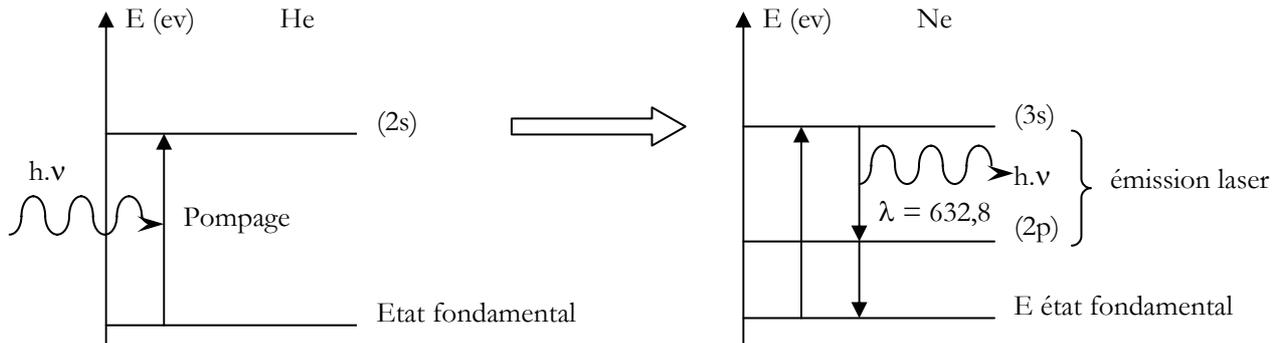
Le pompage par

excitation électronique :

Lorsqu'on soumet un gaz sous faible pression à un champ électrique intense, certains atomes sont ionisés et les électrons ainsi libérés acquièrent de l'énergie cinétique aux dépens du champ. Lors du choc d'un électron accéléré avec un atome, une partie de l'énergie est cédée à celui-ci et l'amène à un état excité

(Notons qu'il existe un pompage chimique fonctionnant sur le même principe sauf que les spectres moléculaires sont beaucoup plus complexes que ceux des atomes constitutifs).

exemple : cas du laser He-Ne



Une décharge électrique excite He jusqu'à son niveau (2s) ; c'est le pompage. Ce niveau, proche en énergie du niveau (3s) permet de nourrir celui-ci par collisions avec des atomes de Ne. L'inversion de population en résulte. L'inversion de population étant réalisée, l'interaction d'un photon incident avec l'atome peut provoquer outre le phénomène d'absorption, l'émission stimulée. Le milieu laser devient alors amplificateur, puisque l'émission de photons est supérieure à l'absorption. L'amplitude de l'onde est supérieure après traversée du milieu laser ; il y a gain de l'intensité lumineuse.

3 - La cavité résonante

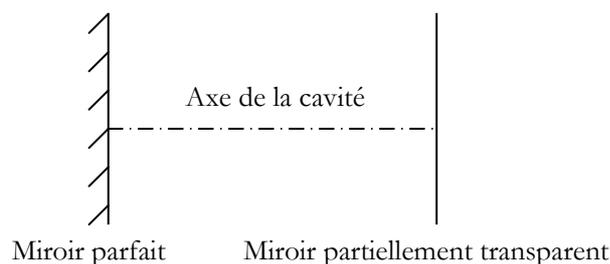
Le pompage permet d'avoir une amplitude de l'onde supérieure après la traversée du milieu laser. On peut dire qu'il y a gain de l'intensité lumineuse.

Cependant l'effet amplificateur est cependant trop faible pour la plupart des milieux laser et le fonctionnement d'un laser sur ce seul principe est difficile à réaliser.

Comme l'amplification est proportionnelle à la longueur d'onde du milieu traversé par les photons provoquant l'émission stimulée, il suffit d'allonger ce parcours, c'est le rôle de la cavité résonante ; elle permet de faire effectuer à la lumière de multiples réflexions entre deux miroirs plans, l'un est totalement réfléchissant et l'autre partiellement (90 à 99%) pour que le faisceau laser puisse sortir de l'appareil.

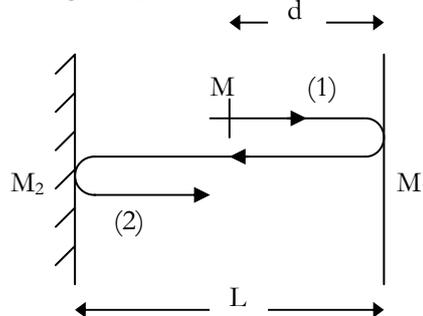
- Les caractéristiques spatio-temporelles de l'oscillation dans le résonateur optique seront déterminées surtout par celles de la cavité. Essentiellement, celle-ci imposera à tous les photons émis d'être « en phase », constituant à la sortie une onde quasiment plane et monochromatique.

Les photons « piégés » entre les deux miroirs réalisent statistiquement un grand nombre d'allers et retours à l'intérieur de la cavité avant de s'en échapper, provoquant ainsi une amplification de l'émission stimulée.



La lumière se trouve ainsi enfermée dans une cavité résonante.

Par allers et retours successifs de la lumière entre les deux miroirs, les photons dus à l'émission stimulée produisent à leur tour de plus en plus de photons et, comme toutes les ondes associées sont en phase, l'amplitude et l'intensité résultante deviennent considérables. Le phénomène cesse rapidement et une impulsion lumineuse intense sort du côté du miroir semi-réfléchissant ; l'émission d'un tel laser est discontinue : on dit qu'il fonctionne en **régime pulsé**.



Considérons, en un point M de la cavité, l'onde (1) se dirigeant vers le miroir M₁ et au même point l'onde (2) résultant de la précédente après une réflexion partielle en M₁, puis une réflexion sur M₂. Ces deux ondes interfèrent en M.

Par rapport à l'onde (1), l'onde (2) a parcouru un trajet supplémentaire de :

$$d + L + (L - d) = 2.L$$

Pour que les effets d'amplification ne soient pas détruits par l'interférence, l'interférence des ondes (1) et (2) doit être constructive. Il faut donc que $2.L = p.\lambda$ c'est à dire :

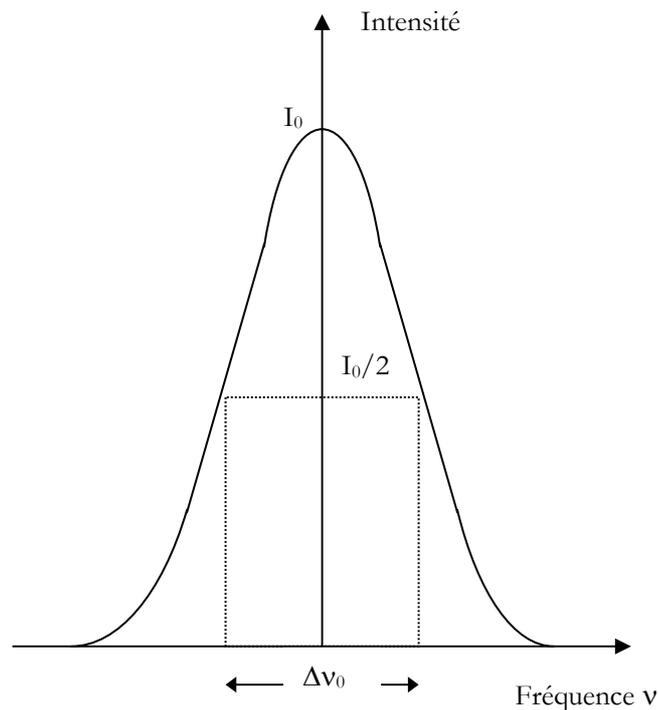
$$L = p.\lambda/2$$

L : Longueur de la cavité.

λ : Longueur d'onde de la lumière produite par émission stimulée.

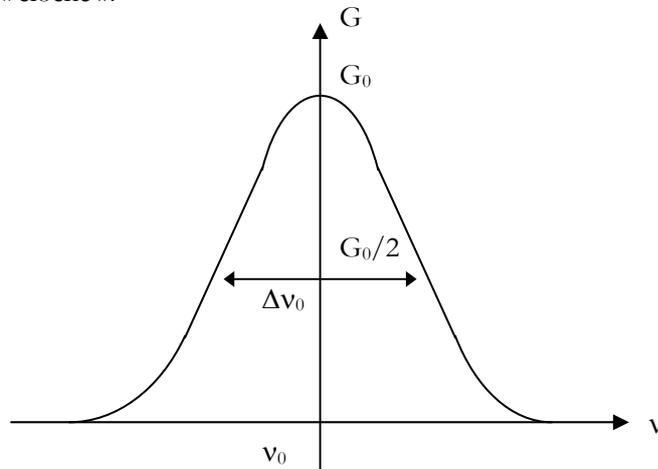
p : Nombre entier.

La largeur de raie est l'intervalle de fréquence $\Delta\nu_0$ pour lequel l'intensité relative de la raie correspond à la moitié de sa valeur maximale I_0 . Elle caractérise l'étalement en fréquence de la source lumineuse.



Pour laser He-Ne, $\Delta\nu_0 = 1$ GHz, résultat à comparer par exemple avec une lampe à vapeur de sodium où $\Delta\nu_0 = 10^4$ GHz.

conséquence : Le facteur d'amplification (ou gain) de l'onde de fréquence ν , mais présente un profil en forme de « cloche ».

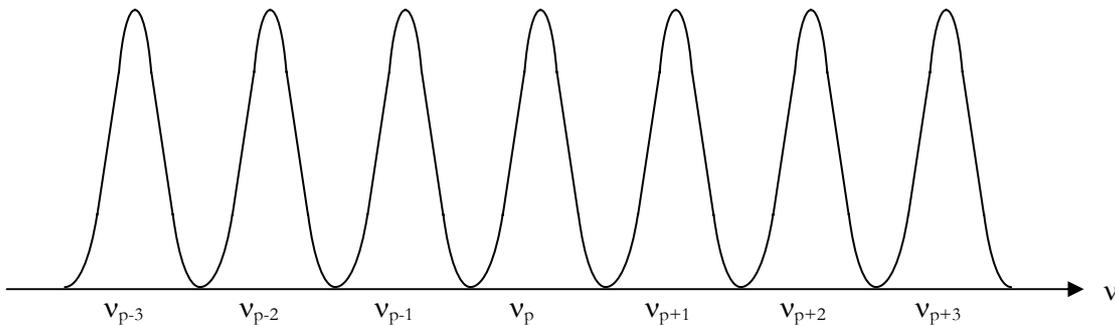


Donc la condition d'interférences constructives est $L = p.\lambda/2$, en considérant la fréquence ν on a la relation $L = p.c/(2.\nu)$

Donc tout rayonnement de fréquence $\nu = p.c/(2.L)$ peut sortir de la cavité.

Parmi toutes les fréquences ν possibles, la cavité de longueur L ne sélectionne que celles qui conduisent à des interférences constructives $\nu = p.c/(2.L)$
 Chacune de ces fréquences définit un mode du laser. Les fréquences des différents modes étant contenues dans la bande de fréquence de la raie spectrale naturelle (raie due à l'émission stimulée).

La cavité résonante ne sélectionne que les modes de fréquences $\nu_p = p.c/(2.L)$, représentés ci-dessous :



La cavité ne sélectionne que les modes propres de fréquences. Deux modes successifs correspondant à p et $p+1$ sont séparés par une fréquence :

$$\Delta\nu = \nu_{p+1} - \nu_p = c/(2.L)$$

Dans le cas du laser He-Ne de longueur de la cavité résonante $L = 30$ cm et $\Delta\nu = 500$ MHz

• **Bilan énergétique :**

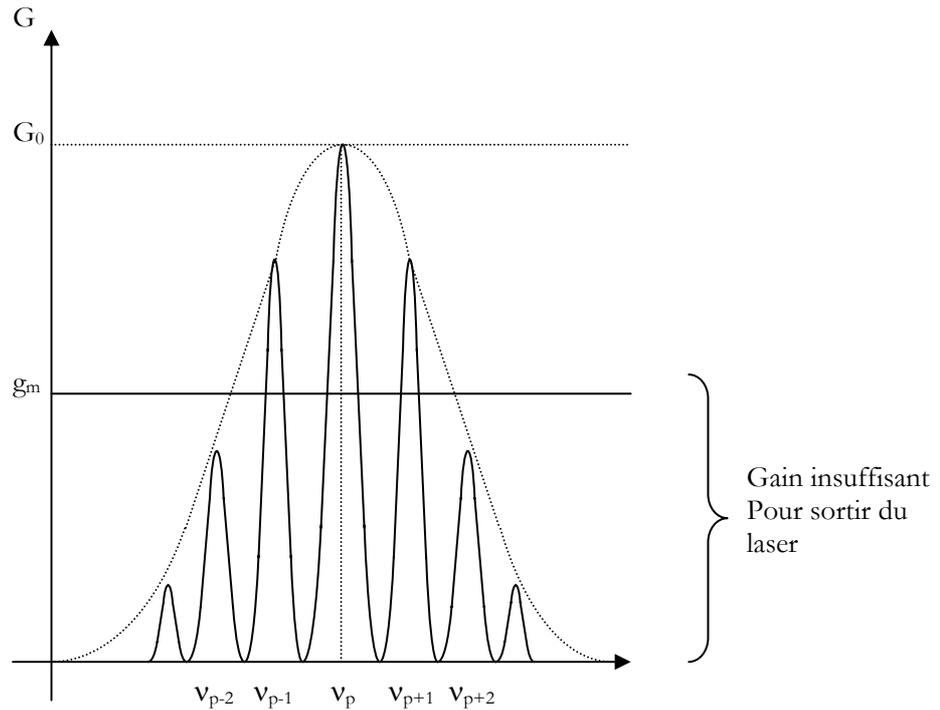
Du point de vue de la cavité résonante, l'émission du faisceau laser correspond à une perte d'énergie ; du fait qu'il émet un rayonnement à l'extérieur, l'oscillateur optique « laser » est amorti. Lorsque l'appareil est en fonctionnement, le rôle du milieu amplificateur (He-Ne par exemple) est de fournir à la cavité une puissance lui permettant de compenser la puissance sortante.

• **Fréquence d'émission d'un laser :**

La fréquence d'émission d'un laser est asservie aux propriétés du milieu amplificateur et de cavité résonante. Les lasers courants ne peuvent émettre que dans l'étroite bande de fréquence où le gain du milieu amplificateur est supérieur ou égal à une valeur seuil g_m qui correspond au gain minimum permettant de compenser les pertes dans la cavité.

Les oscillations ne sont entretenues que pour les modes dont le facteur d'amplification est suffisant, c'est à dire pour les modes de fréquence proches de la fréquence ν_0 correspondant au maximum G_0 du gain G .

Le laser fonctionne donc sur une plage de fréquence plus étroite que la raie d'émission (émission stimulée) puisqu'il y a véritablement effet laser qu'au-delà du seuil g_m .



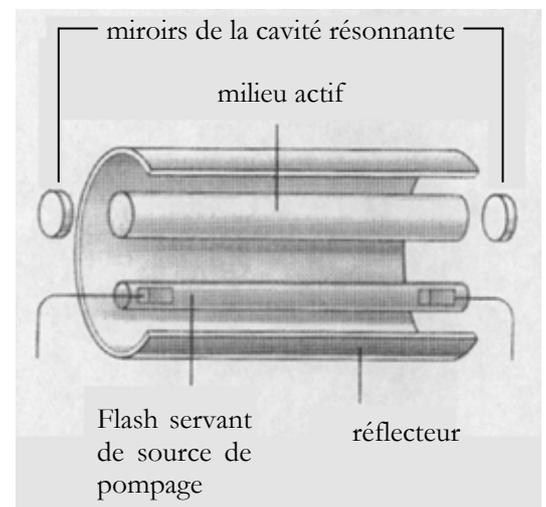
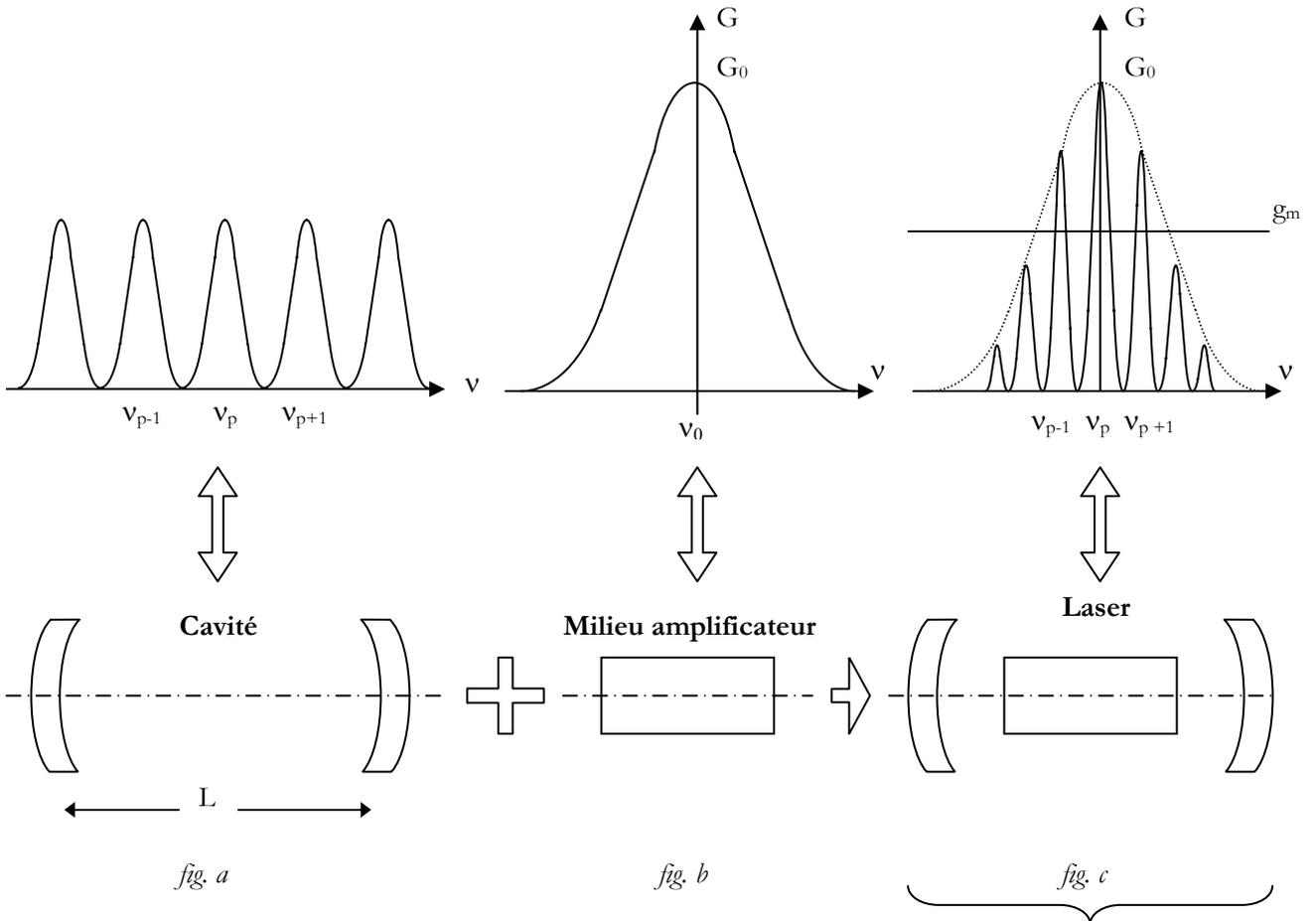
Suivant la fréquence, le laser ne peut émettre que sur une seule fréquence (laser monomode) ou sur plusieurs fréquences (laser multimode).

En résumé :

Fig. a : La cavité ne sélectionne que les modes de fréquences $\nu_p = c/(2.L)$

Fig. b : Le processus d'émission stimulée n'amplifie que les fréquences ν voisines de la fréquence centrale ν_0 .

Fig. c : Le laser ne sélectionne qu'un nombre restreint de fréquences propres de la cavité situées autour de la fréquence centrale ν_0 et pour lesquelles l'amplification compense les pertes.



Principe d'un générateur laser

II Propriétés spécifiques de la lumière laser

1 - Interférences, Cohérence

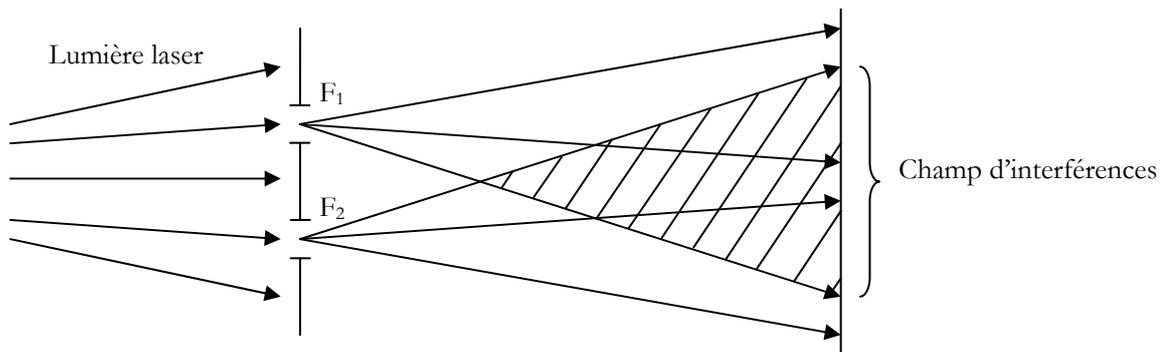
La superposition de deux ou plusieurs ondes produit généralement des interférences, en effet, selon leurs phases respectives, les différentes ondes s'ajoutent mutuellement (lorsqu'elles sont en phase) ou se soustraient mutuellement (lorsqu'elles sont en opposition de phases) de façon à produire des minima ou maxima d'intensité. Les ondes électromagnétiques qui ont, à une date donnée, même phase en tout point d'une section droite du faisceau sont cohérentes. Par opposition, une radiation totalement incohérente est caractérisée par l'absence de relation de phases mutuelles, et l'intensité totale est alors égale à la somme de toutes les intensités individuelles.

- Si on produit des interférences entre deux faisceaux dont un est issu de l'autre, mais retardé d'un certain temps τ , la **cohérence temporelle** indique le retard maximum donnant encore des interférences.

Ce temps de cohérence τ_{coh} est inversement proportionnel à la largeur de la ligne $\Delta\nu$ d'émission, c'est à dire, plus l'émission est étalée en fréquence, plus la cohérence temporelle est faible.

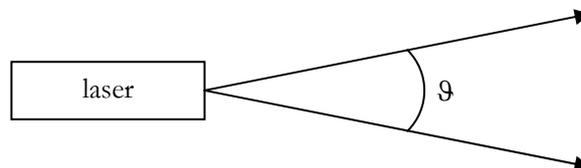
Interférences

C'est à l'aide de l'expérience des trous de Young qu'on peut déterminer si les deux portions d'un faisceau lumineux choisi avec les deux fentes (F_1 et F_2) sont cohérentes et produisent des interférences sur l'écran.



- Du point de vue de la **cohérence spatiale**, les lasers ont aussi de grandes qualités. Ce n'est pas le parallélisme des rayons émis par un laser qui définit sa cohérence spatiale, c'est le fait qu'il se comporte ou non comme une source ponctuelle. Que le laser émette un faisceau de rayons parallèles ou un faisceau divergent, la lumière sera spatialement cohérente si le faisceau semble provenir d'une source ponctuelle (par opposition aux sources « classiques » ; lampes). En recevant le faisceau sur une lentille, on doit donc pouvoir obtenir une image ponctuelle, si l'image est une tache plus ou moins large, la lumière n'est pas spatialement cohérente (cf. fig. directivité)

2 - Directivité du faisceau laser



Le faisceau émis par un laser diverge toujours un peu. Si ϑ est la divergence et d le diamètre du faisceau sortant du laser on a :

$$\vartheta = \lambda / d \quad \text{par exemple si } d = 3 \text{ mm, } \vartheta = 6''$$

On peut réduire l'angle de divergence en utilisant une lunette ou un télescope. Le faisceau laser pénètre par l'oculaire et sort par l'objectif. Si G est le grossissement de la lunette, la divergence du faisceau devient ϑ / G . Pour $G = 60$ on a $\vartheta = 6''$. Soit une tache de 6 mm de diamètre à 100 m. Le faisceau laser garde un très bon parallélisme.

3 - Densité

Une source de lumière peut être caractérisée par sa densité de photons par vibration propre, c'est à dire par le nombre de photons compris dans l'angle ϑ et l'intervalle τ_{coh} . Une vibration propre comprend la partie de lumière cohérente temporellement et spatialement, c'est à dire la quantité de lumière émise dans l'angle de diffraction ϑ durant le temps de cohérence τ_{coh} .

Exemple de densités de photons de quelques source de lumière :

Source	Densité
Lampe à mercure à haute pression	10^{-3} photons / vibration
Soleil	$1,3 \cdot 10^{-2}$ photons / vibration
Laser He-Ne	10^{11} photons / vibration
Laser à impulsions géantes	10^{18} photons / vibration

Pour les sources thermiques telles que le soleil, la lampe à incandescence... l'émission spontanée de photons produit des densités largement en dessous de 1 photon / vibration, par contre, les sources laser donnent, par émission stimulée, des densités de photons beaucoup plus grandes que 1 photon / vibration

4 - Monochromaticité de la lumière laser

Plaçons à la sortie un objectif de microscope afin d'obtenir un faisceau élargi ; avec le faisceau obtenu, éclairons une fente. Avec une lentille formons l'image sur un écran de la fente et interposons un prisme (ou un réseau) entre la lentille et l'écran.

Contrairement au spectre d'une lampe à vapeur de mercure, le spectre de la lumière du laser ne comporte à notre échelle qu'une seule raie. La lumière émise par le laser est donc monochromatique.

remarque : Il existe de lasers He-Ne qui émettent dans le vert au lieu du rouge.

5 - Puissance énergétique du laser

Le laser est une onde lumineuse ; elle transporte donc l'énergie. La puissance P du laser correspond à l'énergie lumineuse émise par celui-ci en 1 s ; elle s'exprime en watt (W).

$$P = W/t = (n \cdot h \cdot \nu) / t = (n \cdot h \cdot c) / (\lambda \cdot t) \quad \text{avec } n : \text{le nombre de photons}$$

L'originalité de la lumière laser tient au fait que cette puissance est émise avec une faible divergence. Toute l'énergie du laser est donc concentrée sur une très faible surface.

Exemples de puissances délivrées par un laser :

Type de laser	Puissance	Utilisation
Laser He-Ne de type lycée	0,5 à 1 mW	Expériences simples d'optique
Diode laser As-Ga	1 à 3 mW	Lecteurs de code barre, de CD, télécommunications
Laser de type YAG (cristal d'Yttrium et d'aluminium)	De l'ordre de 500 W sous forme d'impulsions de fréquence 1 KHz	Micro-usinage
Lasers à gaz CO ₂ en continu	100 MW à plusieurs KW	Découpe d'étoffes, micro-usinage, chirurgie, ...
Lasers impulsionnels (azote, CO ₂)	Puissance pouvant atteindre 1 MW pendant des durées de l'ordre de 10 ns	Recherche ...

III Les différents lasers

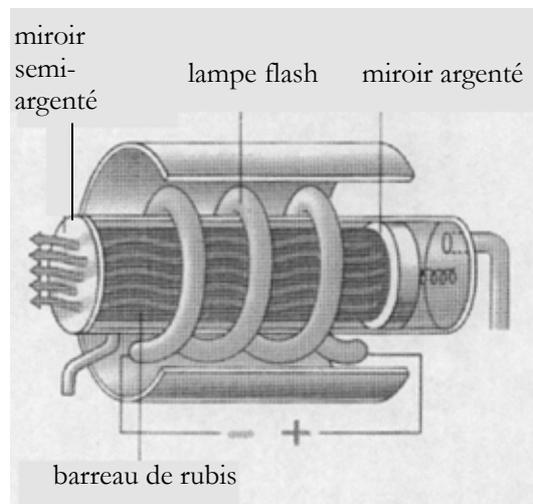
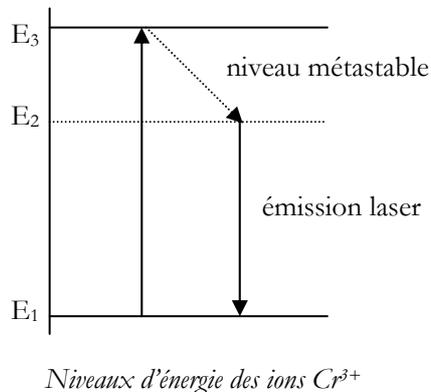
1 - Les lasers à solides

Dans les lasers à solides, le milieu actif où se produit l'inversion de population est un barreau cylindrique formé par un cristal ou un verre dans lequel on incorpore des ions convenables.

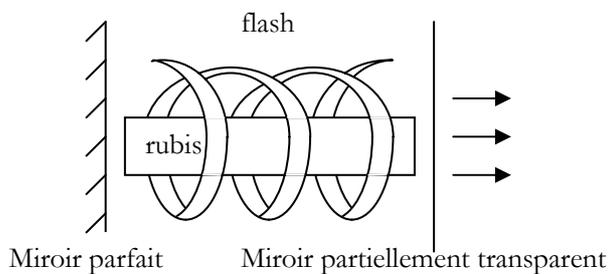
- **Dans le laser à rubis**, le cristal est de l'oxyde d'aluminium Al_2O_3 dopé par des ions Cr^{3+} :
Le niveau métastable est en E_2 . La transition :

$$E_2 \rightarrow E_1$$

Correspond à l'émission stimulée, c'est à dire à l'émission laser. On peut produire le pompage optique avec une source émettant un spectre large ; dans le laser à rubis, c'est un flash puissant.



Laser à rubis à flash hélicoïdal



Schématisme du laser à rubis

Le laser à rubis fonctionne en régime pulsé et il émet un rayonnement de longueur d'onde 694.3 nm (raie rouge).

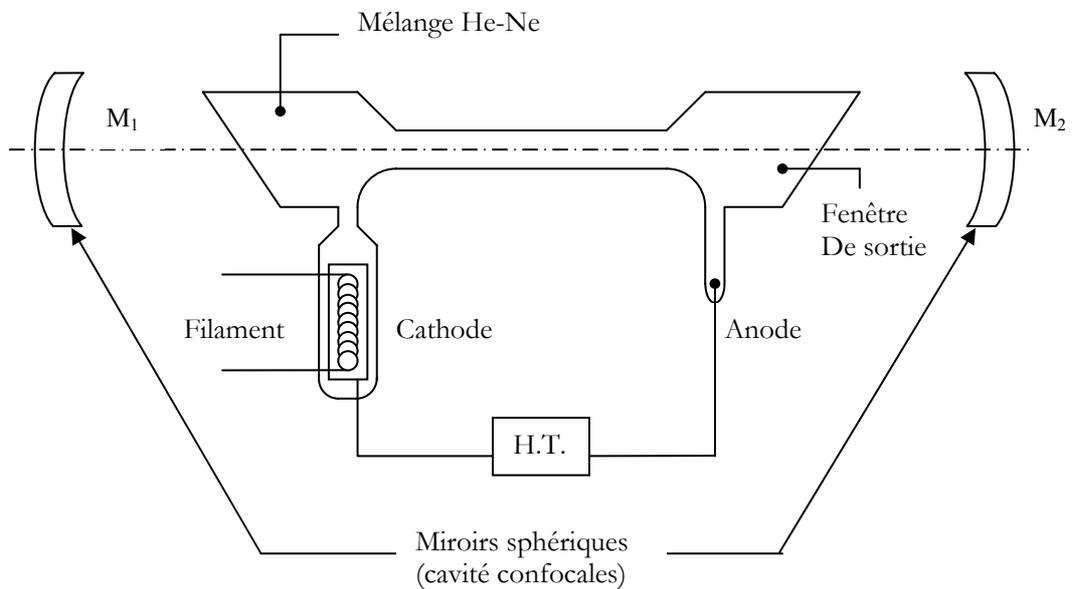
Exemple : Avec un barreau cylindrique de rubis de 10 mm de diamètre et de 5cm de longueur, on obtient des puissances de pointe de 10 à 20 kW.

- **Le laser à néodyme** ; l'élément actif est néodyme (terre rare) à l'état d'ion Nd^{3+} dans un verre ou dans un grenat d'yttrium ou YAG (oxyde d'aluminium $Y_3Al_5O_{12}$), Nd est un laser à quatre niveaux, le niveau de la transition laser se situe au-dessus du niveau fondamental, en régime pulsé, le fonctionnement du laser YAG est similaire à celui du laser à rubis. On peut faire fonctionner ce laser en continu en utilisant des lampes au tungstène pour le pompage. Les puissances sont de l'ordre de 10 W.

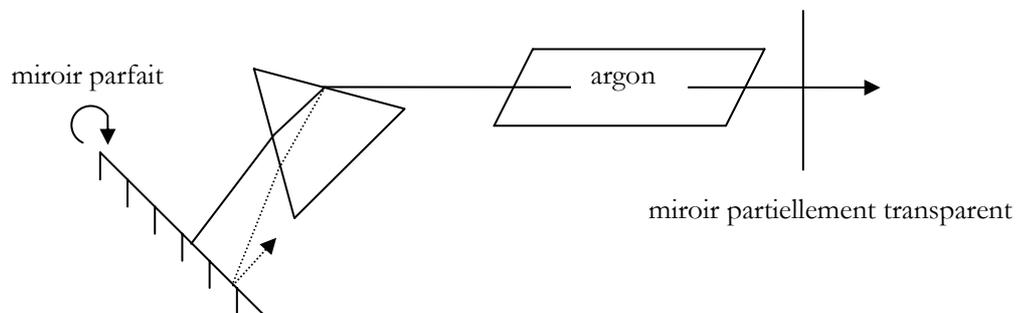
2 - Les lasers à gaz

Dans les lasers à gaz, le milieu amplificateur est à l'état gazeux. Le pompage est généralement produit par une décharge électrique continue. Un laser à gaz est constitué par un tube à décharge placé entre deux miroirs. Le réglage des deux miroirs étant difficile, on emploie souvent des miroirs concaves sphériques dont les centres de courbure (ou foyers) coïncident. Le tube de verre contenant le gaz est fermé de façon particulière, par deux fenêtres inclinées sur l'axe du tube. Ces dernières sont appelées fenêtres de Brewster : leur rôle est de délivrer un champ électrique (celui de l'onde lumineuse de sortie) de direction donnée. Elles ont une fonction de polarisation de l'onde lumineuse.

- Dans le **laser hélium-néon**, le tube de verre contient un mélange à 90% d'hélium et à 10% de néon, c'est le néon qui constitue le milieu actif. Le pompage est électrique ; la haute tension génère dans l'ampoule de verre des décharges électriques qui excitent les atomes d'hélium. Les atomes d'hélium excités agissent sur ceux de néon, à population inversée, subit alors la transition à 632,8 nm (raie rouge ; seule transition sur les trois que possède le laser He-Ne qui émet dans le spectre visible). Les deux miroirs ferment la cavité résonante. La longueur du tube est en général de l'ordre de 50 cm à 1 m avec un diamètre intérieur de 3 mm.

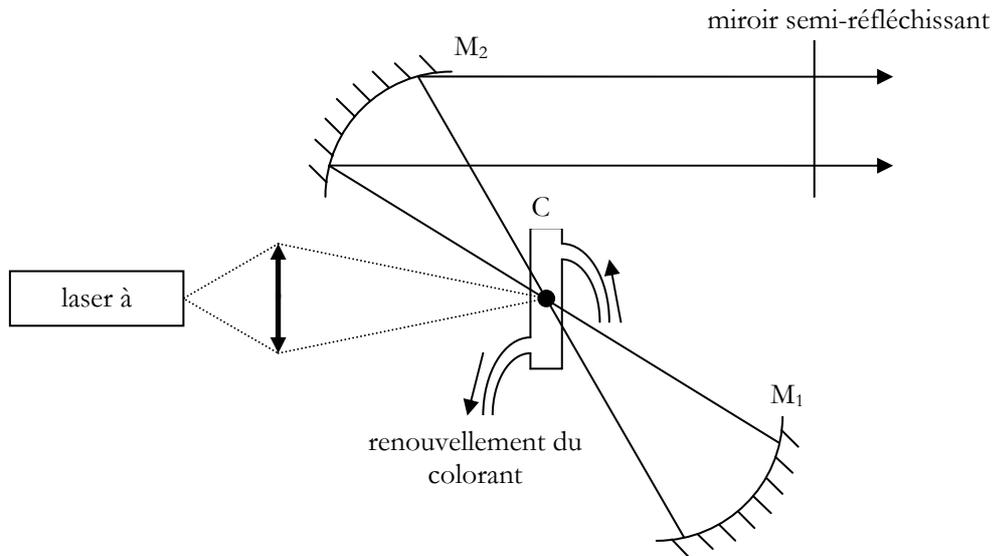


- Le **laser à argon ionisé** a neuf transitions laser possibles dans le spectre visible. On peut soit les utiliser toutes simultanément soit les séparer à l'aide d'un prisme ou d'un réseau placé dans la cavité.



3 - Les lasers à colorants

Les lasers à colorants utilisent comme milieu actif des molécules d'un colorant fluorescent en solution dans un liquide. Il y a beaucoup de transitions laser possibles et le profil d'amplification est large. Avec un solvant comme la rhodamine 6G, le profil d'amplification s'étend sur tout le spectre visible. Le laser à colorant fonctionne en continu si le colorant est renouvelé constamment. Le pompage d'un laser à colorant en continu s'effectue avec un laser auxiliaire (par exemple, un laser à argon ionisé). On concentre le faisceau provenant du laser à argon sur la cuve C, contenant le milieu actif ; le colorant, au moyen de la lentille convergente L. La cuve est au centre de courbure du miroir M_1 et au foyer de du miroir M_2 . Entre C et M_1 les rayons forment un faisceau légèrement divergent qui revient sur lui-même. Entre C et M_2 le faisceau divergent forme un faisceau de rayons parallèles puisque C est au foyer de M_2 . Le milieu actif est donc traversé un grand nombre de fois.



4 - Les lasers à excimères

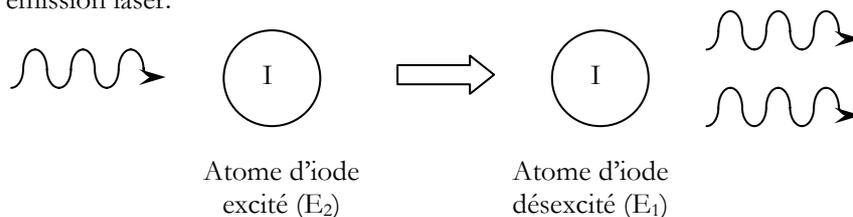
Les molécules d'excimère sont stables dans les états excités mais instables aux plus bas niveaux d'énergie. Ce sont donc des molécules idéales pour former un milieu actif, puisque l'inversion entre le niveau supérieur et le niveau inférieur se maintient automatiquement. Les lasers à excimères sont les meilleures sources dans le domaine ultraviolet.

exemple : Citons comme excimères ArF, KrF, XeF.

5 - Les lasers chimiques

Dans les lasers chimiques le pompage peut être produit par l'énergie libérée lors d'une réaction. Le système produit lui-même son énergie de pompage.

exemple : Le trifluoroiodométhane CF_3I . Sous l'action de la lumière, CF_3I donne des atomes d'iode à l'état excité E_2 . Des photons incidents provoquent le retour des atomes à état désexcité E_1 avec émission laser.



Existent aussi les lasers à semi-conducteurs, dont nous ne ferons qu'indiquer l'existence dans ce dossier.

IV Applications des lasers

Nous avons pu voir dans les chapitres précédents les différents avantages spécifiques aux lasers :

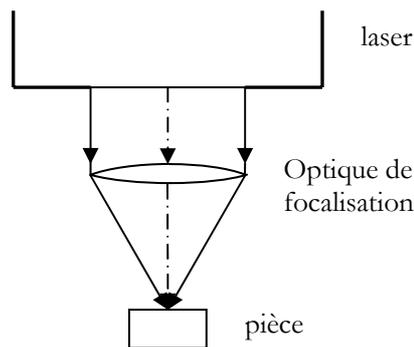
- grande directivité
- cohérence spatiale
- monochromaticité
- intensité sur de très petites surfaces
- concentration

D'une façon générale, on peut classer les applications des lasers en deux catégories suivant qu'elles utilisent soit le contenu énergétique du faisceau soit ses capacités à véhiculer de l'information.

1 - Applications énergétiques

• Fusion et soudure :

La concentration au foyer d'un système optique émise par un laser de grande puissance porte rapidement à sa température de fusion tout matériau qui s'y trouve placé. On parvient ainsi à fondre les corps les plus réfractaires (tungstène), ce qui peut donner lieu à une « micrométallurgie » avec par exemple le laser à rubis qui peut focaliser une puissance de 10^5 W/cm².



Fusion et soudure par laser

• Usinage et découpe :

Grâce à la précision et à la puissance d'un rayon laser on peut percer et découper les matériaux les plus variés. Les applications les plus intéressantes concernent les substances qui sont soit très dures soit au contraire très peu rigides, c'est à dire les catégories qui posent le plus de problèmes en usinage classique. On parvient ainsi à percer les diamants comme le rubis des montres ou à découper plusieurs couches de tissus.

• Vaporisation :

Si la durée de l'impulsion laser est très courte (quelques dizaines de nanosecondes), avec une énergie par impulsion de plusieurs joules et une intensité focalisée supérieur à 10^9 W/cm², l'échauffement est si rapide que le matériau irradié est instantanément vaporisé sur une profondeur assez faible. Il est dans ce cas possible de pratiquer l'ablation sélective de petites quantités de matière pour effectuer différents réglages sur les résistances ou sur les rotors de gyroscopes.

• **Chirurgie et microchirurgie :**

Le rayonnement focalisé d'un laser est également susceptible d'exercer une action profonde sur les tissus vivants. En effet il permet déjà de soigner des décollements de rétine en y faisant des minuscules points de soudures sans douleurs et sans anesthésie.

De même, l'emploi d'un bistouri laser constitué par le faisceau d'un laser à argon ou à gaz carbonique est maintenant courant, il présente certains avantages concernant la finesse de coupe, l'absence d'hémorragies et la rapidité de cicatrisation.

Une direction de recherche intéressante concerne la microchirurgie, la focalisation d'un faisceau à l'aide d'un microscope permet d'en apprendre beaucoup sur les propriétés de la matière vivantes, il permet aussi d'agir à très petite échelle sur par exemple les chromosomes.

• **Physique des plasmas :**

Les plasmas ou gaz ionisés, ce « quatrième état de la matière » constituent actuellement un sujet de recherche plein d'intérêt mais rendu très difficile par l'extrême complexité des phénomènes entrant en jeu. La mesure de l'absorption du rayonnement laser par un plasma apporte une contribution précieuse en permettant de déterminer des paramètres importants tel que la densité électronique et la température de celui-ci.

Le faisceau focalisé d'un laser de puissance permet également de créer un plasma dans des conditions bien définies ce qui conduit à la possibilité d'une nouvelle méthode de fusion nucléaire contrôlée.

• **Photochimie :**

L'importance des radicaux libres dans la cinématique des réactions chimiques à été reconnue depuis longtemps. On désigne sous ce nom des espèces atomiques ou moléculaires possédant un ou plusieurs électrons non appariés, qui apparaissent de façon transitoire au sein du milieu réactionnel. De tels radicaux libres peuvent être créés dans le mélange initial au moyen d'une irradiation lumineuse intense (généralement ultraviolette), amorçant ou entretenant ainsi la réaction.

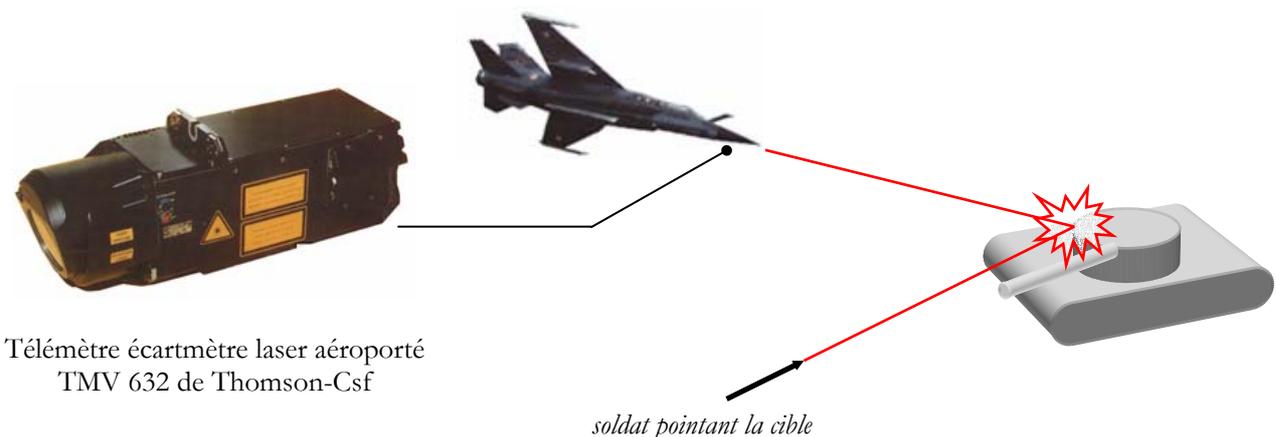
. On a pu alors étudier grâce au laser solide ou moléculaire l'évolution d'espèces dont l'existence bien que très fugitive (microseconde) conditionne néanmoins l'apparition du produit final. Ces études ont abouti notamment à la gravures photochimiques des circuits intégrés.

• **Transmission d'énergie à distance :**

Grâce à la grande puissance des lasers actuels (lasers à gaz CO₂, DF ou laser chimique à deutérium-fluor de 2 MW), il est désormais possible de détruire des cibles à plusieurs kilomètres ce qui peut être intéressant sur le plan militaire. Dans un autre domaine, un tel faisceau pourrait être utilisé pour transmettre de l'énergie d'un point à un autre, par exemple entre une station terrestre et un véhicule spatial.

exemple : Le TMW 632 de Thomson-Csf est utilisé pour détecter et identifier la tache laser sur les cibles éclairées au sol. Un réticule de visée, présenté en Tête Haute, permet au pilote de viser la cible. Le faisceau laser du télémètre est asservi à la position de l'écartomètre et permet de mesurer avec précision la distance.

(Caractéristiques : longueur d'onde : 1,06 μm, 20 km de portée, 530*170*190 mm)



2 - Applications au transport de l'information

• Alignements :

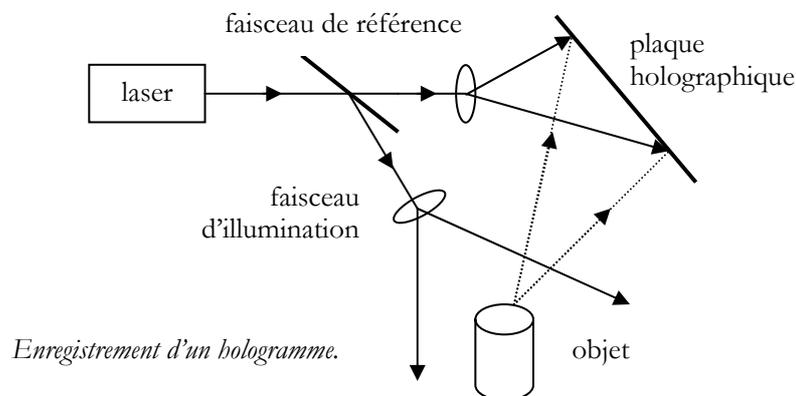
Il s'agit d'une application évidente directement inspirée par la grande directivité de l'émission laser. Par exemple le pinceau rouge et étroit émis par un laser à hélium-néon matérialise ainsi très commodément l'axe d'un tunnel à creuser. Plusieurs applications militaires rentrent dans la même catégorie comme le guidage laser des bombes de certains avions qui est d'ailleurs très précis (à l'arrivée de l'ordre de quelques mètres).

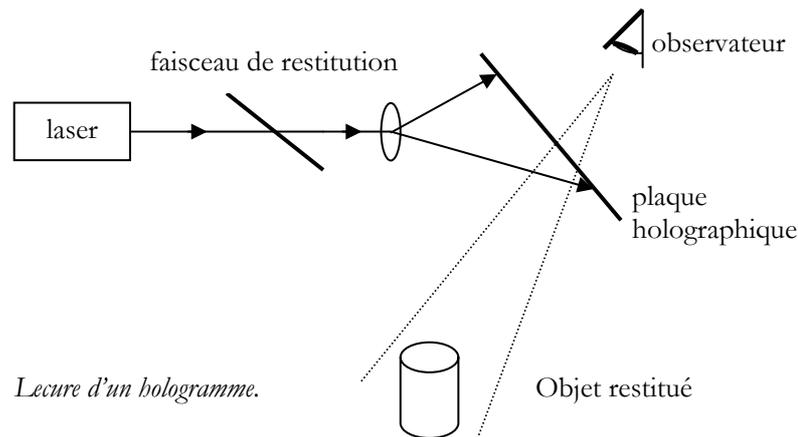
• Télécommunications :

Le laser peut aussi donner la possibilité de véhiculer des messages. Effectivement il est possible de transmettre par l'intermédiaire de son rayon des bandes passantes qui sont proportionnelles à la fréquence du rayonnement considéré (10^{12} Hz et plus, alors que le téléphone n'occupe que 3 kHz). Les capacités de modulation d'un signal laser sont énormes, le problème en pratique étant de transmettre ces données, pour ceci il faut faire passer le rayon à travers un fil de fibre optique ce qui pose encore beaucoup de problème pour des longues distances.

• Holographie :

Il s'agit là d'une technique nouvelle et intéressante d'enregistrement d'image à trois dimensions. Les distances de chaque point d'un objet pouvant être mesurées en prenant compte du déphasage de l'onde lumineuse diffusé par l'objet par rapport à l'onde de référence. Si la plaque holographique est éclairée par un faisceau laser de « restitution » ayant exactement la même orientation que le faisceau de référence, l'observateur verra apparaître une image virtuelle de l'objet à la place même qu'occupait celui-ci.





• **Spectroscopie :**

L'emploi d'un laser à hélium-néon, ou mieux à argon ionisé, comme source lumineuse dans les spectrographes à effet Raman utilisés en analyse chimique améliore considérablement leurs performances et est devenu chose courante. On peut diriger le faisceau d'un laser vers une nappe de brouillard suspecte et observer, au moyen d'un télescope, la lumière diffusée également par effet Raman ; l'étude spectrale de cette lumière permet alors la détection lointaine d'une éventuelle pollution atmosphérique.

• **Diffraction :**

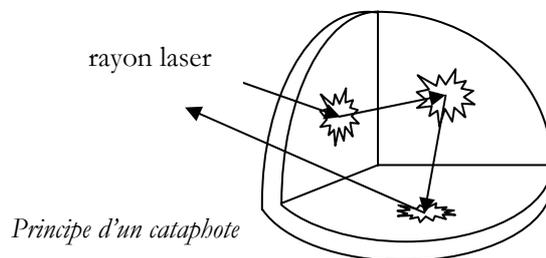
L'étude de la lumière diffusée par un ensemble de petits objets illuminés par un laser donne sur ceux-ci de nombreux renseignements tels que la taille, forme et concentration. Plusieurs appareils fondés sur ce principe sont actuellement utilisés : granulomètres (cimenteries), néphélomètres (dosages biologiques), cytomètres...

• **Mesure de grandes distances :**

Elle concerne les distances de plusieurs milliers de kilomètres. La mesure s'effectue alors en déterminant le temps τ mis par une impulsion laser très brève pour aller se réfléchir sur un obstacle et revenir :

$$L = 1/2 c \cdot \tau \quad \text{où } c \text{ est la vitesse de la lumière dans le vide.}$$

Un réflecteur placé sur la cible permet de renvoyer l'impulsion vers la terre : on utilise dans ce cas des cataphotes car elles réfléchissent les rayons lumineux exactement d'où ils viennent (rayon incident parallèle au rayon émis) notamment utilisé dans la mesure de la distance Terre-Lune.

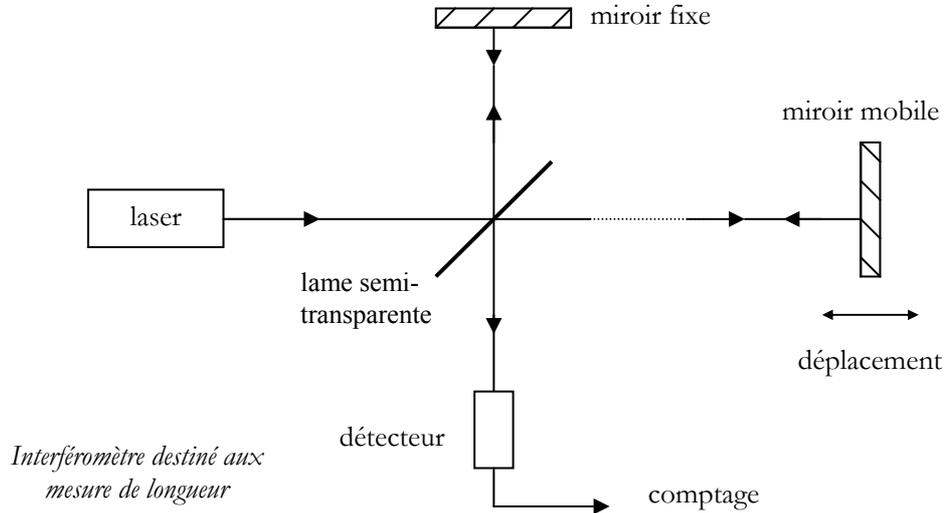


• **Mesure de moyennes distances :**

La méthode utilisée consiste à utiliser un laser modulé en amplitude (laser semi-conducteur) et à le diriger vers un réflecteur éloigné, alors la phase de modulation de l'onde d retour sera différente de l'onde d'aller et la valeur de la distance peut être déduite du déphasage correspondant (précision de 10^{-7} sur 30 km). La même mesure effectuée à deux longueurs d'onde différentes permet de déterminer les corrections dues à l'indice de l'air.

• **Mesure de petites distances :**

La mesure des longueurs inférieures à quelques dizaines de mètres est du domaine de l'interférométrie. Deux miroirs placés en regard constituent une cavité résonnante dont la longueur peut être déterminée par comptage des franges d'interférence obtenues en éclairant le dispositif au moyen d'un laser à haute stabilité. La précision ultime n'est théoriquement limitée que par les instabilités de longueur d'onde du laser source (10^{-12}).

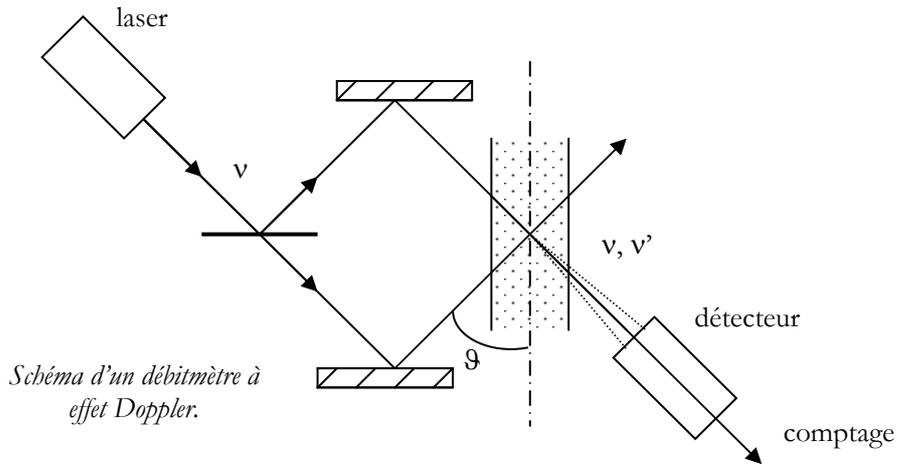


• **Vélocimétrie :**

Grâce à l'effet Doppler, en étudiant la diffusion de la lumière, il est possible de mesurer les vitesses d'écoulement d'un fluide, on le rencontre en aérodynamique, en médecine (observation non invasive du débit sanguin sous la peau). Un laser oscillant à la fréquence F éclaire une canalisation suivant l'angle ϑ . Les particules du fluide rediffusent la lumière à une fréquence différente. Suivant le même angle ϑ on observe une fréquence F' donnée par la relation :

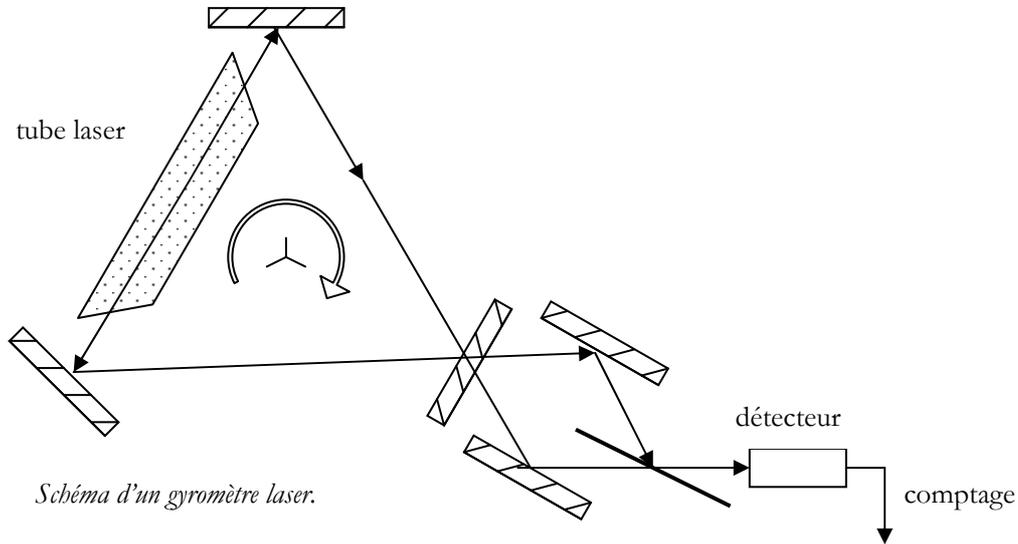
$$(v - v')/v = 2 \cdot \cos \vartheta \cdot v/V$$

où v est la vitesse des particules et V celle de la lumière dans le milieu. Un photodétecteur permet d'observer le battement $v - v'$ et d'en déduire v .



• **Gyrométrie :**

L'effet Doppler peut être également employé à la mesure des vitesses de rotation au moyen d'un montage appelé laser en anneau.



Quand le laser est immobile, les deux rayons sortant du tube laser ont la même fréquence de résonance. Cependant, si celui-ci est mis en rotation autour de son axe dans un sens déterminé, les ondes circulants dans le même sens vont voir leur fréquence diminuer par effet Doppler lors de la réflexion sur les miroirs, tandis que les ondes de sens contraire verront leur fréquence augmenter. En les superposant sur un photodétecteur, on observera une fréquence de battement N donnée par :

$$N = 4\Omega \cdot A / P \cdot \lambda$$

Où Ω est la vitesse de rotation, A l'aire de l'anneau, P son périmètre et λ la longueur d'onde du rayonnement. Cette application à une précision telle qu'elle permet de mettre en évidence la rotation terrestre.

Annexe

I Eléments de chimie

1 - Emission de la lumière par les corps portés à haute température

D'après la théorie ondulatoire, il existe en chaque point de l'espace où se propage la lumière une grandeur à variation périodique qui représente la vibration lumineuse. Fresnel, au début du XIX^e siècle, admet que l'espace est rempli d'un milieu spécial, l'éther, dont les vibrations constituent la lumière. Dans la théorie électromagnétique proposée par Maxwell en 1865, la lumière est due à la propagation simultanée d'un champ magnétique. C'est l'identité des valeurs de la vitesse de propagation de la lumière et des ondes électromagnétiques qui a conduit Maxwell à admettre que les ondes lumineuses sont des ondes électromagnétiques. Dès lors, la théorie électromagnétique constitue une base solide pour les phénomènes de l'optique physique. Mais la théorie électromagnétique n'explique pas tout. Différentes expériences, comme par exemple l'émission de la lumière par les corps portés à haute température, ont montré que l'aspect ondulatoire de la lumière devait être complété par un aspect corpusculaire.

Un corps porté à haute température devient lumineux : il émet un **spectre continu**, c'est à dire un spectre dans lequel l'énergie est émise de façon continue dans un large domaine de longueurs d'onde. Rayleigh et Jeans ont cherché à expliquer ce phénomène en partant de la théorie électromagnétique, mais l'accord avec l'expérience n'a pu se vérifier que pour les grandes longueurs d'onde.

C'est Planck qui réussit en 1900 à trouver une formule donnant des valeurs en parfaite concordance avec l'expérience. Pour obtenir ce résultat, Planck admet que les échanges d'énergies entre matière et rayonnement se font par quantités discrètes appelées **quanta**. Chaque quantum a une valeur $h \cdot \nu$ égale au produit de la fréquence ν du rayonnement émis par une constante universelle h (constante de Planck). Un peu plus tard, en 1905, Einstein introduit la notion de **quantum de lumière** ou **photon**. Parallèlement à son aspect ondulatoire, la lumière se présente donc aussi sous la forme de photons. A une onde électromagnétique de fréquence ν est associé un photon d'énergie :

$$E = h \cdot \nu$$

2 - Emission de la lumière par les gaz et les vapeurs

En 1913, la théorie des quanta remporte un grand succès grâce à N.Bohr, lequel explique l'origine des lois donnant les longueurs d'onde dans les **spectres de raies**.

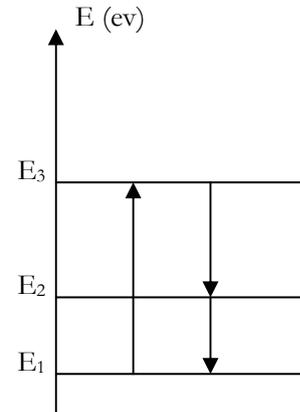
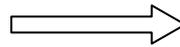
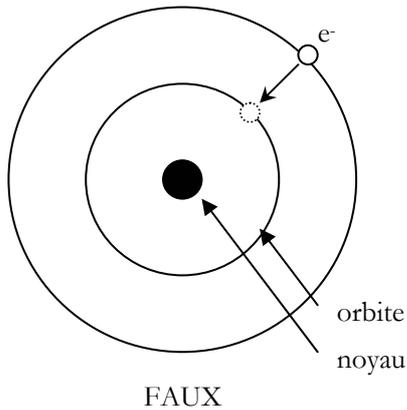
Les vapeurs, les gaz, traversés par un courant, peuvent émettre de la lumière. Les enseignes lumineuses, par exemple ; les tubes contiennent des gaz à basse pression qui sont excités par une différence de potentiel de quelques milliers de volts. Ces sources n'émettent en général de la lumière que sur des longueurs d'onde particulières : il y a émission d'un spectre de raies.

Pour expliquer les spectres de raies, Bohr a émis l'hypothèse fondamentale suivante : un atome ne peut exister que dans une suite discontinue d'**états stationnaires**. L'atome dans un état stationnaire n'émet aucun rayonnement. A ces états stationnaires correspondent des niveaux d'énergie E_1, E_2, \dots . Lorsque l'atome passe d'un niveau d'énergie E_2 à un niveau plus bas E_1 , il y a émission d'un photon $h \cdot \nu$ associé à un rayonnement de fréquence ν donnée par la relation :

$$E_2 - E_1 = h \cdot \nu$$

Dans la théorie de Bohr, on calcule les énergies E_1 et E_2 en supposant que les électrons décrivent des orbites circulaires autour du noyau. Pour l'atome d'hydrogène la concordance est parfaite entre les valeurs théoriques et expérimentales. Aujourd'hui, la notion de niveau d'orbite électronique est abandonnée par la mécanique quantique qui maintient et confirme la notion de niveau d'énergie.

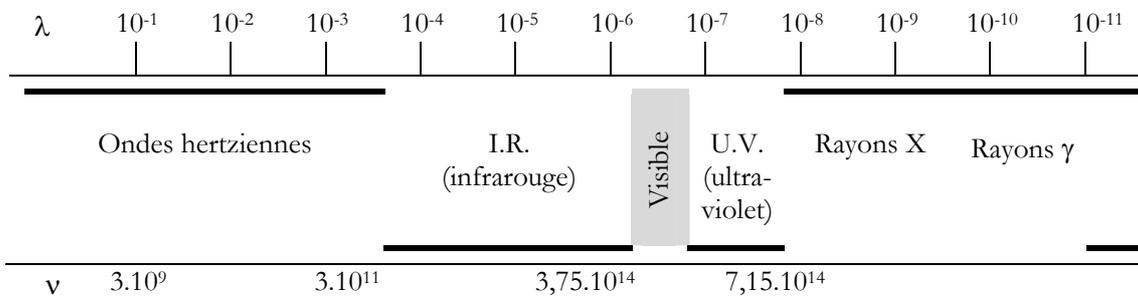
On représente donc les niveaux d'énergie d'un atome par des traits horizontaux, les flèches indiquent les transitions d'un niveau à un autre. L'état de plus basse énergie E_1 est l'état fondamental (l'état stable d'un atome). Lorsqu'un atome est porté à un niveau plus élevé E_2 par apport d'énergie (qui peut être d'origine cinétique ; chauffage, bombardement par des particules...) il ne reste qu'un temps très court dans cet état (10^{-8} s) puis il redescend au niveau fondamental ou dans un niveau intermédiaire en émettant un photon associé à une onde de fréquence correspondant à la transition des niveaux d'énergie. Le temps pendant lequel un atome reste dans un état excité est la **durée de vie** du niveau excité. Il existe des niveaux dont la durée de vie peut être de l'ordre de la seconde ou même plus. Ces niveaux d'énergie sont dits **métastables**. Ils jouent un rôle important dans l'émission du laser.



3 - Domaines de longueurs d'onde

Chaque source d'ondes électromagnétiques émet dans un domaine de longueurs d'onde, et chaque récepteur capte des signaux dans des domaines qui lui sont propres.

Longueurs d'onde des ondes électromagnétiques dans le vide (m)



Fréquence des ondes électromagnétiques (Hz)

- **Lumière visible**, l'œil détecte la lumière dont la longueur d'onde (dans le vide ou dans l'air) et la fréquence sont comprise entre :

$$0,4 \mu\text{m (violet)} < \lambda < 0,8 \mu\text{m (rouge)}$$

$$3,75 \cdot 10^{14} \text{ Hz (rouge)} < \nu < 7,5 \cdot 10^{14} \text{ Hz (violet)}$$

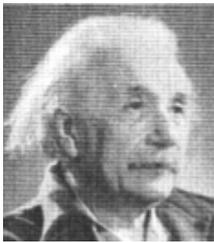
4 - Réalisation du premier laser

Le premier laser est construit par T.H. Maiman en 1960. Il utilise un barreau de rubis dont les atomes de chrome sont excités par décharge électrique. Chacune des extrémités du barreau étant munie d'un miroir, les photons émis se réfléchissant d'un miroir à l'autre, stimulant à leur tour d'autres émissions. Une petite portion non réfléchissante ménagée sur l'un des miroirs permet la sortie d'un rayon lumineux dont tous les photons ont précisément la même énergie et la même longueur d'onde.

II Biographies



Bohr (Niels), physicien danois (Copenhague 1885-1962). Après sa thèse de doctorat soutenue en 1911 à Copenhague, et dans laquelle se trouvaient déjà mises en évidence certaines des insuffisances de la théorie électromagnétique, Bohr entre en 1912 au laboratoire de Rutherford, à Manchester. En 1913, il élabore une théorie de la structure de l'atome rompant radicalement avec les conceptions classiques. Cette théorie, qui, par le biais d'un certain nombre de postulats, incorpore à la fois le modèle d'atome planétaire de Rutherford et la notion de quantum d'action introduite par Planck en 1900, rend compte de la stabilité de l'atome ainsi que de ses propriétés d'émission et d'absorption de rayonnement. En 1916, Bohr rentre à Copenhague, il est nommé directeur de l'institut de physique créée à son intention en 1920. A partir des années 30, Bohr se consacre principalement à l'étude du noyau.



Einstein (Albert), physicien américain d'origine allemande (Ulm 1879-Princeton 1955). Il établit, à partir de l'étude de l'effet photoélectrique et des travaux de Planck sur les quant d'énergie, l'existence de ce que l'on appellera plus tard, les « photons ». Il est à l'origine de la théorie quantique. Il expose dans un style d'une concision étonnante, l'une des découvertes les plus importantes de la physique du début du siècle : la relativité restreinte. Einstein développe l'idée nouvelle de l'équivalence entre masse et énergie ; c'est là que se trouve la fameuse formule $E = m.c^2$. Bien que ses mémoires passent inaperçus l'année de leur publication, ils suscitent l'intérêt des plus grands physiciens, en particulier de Planck, de Lorentz et de Minkowski. Très vite, Einstein devient une figure marquante de la communauté scientifique et des différents congrès où se discutent ses idées de la physique postclassique. Professeur à l'institut Kaiser-Wilhelm en 1912. (prix Nobel de physique 1921.)



Planck (Max Karl Ernst Ludwig), physicien allemand (Kiel 1858 – Göttingen 1947). Il fut professeur à l'université de Kiel en 1885. En 1897, il publie un manuel de thermodynamique qui servira pendant plus de trente ans de texte de référence. Professeur à l'université de Berlin en 1889, il entreprend l'étude des conditions d'équilibre thermique du rayonnement électromagnétique (rayonnement du « corps noir »), phénomène que la mécanique statistique classique était impuissante à expliquer. Planck en vient alors à émettre l'hypothèse qui porte son nom et selon laquelle les échanges d'énergie entre le rayonnement qu'elles enferment ne peuvent s'effectuer que de façon discontinue, par grains d'énergie. En 1905, Planck reconnaîtra rapidement l'importance des idées d'Einstein sur la quantification du rayonnement électromagnétique. Il fera beaucoup pour la carrière d'Einstein, comme, de façon générale, pour l'organisation et le développement de la physique en Allemagne. (prix Nobel de physique 1918.)



Townes (Charles Hard), physicien américain (Greenville 1915). Chercheur au laboratoire de la Bell Telephone Company de 1939 à 1947, où il met au point des méthodes de bombardement au radar. Professeur à l'université de Columbia (1948), Directeur scientifique de l'Institut de technologie du Massachusetts en 1961. Townes effectue d'abord des recherches spectroscopiques sur les ondes ultracourtes et publie en 1955, en collaboration avec son beau-frère Schawlow, « Microwave Spectroscopy ». A partir de 1951, il s'est attaché aux calculs théoriques sur l'émission stimulée. En 1954 il réalise la première émission maser, en utilisant des molécules de gaz ammoniac. (prix Nobel de physique 1964.)

Sources : « Les lasers » ; Que sais-je ? (F. Hartmann) - « L'optique moderne et ses applications depuis l'apparition du laser » ; Hachette (M. Françon) - « Les lasers ; principe et fonctionnement » (R. Dandliker) - « Les lasers et leurs applications » (A. Orszag) - « Introduction aux lasers et à l'optique quantique » ; Ellipses (G. Grynberg, A. Aspect, C. Fabre) - « Optique ; cours de physique générale » ; Masseur (G. Bruhat) - « Grand dictionnaire encyclopédique » ; Larousse - Documentation Thomson-Csf Opttronique.