



La lumière laser

Lucile Julien

Professeure émérite

Université Pierre et Marie Curie - Laboratoire Kastler Brossel

Une lumière différente

Nous distinguons du premier coup d'œil la lumière émise par un laser de la lumière émise par une lampe ordinaire, qu'il s'agisse d'une lampe à incandescence ou d'une lampe à décharge. En effet le laser délivre un faisceau fin et directif, souvent monochromatique, c'est-à-dire d'une couleur pure. Au contraire, les lampes émettent de la lumière dans toutes les directions et cette lumière est en général blanche, composée de nombreuses couleurs. C'est bien ce qu'on attend d'une lampe : éclairer largement et fournir de la lumière qui peut être diffusée par les surfaces éclairées, quelle que soit leur couleur. Les lasers ne sont pas utiles pour l'éclairage, mais ils ont bien d'autres applications.

Comme la lumière ordinaire, la lumière laser peut être décrite soit comme un flux de photons, des particules transportant l'énergie lumineuse, soit comme une onde électromagnétique, c'est-à-dire un champ électrique et un champ magnétique oscillants tous deux à une fréquence f et couplés entre eux. Ces descriptions sont l'une et l'autre pertinentes et confirmées par l'expérience. Elles sont complémentaires entre elles : l'énergie des photons est donnée par hf ou h est la constante de Planck, et les photons comme l'onde se propagent dans le vide à la vitesse de la lumière c . La longueur d'onde est donnée par $\lambda = c/v$. Elle est comprise entre 400 et 800 nm environ dans le domaine visible. Dans la lumière laser, les photons sont identiques entre eux. On dit qu'ils sont dans le même mode du champ électromagnétique : ils ont alors même direction de propagation et même fréquence. La lumière laser est concentrée et ordonnée.

De la lumière concentrée

Comme un faisceau laser a une direction bien définie et une extension latérale limitée, il peut matérialiser une ligne droite. Il faut pour cela qu'il se propage dans un milieu transparent et homogène, ce qui est assez



Figure 1 :

Faisceau laser vert entre la coupole de l'Observatoire de Paris et Montmartre en 2005
(photo Nicolas Treps)

bien vérifié pour l'air ambiant (figure 1). C'est ainsi qu'on utilise des faisceaux lasers sur les chantiers comme outil d'alignement, et même – associé à un niveau d'eau ou à un fil à plomb – comme référence horizontale ou verticale sur une longue distance.

Une autre façon de transporter la lumière laser est d'utiliser une fibre optique, un fil en verre ou en plastique, de faible diamètre appelé *cœur*, entourée d'une gaine d'indice légèrement inférieur. En raison du phénomène de réflexion totale à l'interface entre le cœur et la gaine, la lumière se propage dans le cœur en y restant confinée (figure 2). Le diamètre de la fibre est de l'ordre de quelques micromètres : seul un faisceau de lumière laser peut donc être injecté dans la fibre. Même si la fibre est courbée, le faisceau est transporté jusqu'à l'autre extrémité de la fibre. Avec des fibres actuelles en silice et un faisceau laser dans l'infrarouge à 1 550 nm (longueur d'onde utilisée dans les télécommunications) l'atténuation est de l'ordre d'un facteur 100 sur une centaine de km. En modulant l'intensité du faisceau lumineux, on peut transmettre des données par fibre

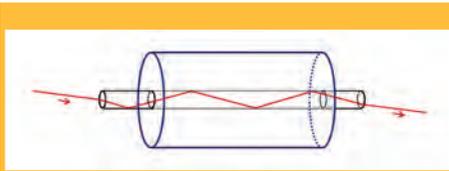


Figure 2 :

Principe d'une fibre optique. Le cœur de la fibre (en noir) a un indice légèrement supérieur à celui de la gaine (en bleu). Par réflexion totale, le faisceau laser (en rouge) est confiné dans le cœur et se propage d'une extrémité à l'autre de la fibre.

optique. Le signal est codé sous forme numérique (avec des 0 et des 1), et selon les cas est utilisé pour les communications téléphoniques ou l'échange de données sur le réseau Internet.

Les fibres optiques, qui ont l'avantage de transporter sous un faible volume plus de données avec moins de pertes, remplacent ainsi progressivement les câbles électriques.

Si elle peut transporter de l'information, la lumière laser se contente parfois simplement de transporter de l'énergie sous forme concentrée. Les faisceaux lasers sont de plus en plus répandus dans l'industrie pour découper, percer, souder, usiner des matériaux de toutes sortes. Pour la même raison, et souvent à l'aide de fibres optiques, les lasers ont maintenant de très nombreuses applications médicales : ils servent couramment de bistouris pour la chirurgie interne, ou bien en dermatologie ou en ophtalmologie. La profondeur de pénétration du faisceau dans les tissus et son effet dépendent des propriétés du laser, en particulier de sa longueur d'onde. Pour corriger la myopie, on utilise par exemple un laser infrarouge à impulsions très courtes pour découper un volet de cornée, et un laser ultraviolet pour rectifier la courbure de la cornée sous ce volet.

Le laser : un oscillateur optique

Le mot laser est un acronyme qui signifie *amplification de lumière par émission stimulée de rayonnement* (en anglais *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*). Bien que le processus d'émission stimulée de rayonnement ait été découvert par Albert Einstein en 1917, le premier laser n'a fonctionné qu'en 1960 aux Etats-Unis. Depuis, des lasers de toutes sortes ont été réalisés, avec des longueurs d'onde, des puissances et des dimensions très variées : certains lasers ont pour dimension le diamètre d'un cheveu, d'autres, des centaines de mètres !

Tous fonctionnent selon le même principe et contiennent un milieu amplificateur placé dans une cavité optique. Le milieu amplificateur est constitué d'atomes, d'ions ou de molécules, qui peuvent être sous forme gazeuse, dans une solution liquide ou dans un solide. Dans les lasers à semi-conducteurs, appelés *diodes lasers* qui sont actuellement les lasers les plus répandus, ce sont les électrons et les trous (lacunes d'électrons au sein du solide semi-conducteur) qui, groupés par paires, jouent le rôle d'atomes. Le milieu est pompé, c'est-à-dire qu'on lui fournit de l'énergie pour porter les atomes dans un état excité. Cette énergie peut être d'origine électrique, chimique, optique, ou autre. Un atome excité d'énergie E_2 peut alors se désexciter vers un autre état d'énergie E_1 , en émettant un photon à la fréquence f telle que $hf = E_2 - E_1$ (c'est la *condition de résonance*, qui découle de la conservation de l'énergie quand l'atome émet le photon).

Ce qu' Einstein a découvert, c'est que cette émission de lumière pouvait être provoquée par des photons incidents de fréquence f : la lumière émise a alors les mêmes propriétés que la lumière incidente et cette émission stimulée est à l'origine d'une amplification de l'onde lumineuse par le milieu (figure 3).

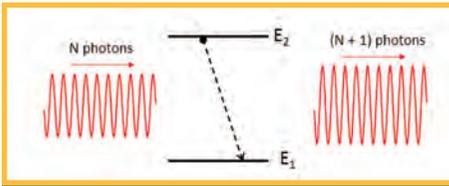


Figure 3 :

Sous l'effet de l'émission stimulée, un atome se désexcite en émettant de la lumière ayant les mêmes propriétés que la lumière incidente.

Celle-ci se trouve amplifiée lors de la traversée du milieu.

Pour réaliser un laser, on place le milieu amplificateur dans une cavité optique. La plus simple est la cavité Fabry–Perot constituée de deux miroirs se faisant face (figure 4). La lumière fait alors des allers-retours entre les deux miroirs, en étant amplifiée à chaque passage. Si les bonnes conditions d'alignement de la cavité, de réflectivité des miroirs et

d'efficacité du pompage sont remplies, l'amplificateur se transforme de lui-même en oscillateur, comme il arrive à certains dispositifs électroniques à fort gain ou dans l'effet Larsen.

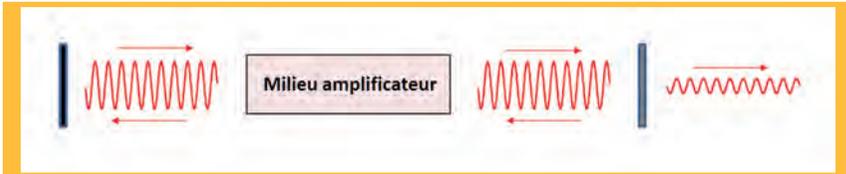


Figure 4 :

Le milieu amplificateur contenant les atomes est placé entre deux miroirs, dans une cavité Fabry–Perot. La lumière fait des allers-retours entre les deux miroirs et est amplifiée à chaque passage. Si le gain de l'amplification est suffisant, l'ensemble devient un oscillateur optique. Le faisceau laser est émis par le miroir de sortie, dont la réflectivité n'est pas totale.

On obtient alors une source de lumière : un faisceau laser est émis par l'un des miroirs, le *miroir de sortie* qu'on a volontairement choisi avec une petite transmission. La direction du faisceau émis est imposée par l'orientation des miroirs, et sa fréquence par le choix du milieu amplificateur et les propriétés du miroir et de la cavité.

De la lumière pour mesurer

La sélectivité en fréquence d'un faisceau laser est ce qu'on appelle sa *pureté spectrale*. Elle a de nombreuses applications, par exemple l'holographie, l'interférométrie, la spectroscopie, la détection de traces de polluants, etc.

En outre, la mise au point de lasers délivrant des impulsions courtes a permis le développement de dispositifs de mesure de distances et de vitesses de plus en plus répandus : télémètres lasers pour le métrage dans les bâtiments, jumelles lasers pour les contrôles de vitesses sur la route.

Ces appareils émettent des impulsions régulièrement espacées, en général dans l'infrarouge, et mesurent le temps mis par une impulsion pour faire un aller-retour en se réfléchissant sur un mur ou une plaque minéralogique. La vitesse est déterminée par une mesure répétée de distance.

De la même façon, on mesure la distance Terre–Lune avec des impulsions de courte durée émises à partir d'un télescope, comme à l'Observatoire de la Côte d'Azur. Les impulsions sont réfléchies sur des réflecteurs qui ont été disposés sur la Lune lors de missions spatiales. Un aller - retour dure environ 2 s (la distance Terre–Lune est d'environ 384 000 km) et, bien que très peu de photons émis soient reçus après un aller-retour, il en reste suffisamment pour déterminer la distance entre l'émetteur et le réflecteur avec une précision de quelques millimètres. On observe ainsi que la Lune s'éloigne de la Terre de 3,8 cm par an...

C'est aussi leur pureté spectrale qui a permis dans les années 1970 de mesurer simultanément la fréquence et la longueur d'onde de différents lasers et d'en déduire la vitesse de la lumière, qui est le produit des deux. En 1983, il a été décidé de remplacer la définition du mètre – qui s'appuyait auparavant sur la longueur d'onde d'une raie orangée de la lampe à krypton – par la vitesse parcourue par la lumière dans le vide en $1/299\,792\,458^{\text{ème}}$ de seconde. La vitesse c a donc maintenant pour valeur exacte : $c = 299\,792\,458$ m/s. Ici encore, les lasers ont de bien meilleures performances que les lampes, non seulement comme instruments de mesure, mais aussi comme références pour la métrologie.

L. J.

Pour en savoir plus :

Nicolas TREPS et Fabien BRETENAKER, *Les lasers*, EDP Sciences (2010)

http://www.dailymotion.com/playlist/x31pmk_CNRS_physique/2#video=x1joo13

<https://geoazur.oca.eu/spip.php?rubrique201>

<http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/dossierthematiques/laser/>

<http://videothèque.cnrs.fr/doc=2226>