

Comment fonctionne un laser?

Alain Haché

Département de physique et d'astronomie

Université de Moncton, Canada

© www.unregardscientifique.com

À première vue, le laser est un instrument produisant un rayon lumineux concentré et parfois intense. Bien que la puissance et la concentration du laser soient ses propriétés les plus connues, c'est surtout la pureté de sa lumière qui lui donne son importance technologique. Cette lumière est pratiquement d'une seule couleur ou, pour utiliser un langage de physicien, *monochromatique*.

Pour vous donner une idée de la pureté de cette lumière, prenez par exemple le laser HeNe souvent utilisé dans nos écoles. Basé sur un mélange gazeux d'hélium et de néon (d'où son nom), il donne une lumière rouge qui ne dévie que de 0.0003% par rapport à la longueur d'onde centrale, elle-même située autour de 633 nanomètres¹. Certains lasers stabilisés donnent une lumière encore plus pure, mais ils sont évidemment plus coûteux.

Afin de comprendre comment fonctionne le laser, il est instructif de faire un petit exercice : essayons d'imaginer un dispositif qui produirait une couleur aussi pure que le laser, mais avec des pièces plus simples. La Figure 1 montre un 'laser' basé sur une ampoule incandescente ordinaire qui émet de la lumière blanche. En utilisant un filtre dit 'passe-bande' qui ne laisse passer qu'une gamme très étroite de couleurs, on pourrait obtenir un faisceau lumineux aussi pur que celui du laser HeNe. C'est vrai qu'en pratique ce serait bien difficile trouver un tel filtre, mais ce n'est pas impossible.

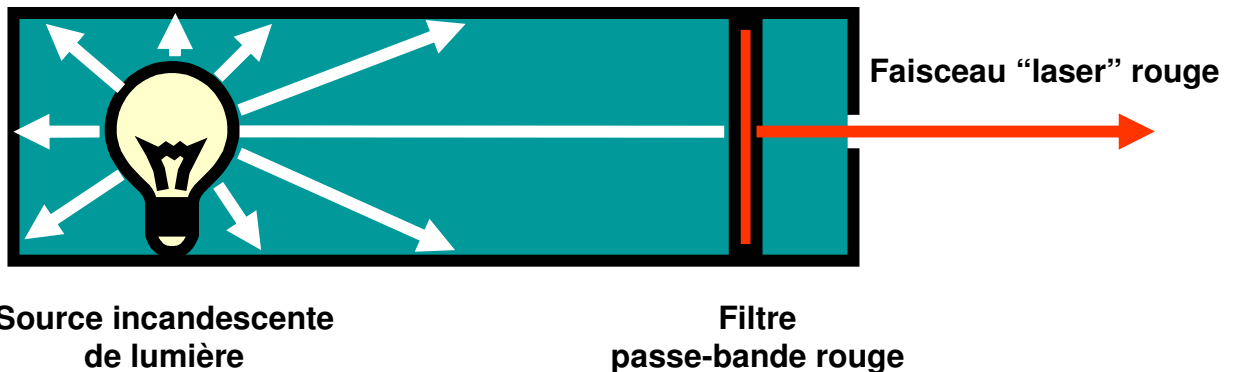


Figure 1. Un 'laser' utilisant une ampoule ordinaire comme source et un filtre pour produire un faisceau lumineux monochromatique.

¹ Le laser HeNe peut aussi émettre dans l'infrarouge, l'orange et le vert, mais la version rouge est la plus courante.

Ce 'laser' artisanal a plusieurs limitations, cependant.

D'abord, la portion lumière de l'ampoule qui traverserait le filtre serait très petite. À partir des 100 Watts consommés par une ampoule typique, seulement 5 Watts de lumière blanche est émis, le reste étant de la radiation invisible (de la chaleur, par exemple). De cette lumière blanche, environ 20 microwatts ou 0.00002 Watts de lumière se trouve à l'intérieur de la bande passante du filtre. Et puisque l'ampoule émet sa lumière dans toutes les directions à la fois, seulement une petite fraction de cette puissance sortirait par le trou. En supposant que l'on réussisse tout de même à diriger la moitié de la lumière de l'ampoule vers le trou, on aurait alors un 'laser' de 10 microwatts. Pas très puissant.

Un second problème : le rayon sortant ne serait pas directionnel ou concentré comme celui d'un vrai laser. Si vous prenez un laser HeNe avec un faisceau collimaté (parallèle) de 1cm de diamètre et que vous le pointez vers un édifice situé à 1 km de vous, le faisceau aura un diamètre d'environ 10 cm sur l'édifice. Cet éparpillement inévitable de la lumière est causé par un phénomène appelé *diffraction* en optique. Par contraste, on peut estimer que notre 'laser à ampoule' produirait une tache rouge d'environ 20 mètres de diamètre.² Pourquoi? C'est que, dans ce type de design, la divergence du faisceau est déterminée par la taille du trou et sa distance de l'ampoule. Pour avoir un faisceau aussi directionnel que celui du laser HeNe, il faudrait placer un trou de 1 cm de diamètre à plus de 100 mètres de l'ampoule -- et bien sûr trouver une boîte aussi longue pour inclure le tout. Le problème, c'est qu'avec trou placé aussi loin de la source, la lumière sortante serait de l'ordre du femtowatt (ou 10^{-15} Watts). C'est de quoi faire rire un moustique.

Enfin, il y a un troisième problème plus fondamental. Bien que de couleur aussi pure qu'un laser, notre faisceau ne pourrait pas interférer avec un autre faisceau similaire car il lui manque une propriété additionnelle : la *cohérence*. Pour que deux ondes interfèrent, elles doivent être reliées par leur phase³. Or dans l'ampoule, la lumière est émise aléatoirement par différents atomes à différents moments, et donc il n'y a aucune relation de phase fixe entre eux. Le résultat global est une lumière qui ne peut pas être décrite simplement comme une onde sinusoïdale, donc incohérente. Oublions donc l'holographie et toute une panoplie d'autres applications pour notre 'laser à ampoule'.

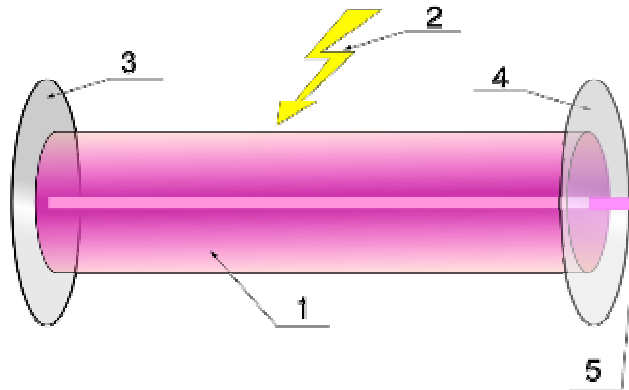
Notre laser de la Figure 1 fait donc piètre figure face au vrai laser qui, lui, dans des dimensions très compactes, peut fournir un beau rayon cohérent de plusieurs Watts de puissance (si l'on suppose 100 W d'alimentation). Comment celui-ci peut-il produire un aussi beau faisceau avec autant de puissance? C'est qu'au cœur du laser se trouve un processus de création de la lumière qui fondamentalement diffère de celui de notre ampoule : l'*émission stimulée*. Contrairement à l'ampoule, les petits paquets de lumière

² On obtient ce résultat en supposant que la boîte du laser a une longueur de 50 cm, que le trou a un diamètre de 1cm, et que la lampe est de taille très réduite – pratiquement un point. C'est le meilleur scénario pour minimiser la divergence du faisceau.

³ Une onde vibre en effectuant continuellement le même cycle; la *phase* est le stage du cycle où se trouve l'onde à un instant donné.

(qu'on appelle photons) sont produits par le passage de d'autres photons près d'un atome. Un atome qui se trouve dans un état excité peut être 'chatouillé' et incité à émettre un second photon qui est pratiquement un clone du premier : même couleur, même phase, même direction, même polarisation, etc. C'est un processus quantique que le laser exploite à fond, à un point tel que *tous* les photons qui sortent par le faisceau sont identiques! Le rayon laser idéal est donc une multitude de photons identiques qui se comportent comme un seul gros photon, d'où la cohérence.

La figure suivante montre le principe de fonctionnement du laser.



Tout laser possède 3 parties essentielles: A) un milieu amplifiant (1), B) une cavité pour que la lumière fasse un va-et-vient (les miroirs 3 et 4) et C) une pompe qui alimente le milieu amplifiant (2). Ce milieu amplifiant est constitué d'atomes ou molécules excités, et qui peuvent donc émettre des photons par émission stimulée. La pompe maintient cette excitation à l'aide, comme c'est le cas du laser HeNe, d'une décharge électrique. Les miroirs de la cavité font rebondir les photons produits, qui peuvent ainsi stimuler la création de d'autres photons identiques.

Un détail : le miroir 4 semi transparent. Il laisse typiquement passer de 1 à 10 % des photons (ou ~2% dans le cas du laser HeNe), ceux qui deviennent le faisceau que l'on voit sortir. Puisque ce n'est qu'une toute petite fraction de la lumière qui s'échappe du laser, la lumière à l'intérieur du laser est bien plus intense que celle du rayon qui sort. (Notez qu'il n'existe pas de 'trou' pour faire sortir le faisceau laser, seulement un miroir semi transparent.)