

L'épopée des lasers

*HERVÉ BOISSON
Médiateur scientifique
au département de physique
du Palais de la découverte*

De la lecture des codes barres au guidage des missiles, de l'ambitieux projet de fusion nucléaire appelé laser mégajoule au lecteur de DVD, le champ des applications lasers ne cesse de croître. Cette diversité est favorisée par l'étendue de la gamme des longueurs d'onde⁽¹⁾ laser aujourd'hui disponibles ; elle s'étend de l'infrarouge lointain jusqu'aux rayons X avec des puissances allant du milliwatt à plusieurs millions de watts. Une telle richesse est nécessaire pour répondre notamment aux demandes des chercheurs et des ingénieurs qui souhaitent exploiter les potentialités exceptionnelles de ce rayonnement dans leur domaine respectif.

C'est à une présentation de ce panorama que nous vous convions. Mais avant de le parcourir, arrêtons-nous quelques instants sur l'origine de cette histoire. Elle nous donnera des clefs pour mieux appréhender ce qu'est un laser et la lumière qu'il émet.

(1) La longueur d'onde est simplement la distance séparant le sommet de deux vagues consécutives d'une onde régulière. Elle est reliée à la fréquence f et à la célérité v (vitesse) de l'onde par la relation mathématique $\lambda = v/f$. Ainsi, plus la fréquence est grande, plus la longueur d'onde est petite.

Visuel non disponible sur la version internet,
mais disponible sur l'édition papier

FIGURE 1

Charles Hard Townes (1915-),
prix Nobel de physique 1964.
© The Nobel Foundation.

La naissance du laser ou l'histoire d'une obstination

Il aura fallu que Charles Townes (1915-), physicien spécialisé en spectroscopie moléculaire à l'université de Columbia (fig. 1), fasse preuve d'une ténacité sans faille pour qu'il parvienne, en 1954, au but qu'il s'était fixé au cours de l'année 1951. En effet, c'est contre le scepticisme affiché du directeur du département physique comme celui de ses collègues et, plus tard, contre le jugement définitif de sommités telles que Niels Bohr (1885-1962) et John von Neuman (1903-1957) sur le caractère chimérique de son projet qu'il œuvrera avec sérénité.

Quel était le sujet si controversé de ses recherches ? Produire une émission d'ondes électromagnétiques intense et d'une très grande pureté spectrale pouvant interagir avec les molécules. Cela impliquait que la longueur d'onde de ce rayonnement devait être inférieure au millimètre (car nombreuses sont les molécules mises en résonance par ces petites longueurs d'ondes).

Voilà déjà un point soulevé par les sceptiques. À l'époque, la production de longueurs d'ondes plus petites que celles des ondes radar semblait totalement hors de portée. (Rappelons que les ondes radar ont la même nature électromagnétique que la lumière avec des longueurs d'onde quelques dizaines de centimètres.) La production de ces dernières

L'émission stimulée

L'article qu'Einstein publia en 1917 était consacré aux échanges énergétiques des atomes et des molécules avec leur environnement. Il s'inscrivait dans la continuité de ses travaux antérieurs et de ceux de Max Planck qui avaient établi la discontinuité énergétique de ces échanges. Cette discontinuité témoigne de l'existence, pour tout atome ou molécule, d'un nombre limité d'états énergétiques qui correspond à autant de *niveaux d'énergie*. Aussi, toute acquisition (ou la perte) d'énergie se traduit par un saut d'un niveau d'énergie vers un autre (fig. I). L'*émission stimulée* précise qu'un atome, dans un état particulier (appelé état excité), recevant un photon, dont l'énergie est égale à la différence entre le niveau d'énergie correspondant à cet *état excité* et un autre niveau inférieur, devait émettre un photon en tout point comparable au premier ; plus précisément, ces deux photons se propageront dans la même direction avec une longueur d'onde et une phase identiques (fig. II). Ce processus d'émission stimulée, s'il est entretenu, peut conduire à une réaction en chaîne. En effet, ces deux photons à leur tour

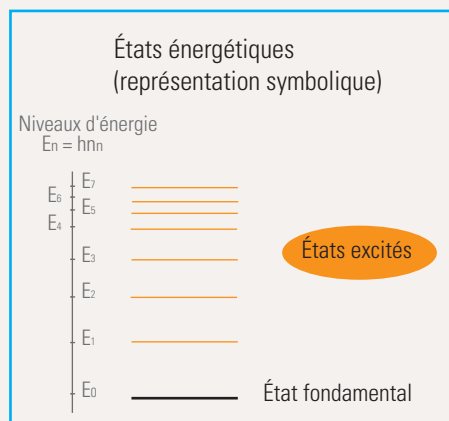


FIGURE I

Niveaux d'énergie représentant les états
énergétiques possibles d'un atome particulier.
On passe d'un niveau n à un niveau m par un saut
égal à $E_m - E_n$ (sachant que $E_m = h\nu_m$
et $E_n = h\nu_n$).

pourraient rencontrer, si les circonstances le permettaient, deux autres atomes excités comme l'était le premier, et les quatre (deux plus deux) photons résultants rencontrer ensuite quatre autres atomes pareillement excités. Ce processus doit conduire à l'émission très intense d'un rayonnement parfaitement ordonné car tous les photons produits ont le même rapport de phase entre eux ; ce rayonnement est dit *cohérent*. Cette émission stimulée se distingue de

l'*émission spontanée* dans laquelle l'atome excité retourne spontanément à un état d'énergie inférieur en émettant un photon dont l'énergie est égale à la différence entre les deux niveaux (fig. III). Les rayonnements des sources dans lesquelles l'émission spontanée est fortement majoritaire sont incohérents à cause du caractère temporaire aléatoire de cette émission photonique. Les sources à incandescence en sont un exemple caractéristique.

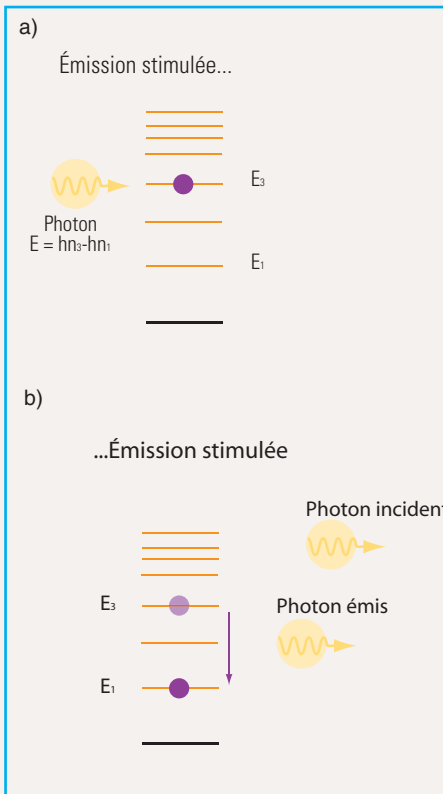


FIGURE II

a) Sous l'action d'un photon d'énergie $h\nu_3 - h\nu_1$, l'atome va émettre un autre photon identique au premier en énergie et en phase.
 b) Le photon incident et le photon émis sont en phase, ont la même énergie $E = h\nu_3 - h\nu_1$ et se déplacent dans la même direction.

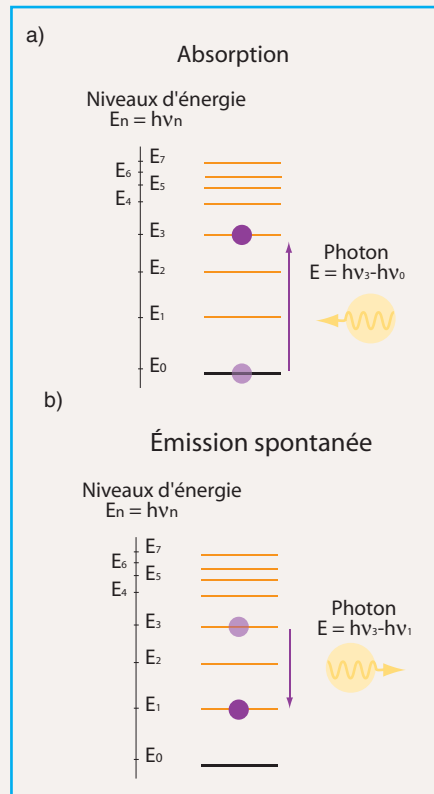


FIGURE III

a) Représentation symbolique d'un changement énergétique par un saut d'un niveau d'énergie vers un autre niveau. L'atome qui absorbe un photon d'énergie $E = h\nu_3 - h\nu_0$ passe du niveau fondamental E_0 au niveau d'énergie E_3 .
 b) Un atome émet un paquet d'énergie (un photon) égal à $h\nu_3 - h\nu_0$.

au cours de la Seconde Guerre mondiale avait été l'aboutissement d'une intense recherche.

Townes pense néanmoins y parvenir en s'appuyant sur un article qu'Albert Einstein (1879-1955) publia en 1917, et dans lequel il postula l'existence d'un processus d'émission d'énergie électromagnétique tout à fait particulier, l'*émission stimulée* (se reporter à l'encadré du même nom). Ce dernier doit permettre de faire produire à un atome ou une molécule des photons⁽²⁾ de longueurs d'onde déterminées. Ce libre choix doit conduire à la pureté spectrale recherchée.

Là, les sceptiques interviennent une nouvelle fois. L'état excité qui est à l'origine de l'émission stimulée n'est pas l'état le plus probable. Dans une situation d'équilibre thermique, le nombre d'atomes non excités (c'est-à-dire dans l'état d'énergie minimale ou *état fondamental*) prédomine fortement. La rencontre entre un atome dans cet état et un photon ayant une énergie correspondant à celle d'un niveau d'énergie de cet atome conduit à l'absorption du photon par l'atome. Ainsi l'excédant d'atomes dans leur état fondamental doit conduire à la prédominance de l'absorption sur l'émission et donc à l'impossibilité d'une émission intense par ce processus.

Townes estime pourtant qu'en sélectionnant uniquement les atomes excités le problème devait être résolu. Si, de plus, ils étaient injectés dans une cavité aux parois réfléchissantes qu'ils quittaient ensuite, les photons produits, réfléchis par les parois, rencontreraient d'autres atomes excités. C'est en utilisant la molécule d'ammoniaque plutôt que des atomes qu'il parviendra à produire l'émission d'une onde électromagnétique d'une longueur d'onde très pure de 1,25 centimètre. Il appellera Maser son dispositif (acronyme de *Microwave amplification by stimulated emission of radiation*).

(2) Le photon, dont existence fut prédite en 1905 par Einstein, représente un paquet d'énergie de nature électromagnétique. Toute onde électromagnétique (la lumière par exemple) est en fait constituée de photons.

Ce succès l'encourage à persévérer dans la production de longueurs d'onde plus courtes. C'est à celles du visible qu'il ambitionne maintenant de s'attaquer. Et malgré la réussite du Maser, les appréciations sur cette recherche sont toujours aussi peu chaleureuses ! Ses détracteurs devront pourtant déposer les armes et rendre hommage à son talent en 1958, lorsqu'il publia avec Arthur L. Schawlow l'article qui est considéré comme l'acte de naissance du Maser optique comme Townes aimait l'appeler et qui sera par la suite nommé Laser (acronyme de *Light amplification by stimulated emission of radiation*).

Cette publication décrit les principaux éléments composant un laser. Qu'y trouve-t-on ? *Un milieu amplificateur, deux miroirs se faisant face et une source d'énergie* se reporter à l'encadré *Éléments constituant un laser*.

Suivant les préceptes de l'article, deux années après sa rédaction, le premier laser sera conçu. On le doit à Théodore Maiman (1927-) qui utilisera comme milieu amplificateur des ions chrome Cr^{3+} remplaçant les ions aluminium Al^{3+} dans un cristal de rubis en forme de barreau. Les deux faces parallèles de ce barreau furent polies et recouvertes d'un dépôt semi-réfléchissant. Il émet des impulsions brèves de 0,694 μm de longueur d'onde (couleur rouge foncé). L'énergie du pompage est apportée par la lumière d'un tube à éclairs entourant le barreau.

Les deux années suivantes seront tout aussi fructueuses. Ali Javan (1928-) réalise, en 1961, le premier laser à émission continue. Son milieu amplificateur est le gaz néon produisant une longueur d'onde de 0,633 μm (couleur rouge ; voir plus loin *Les lasers à gaz rares*). Et un an plus tard, la première diode laser est conçue (voir plus loin *Les diodes laser*).

Charles Townes reçut le prix Nobel de physique en 1964. Un prix partagé avec deux soviétiques Nikolaï G. Bassov (1922-) et Aleksandr M. Prokhorov (1916-2002) qui réalisèrent en URSS des travaux comparables.

Modes de la cavité

En plus de la longueur d'onde émise, d'autres, aux valeurs proches, le sont également. Leur existence tient à la largeur non négligeable des niveaux d'énergie et au fait que la longueur de la cavité laser est des milliers de fois plus grande que la longueur d'onde laser. Ce dernier fait induit que deux longueurs d'onde proches pourront être chacune en phase avec elle-même après un aller et retour entre les deux miroirs. Elles sont appelées *modes longitudinaux* de la cavité. Selon le contexte d'utilisation de ce rayonnement laser, elles sont nuisibles ou au contraire recherchées et utilisées comme c'est le cas par exemple pour les lasers femtosecondes (voir plus loin). Selon le type du laser, le nombre de ces modes peut varier de quelques unités à plusieurs centaines de milliers !

La forme étroite et rectiligne du faisceau laser peut conduire à supposer une constance de l'intensité lumineuse du centre du faisceau jusqu'au bord. Il n'en est rien. Pour des raisons liées à la nature ondulatoire de la lumière, les dimensions réduites des miroirs et de la largeur du milieu amplificateur font que de multiples configurations peuvent se produire. Pour chacune d'entre elles, l'intensité lumineuse du faisceau peut s'annuler un certain nombre de fois dans le plan perpendiculaire à la direction de propagation. Lorsque ces valeurs se conservent après un aller et retour, ces configurations sont appelées *modes transverses* de la cavité. Ces modes coexistent et se superposent.

Souvent, le mode transverse le plus recherché est le mode fondamental où l'intensité lumineuse ne s'annule pas. Maximale au centre du faisceau, elle diminue progressivement pour atteindre une valeur minimale à la périphérie. En choisissant pour les deux miroirs de la cavité des miroirs sphériques aux rayons de courbures soigneusement calculés, certains de ces modes peuvent être favorisés au détriment d'autres.

Éléments constituant un laser

- **Un milieu amplificateur**, c'est-à-dire les atomes ou les molécules portés majoritairement dans un état excité. Le niveau d'énergie de cet état excité est très fortement peuplé en comparaison d'un niveau d'énergie inférieur (qui, dans de nombreux lasers, n'est pas l'état fondamental). Cette situation est appelée *inversion de population* (elle ne peut exister que hors de l'état d'équilibre thermique) et le processus qui y conduit, le pompage laser. Ce milieu amplificateur peut être solide, liquide ou gazeux selon le type de laser ;

- **deux miroirs se faisant face** encadrant le milieu amplificateur. Ce dispositif engendre l'oscillation d'une onde lumineuse (constituée des photons émis) qui, après quelques allers et retours entre les deux miroirs, se superpose à elle-même. Elle ne sera pas fortement atténuée (voire totalement détruite) par des interférences si elle reste toujours en phase avec elle-même ; une condition qui est réalisée lorsque la distance entre les deux miroirs est un multiple de sa demi-longueur d'onde. Cet ensemble de deux miroirs qui a les vertus d'un filtre spectral est appelé *cavité résonnante*... et les personnes initiées à l'optique auront reconnu le principe de l'interféromètre de Fabry-Pérot. A chaque traversée du milieu amplificateur, si l'amplification compense les pertes inhérentes à la cavité, l'intensité de l'onde croîtra. L'un des deux miroirs est semi-réfléchissant avec un coefficient de réflexion autour de 95 %. Cela permet à quelques pourcent de l'intensité lumineuse engendrée de quitter la cavité ; c'est le faisceau laser ;

- **une source d'énergie**, enfin, pour le pompage laser.

Lasers impulsionsnels - lasers femtosecondes

Des impulsions lumineuses ultrabrèves développent des puissances instantanées (puissances crêtes) formidables, inversement proportionnelles à leur durée (par exemple un joule délivré en une milliseconde correspond une puissance instantanée de mille watts).

Un autre intérêt à de telles impulsions tient à l'étude de certains phénomènes physiques dont la durée s'inscrit dans des temps très courts (par exemple, l'étude fine des réactions chimiques). La compréhension des mécanismes physiques qui les régissent nécessite un outil d'inspection capable de produire des stimulations de l'ordre de quelques femtosecondes (une femtoseconde représente un millionième de milliardième de seconde, soit 0,000 000 000 000 001 seconde !). C'est cette nécessité qui a lancé, au début des années 1970, les recherches sur la production de telles impulsions. Au début des années 1980, les premiers lasers les produisant efficacement voient le jour.

De telles impulsions ne sont pas engendrées spontanément. Elles sont façonnées au cours d'un processus complexe. L'idée est la suivante : l'addition d'un ensemble d'ondes ayant chacune une longueur d'onde propre, produit, à l'endroit où elles se rencontrent toutes en phase, une onde compacte. De ce préalable, le jeu consiste ensuite à l'affiner par étapes successives (fig. 2).

Ici, cette onde compacte est créée par l'addition de tous les modes longitudinaux en phase émis par un laser multimode. Ce laser est placé dans une « supercavité » constituée de différents éléments (miroirs, prismes, interrupteur optique). La forme de cette cavité particulière lui impose un parcours en forme de boucle. Au cours de ce dernier, des processus différents vont raccourcir soit son front avant, soit son front arrière. A chaque tour, elle devient une impulsion de plus en plus étroite. Lorsque la durée de l'impulsion devient très courte, des processus antagonistes à ce rétré-

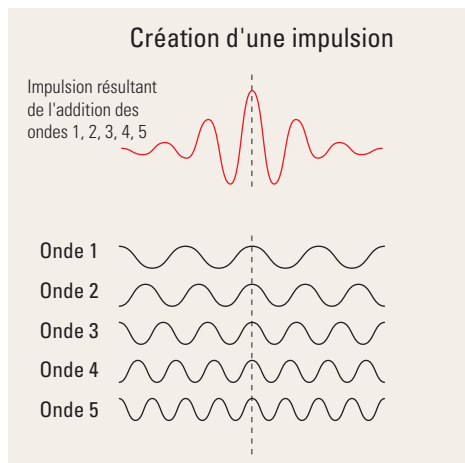


FIGURE 2

Onde résultant de l'addition des ondes 1, 2, 3, 4, 5. A l'endroit où les ondes sont toutes en phase, leur addition produit une grande amplitude, d'où l'impulsion.

cissement apparaissent. Cet obstacle est aujourd'hui surmonté et le domaine des impulsions laser de quelques femtosecondes (ou moins !) enfin atteint.

Un tel laser a permis à Ahmed Zewall de « filmer » l'évolution de réactions chimiques. Chaque impulsion laser devenant un flash d'une durée inférieure au processus étudié. Ces travaux lui ont valu le prix Nobel de chimie en 1999.

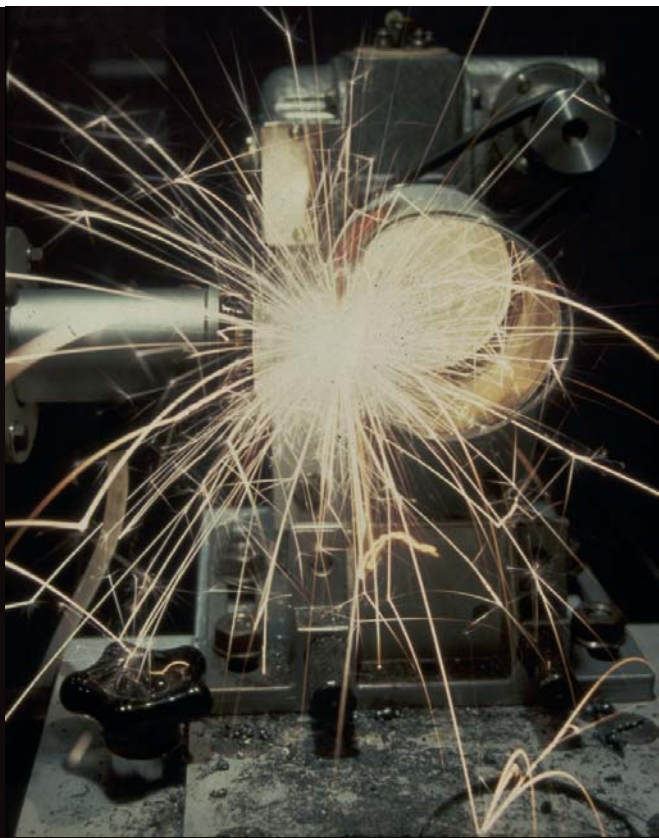
De l'infrarouge lointain aux rayons X

Panorama (non exhaustif) des longueurs d'onde laser

Après les trois premiers lasers, conçus aux début des années 1960, qui émettent tous dans le rouge, d'autres les ont rejoints, élargissant considérablement le domaine spectral.

Que leur dimension soit celle d'une tête d'épingle, comme les diodes laser, ou occupe tout un bâtiment comme pour le laser mégajoule avec lequel on espère produire la fusion nucléaire, tous les lasers contiennent les éléments décrits dans l'article de Townes.

Une précision importante au préalable : les

**FIGURE 3**

Un puissant faisceau laser focalisé à l'aide d'une lentille sur une lame métallique mince permet sa découpe (puissance 100 W, longueur d'onde 10,6 μm). © Palais de la découverte.

travaux d'Einstein de 1917, évoqués en introduction, introduisaient des coefficients d'émission stimulée et d'émission spontanée liés par une relation mathématique décrivant la dépendance du rapport de ces deux coefficients avec la longueur d'onde. Cette relation précise que plus la longueur d'onde est petite, plus l'émission spontanée est favorisée. Plus précisément, diviser par 10 la longueur d'onde revient à réduire d'un facteur 1 000 le rapport des deux coefficients. La difficulté sera donc plus grande de produire l'émission stimulée (« moteur » de l'émission laser) lorsque la longueur d'onde devient petite.

L'infrarouge lointain et moyen

Les lasers moléculaires (CO₂...)

La discontinuité des échanges d'énergie exposée précédemment pour les atomes se retrouvent avec les molécules. Les niveaux

d'énergie décrivent ici les états de vibrations ou de rotations au sein de la molécule. Comme avec les niveaux d'énergie des atomes, une émission stimulée peut être produite entre deux niveaux d'énergie excités pour lesquels une inversion de population a eu lieu. Très souvent, l'émission obtenue se situe dans l'infrarouge lointain et moyen (de 1 000 μm à 3 μm environ). Les lasers moléculaires ou ceux qui mettent en jeu un phénomène appelé *effet Raman* en sont les exemples les plus caractéristiques.

Le Palais de la découverte propose au public qui lui rend visite une présentation consacrée au laser au cours de laquelle des canettes métalliques sont découpées avec grande facilité (fig. 3). Un laser au gaz carbonique (CO₂) d'une puissance de 100 watts est mis à contribution. Le gaz carbonique est mélangé à du diazote qui joue le rôle de catalyseur de l'inversion de population. Plusieurs dizaines de longueurs d'onde au voisinage de 10,6 μm sont émises. Le pompage laser s'effectue par

décharge électrique. Dans l'industrie, de tels lasers peuvent avoir des puissances de plusieurs dizaines de kilowatts avec de très bon rendement (pour un laser à émission continue !) de 15 %.

Avec d'autres molécules (CHN, H₂O, N₂O,...), la bande des longueurs d'onde obtenues s'étend de quelques micromètres à plusieurs centaines de micromètres.

Lasers chimiques

La difficulté inhérente à un très grand nombre de lasers de créer l'inversion de population est contournée dans les lasers chimiques grâce à la production d'une réaction chimique exothermique produisant directement une molécule à l'état excité. Conséquence de ce premier avantage, l'énergie de pompage n'est plus nécessaire.

De telles réactions chimiques impliquent l'hydrogène et le fluor (ou le deutérium et le fluor). Le plus souvent, l'hydrogène est sous la forme moléculaire H₂. Quant au fluor, il est obtenu par la dissociation de molécules plus complexes dont il est l'un des éléments. Leur association produit des molécules de HF ou DF dans un état d'énergie excité. Placées dans une cavité résonnante adaptée aux très grandes puissances émises, elles produisent l'émission laser. L'émission laser a lieu tant que les deux éléments sont présents séparément.

En émission continue, les puissances de tels lasers HF ou DF peuvent atteindre 2 MW (2 . 10⁶ W) ! Ils peuvent produire également des impulsions de puissances instantanées supérieures à 100 gigawatts avec une longueur d'onde comprise entre 2,8 et 3,2 µm pour le laser HF et entre 3,5 et 3,8 µm pour le laser DF.

Des caractéristiques qui n'ont pas échappé aux militaires !

Le proche infrarouge

Le laser YAG dopé au néodyme

Les longueurs d'onde du proche infrarouge (de 3 µm à 0,750 µm) peuvent être obtenues

avec des ions de terres rares insérés dans une matrice cristalline. Par exemple, le laser utilisant l'ion néodyme Nd³⁺ dans un grenat d'yttrium-aluminium (YAG) comme milieu amplificateur émet une longueur d'onde de 1,06 µm. L'énergie de pompage est apportée sous forme lumineuse. Une diode laser émettant dans le rouge joue ce rôle avec efficacité.

En fonctionnement continu, ces lasers YAG peuvent atteindre des puissances de 100 watts. En fonctionnement impulsif, ils peuvent produire des impulsions d'une durée inférieure à une nanoseconde (un milliardième de seconde) et proposer des puissances instantanées supérieures au gigawatt (10⁹ W).

Les ions erbium Er³⁺ et les ions holmium Ho³⁺ peuvent être utilisés à la place des ions néodyme. Les lasers YAG ainsi dopés émettent respectivement des longueurs d'ondes de 2,94 µm et 2,1 µm.

Ces mêmes ions néodyme peuvent être insérés dans une matrice amorphe (du verre par exemple), ce qui permet d'obtenir des milieux amplificateurs de grandes dimensions et, par conséquent, des lasers de grandes puissances.

Une propriété de ces milieux dopés trouve une application importante par ses retombées économiques en télécommunication : la lumière d'un laser dopé à l'erbium est amplifiée par la silice dopée à l'erbium. Or la silice est le matériau de base des fibres optiques. Cette amplification permet ainsi de compenser les pertes lumineuses inhérentes à toute fibre optique. Les câbles téléphoniques transatlantiques utilisent des systèmes incorporant les fibres optiques de silice dopées à l'erbium.

Les diodes laser

Les diodes laser sont constituées aujourd'hui, dans leur immense majorité, d'une association de matériaux semi-conducteurs appartenant à la troisième et à la cinquième colonne du tableau de Mendeleïev (par exemple l'arséniure de gallium GaAs composé de gallium (III) et d'arsenic (V)). Dans ce matériau, d'autres éléments peuvent être incorporés à la place de certains éléments GaAs pour conférer à ce matériau des

propriétés électriques particulières ; comme présenter un excédent d'électrons (semi-conducteur dopé n) ou un manque d'électrons, appelés trous (semi-conducteur dopé p).

Or la recombinaison électron-trou peut libérer de l'énergie sous la forme d'un photon. La fréquence ν de ce photon est donné par la relation de Planck : $E = h \nu$. Ici, l'énergie E (appelée *gap*) est égale à la différence entre l'énergie du bas de la bande de conduction et l'énergie du haut de la bande de valence. Pour l'arséniure de gallium, elle est de l'ordre de 1,4 eV, ce qui correspond à une longueur d'onde comprise entre 0,8 μm et 0,9 μm (c'est-à-dire dans le proche infrarouge). Ces recombinaisons peuvent être forcées au moyen d'un courant électrique. Lorsque l'intensité de ce courant est suffisamment élevée, une émission stimulée se produit. Les progrès technologiques au cours des années 1980 ont permis de diminuer fortement l'épaisseur de la zone de recombinaison (aujourd'hui de l'ordre du dixième de micromètre) rendant possible l'utilisation de courant faible (indispensable pour limiter l'échauffement) pour un gain comparable.

La course vers le bleu

Ces diodes laser sont principalement utilisées dans transport, le stockage, l'enregistrement et la lecture d'information. Or, leur émission dans le proche infrarouge limite leur performance dans ce domaine d'application. En effet, de par sa nature ondulatoire et des phénomènes de diffraction qui y sont liés, plus la longueur d'onde d'un rayon lumineux est courte, plus le diamètre de focalisation de ce rayon est petit. Ainsi, une longueur d'onde dans l'infrarouge impose un diamètre minimal à la tache de focalisation. Passer de l'infrarouge au bleu multiplierait la densité de stockage par dix. Les retombées économiques qu'induirait cette avancée technologique, stimulent très fortement les recherches dans ce domaine. En 1991, une société américaine a réalisé la première diode laser émettant dans le bleu-vert. Depuis, aux États-Unis, au Japon et en Europe (en France notamment, avec le

CNRS), d'autres diodes de ce type ont vu le jour. Elles présentent cependant plusieurs problèmes. Elles ne fonctionnent pas encore suffisamment longtemps en mode continu (quelques heures au maximum) et elles nécessitent un refroidissement important.

Le visible

C'est dans le domaine spectral du visible (de 0,750 μm à 0,380 μm) que la richesse des longueurs d'onde proposées est la plus grande. Aujourd'hui, toutes les couleurs composant l'arc-en-ciel peuvent être produites en lumière laser. Cette diversité a été enrichie lors de l'apparition des lasers accordables.

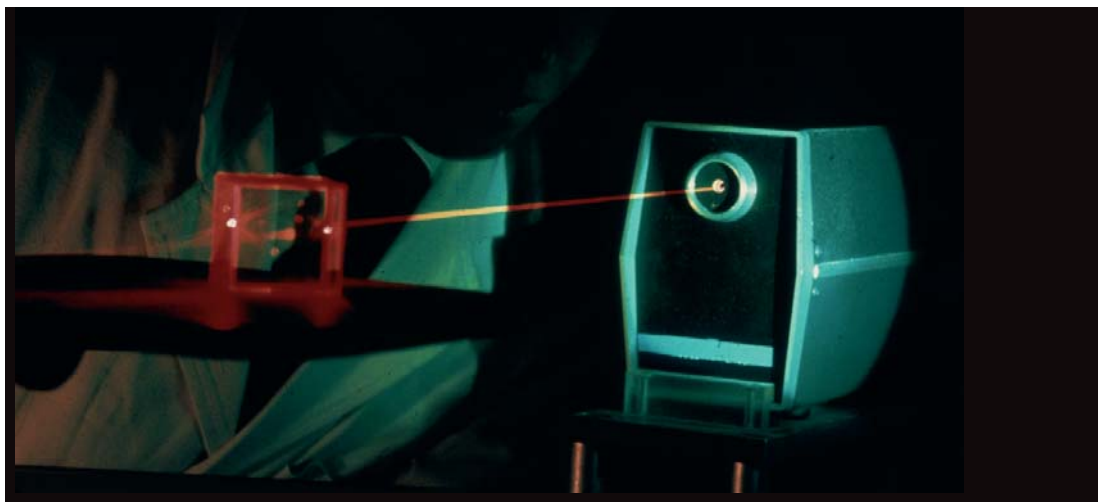
Les lasers à gaz rares hélium-néon

Dans les lasers hélium-néon (fig. 4), l'inversion de population a lieu entre deux niveaux d'énergie des atomes de néon. L'hélium, avec lequel il est mélangé, va jouer le rôle de « catalyseur » de l'inversion de population. Cette dernière est obtenue par collisions énergétiques. Une décharge continue porte des atomes d'hélium sur un niveau d'énergie métastable proche d'un niveau d'énergie du néon. Ces atomes d'hélium transfèrent lors de chocs leur énergie à ceux de néon qui peuplent ainsi fortement le niveau d'énergie supérieur de l'inversion de population. Parallèlement, des phénomènes de relaxation dépeuplent très rapidement le niveau inférieur. Ces deux processus concourent à entretenir le déséquilibre quantitatif entre les deux niveaux.

Plusieurs longueurs d'onde peuvent être émises selon les deux niveaux choisis pour l'inversion de population. La plus connue étant la fameuse raie rouge de 0,633 μm . Cinq autres vont de l'infrarouge moyen au vert en passant par l'orange et le jaune.

Argon ionisé (ou krypton ionisé)

On retrouve pour l'argon et le krypton ionisés un schéma énergétique comparable à celui du néon sans avoir besoin d'un élément catalyseur pour réaliser l'inversion de population.



Mais la décharge électrique doit être beaucoup plus intense que celle utilisée dans le laser hélium-néon. Les longueurs d'onde obtenues vont du rouge au bleu.

Fluorescence du sodium et laser jaune pour l'observation spatiale

La fluorescence est un mécanisme particulier d'émission photonique dans le visible par certains corps suite à une excitation par des longueurs d'onde plus courtes (souvent dans l'ultraviolet). Celle de la raie jaune du sodium (0,589 μm) est particulière en ce qu'elle émet une longueur d'onde identique à la longueur d'onde d'excitation. Cette propriété particulière est à l'origine d'un projet original concernant l'observation spatiale.

Le projet européen VLT (*Very Large Telescope*) ambitionne de construire le plus puissant télescope du monde, cent fois plus puissant que le télescope Hubble. Installé au Chili, à 2 635 m d'altitude, dans une région choisie pour la pureté de son ciel et la faible pollution lumineuse, il est constitué de quatre miroirs de 8,2 m de diamètre. Son originalité, outre ses dimensions exceptionnelles, tient dans la technique d'interférométrie utilisée pour produire ses images. Elle lui donnera prochainement la puissance équivalente à celle d'un miroir unique de 120 m de dia-

mètre ! (Actuellement, les miroirs sont utilisés individuellement.)

Toutefois, à la différence du télescope Hubble en orbite à 600 km d'altitude, le VLT sera toujours contraint de s'affranchir des perturbations créées par l'atmosphère terrestre. En effet, ces dernières affaiblissent l'intensité lumineuse reçue par absorption et diffusion atmosphériques. Par ailleurs, elles déforment le front d'onde de l'objet observé à cause de l'inhomogénéité fluctuante de l'atmosphère. Ce dernier point est un souci permanent pour la qualité du contraste des images photographiques réalisées. Pour y remédier, une technique d'optique adaptative a été conçue. Les miroirs se déformeront à chaque instant pour compenser les nuisances atmosphériques. Mais comment calculer ces déformations ?

En créant une étoile artificielle proche de la ligne de visée des objets stellaires observés ! Un laser de forte puissance émettant dans le jaune excitera la fluorescence d'atomes de sodium situés dans la mésosphère (environ 80 km d'altitude). La fluorescence n'imposant pas une direction particulière d'émission, cette dernière se fera dans toutes les directions de l'espace, et notamment vers les quatre miroirs pour lesquels elle aura l'aspect d'un point lumineux... comme une étoile. Faire le point sur cette étoile reviendra en quelque sorte à écarter ce « rideau atmosphérique » épais de 80 km !

FIGURE 4

Le laser hélium-néon émet un rayonnement rouge très monochromatique (0,633 μm) et très cohérent (les propriétés de la lumière cohérente la rendent utilisable pour un grand nombre d'applications relevant précédemment du seul domaine des ondes radioélectriques). Le faisceau très peu divergent peut servir de fil d'alignement immatériel, véhiculer des informations dans une direction précise ou encore servir à la mesure de déplacements très faibles ou très lents.
 © Palais de la découverte/C. Rousselin et G. Rumèbe).

Les lasers accordables (à colorant, aux ions titane)

Lorsque les deux niveaux d'énergie entre lesquels a lieu l'inversion de population n'ont plus le caractère discret des spectres atomiques mais se présentent sous la forme de bandes continues, l'onde laser émise présente un très large spectre de longueurs d'onde. Ce cas se présente surtout avec les lasers accordables et, dans une moindre mesure, avec les diodes laser évoquées précédemment. (Ces bandes continues peuvent être comparées à un regroupement d'un très grand nombre de niveaux d'énergie formant un ensemble continu.)

Dans ce type de laser, l'inversion de population a lieu avec un niveau inférieur qui est en fait une bande d'énergie. La largeur de cette bande détermine la plage des longueurs d'onde émises.

Les molécules à colorants en phase liquide ont été les premières utilisées à cet effet. Par exemple, le colorant rhodamine 6G permet de choisir dans une bande comprise entre 0,565 μm et 0,595 μm avec une précision de l'ordre du millièème de micromètre. Des éléments insérés dans la cavité (filtres sélectifs) permettent de choisir et d'ajuster la longueur d'onde voulue.

Un laser à argon ionisé (longueur d'onde dans le vert) fournit l'énergie de pompage.

Dans les années 1990 fut conçu un laser accordable utilisant un milieu amplificateur solide, des ions titane disposés dans une matrice de saphir. La plage offerte est comprise entre 0,7 μm et 1,1 μm . Ici, également, l'énergie de pompage est donnée par un laser à argon ionisé.

L'ultraviolet

Deux techniques principales permettent d'obtenir un rayonnement laser dans l'ultraviolet (de 0,380 μm à 0,010 μm environ).

Laser à excimère

Le laser à excimère met en jeu un processus d'inversion de population similaire à celui des lasers chimiques. Une décharge électrique dans un mélange contenant un gaz rare et un halogène (appartenant respectivement à la huitième et à la septième colonne du tableau de Mendeleïev) conduit à la création d'une molécule stable dans l'état excité (elle est appelée excimère). Lorsque cette dernière se désexcite, elle se retrouve dans un état instable qui conduit très rapidement à la disparition de la molécule par libération des deux atomes. Voici nos deux niveaux d'énergie (correspondant respectivement aux états stable et instable) avec, comme l'exige l'inversion de population, un niveau inférieur fortement dépeuplé.

Une décharge électrique très puissante (produite entre une anode et une cathode disposées dans la cavité contenant le mélange) est indispensable pour réaliser cette réaction. L'anode est rendue fortement positive par irradiation de rayons X (rayonnement qui a la capacité d'arracher des électrons à la matière).

Ces lasers à excimère émettent des impulsions dont la durée est de l'ordre de quelques nanosecondes. Elles sont produites en un seul trajet dans le milieu amplificateur. Cette technique induit une émission lumineuse dont la cohérence est médiocre en comparaison de celles des autres types de laser. Mais la puis-

sance instantanée gigantesque obtenue à chaque impulsion (quelques gigawatts) fait de ce laser un outil exceptionnel. Selon le gaz rare et l'halogène utilisés (fluor, argon, krypton, chlore...), les longueurs d'onde obtenues appartiennent à la bande qui s'étend grossièrement de 0,350 μm à 0,150 μm .

Ces rayonnements cohérents de courtes longueurs d'onde ont de nombreuses applications. En chirurgie réfractive, par exemple, le laser à excimère permet de corriger les défauts de la vision (myopie, hypermétropie et astigmatisme) en modifiant la forme de la cornée. Il est d'une grande efficacité dans le traitement des surfaces (décapage, modification des propriétés de surface...). Sa très courte longueur d'onde est recherchée en lithographie (et notamment en microlithographie) pour la fabrication des circuits microélectroniques.

Par une technique d'optique non linéaire

Les progrès technologiques que connaissent les lasers YAG fonctionnant en modes pulsés conduisent aujourd'hui à les utiliser à la place des lasers à excimère. Comme nous l'avons vu précédemment, ces lasers YAG émettent dans l'infrarouge, mais l'utilisation de dispositifs appelés non linéaires, placés dans la cavité laser, permet la production d'harmoniques (fréquences multiples de la fréquence initiale, donc des longueurs d'onde réduites d'autant).

Les longueurs d'ondes des harmoniques 3 et 4 du laser YAG dopé au néodyme sont les suivantes : 0,355 μm pour l'harmonique 3 et 0,266 μm pour l'harmonique 4.

L'un de ces dispositifs est le doubleur de fréquence. Ce sont principalement des cristaux produisant une réponse non linéaire à une excitation électromagnétique. A la fréquence d'excitation initiale, ces cristaux engendrent en plus une fréquence double de la première. C'est dans certaines circonstances un moyen très commode d'obtenir des fréquences particulières, produites autrement par des lasers coûteux ou d'utilisation délicate.

Nous disposons, au Palais de la découverte, d'un laser YAG au néodyme (longueur d'onde

de 1,06 μm). Lorsqu'un cristal de KTP (KTiOPO_4) est placé dans la cavité laser, il produit une lumière verte correspondant à une longueur d'onde deux fois plus courte.

Rayons X-UV

La difficulté évoquée précédemment de produire l'émission stimulée avec des petites longueurs d'onde a conduit à imaginer l'impossibilité de produire une émission laser dans le domaine spectral des rayons X (de 10 nm à 0,01 nm environ ; 1 nm est égale à 0,001 μm).

Ce sont les progrès acquis dans la compréhension et la maîtrise des plasmas (gaz ionisés) qui permettent aujourd'hui de produire un rayonnement cohérent dans ce domaine spectral.

C'est en effet un plasma d'ions multichargés (atomes qui ont perdu un grand nombre de leurs électrons) qui constitue ici le milieu amplificateur. Ce plasma est obtenu par la focalisation d'impulsions lumineuses émises par un laser à verre à néodyme. Ces impulsions dont la durée peut être inférieure à une nanoseconde (soit un milliardième de seconde) vaporisent la surface d'un solide placé sous vide.

Pour réaliser la cavité résonante, les miroirs ordinaires ne peuvent plus être utilisés. En effet, pour ces longueurs d'onde très petites, ils ont un indice de réfraction proche de l'unité (c'est-à-dire qu'ils sont quasiment transparents !). Ils sont remplacés par des miroirs conçus selon une technique interférentielle multicouche composée de molybdène de silicium. Leur indice de réflexion est compris entre 20 % et 60 %.

Les longueurs d'onde obtenues sont de l'ordre de quelques nanomètres (21,2 nm soit 0,0212 μm pour le laser du Laboratoire d'utilisation des lasers intenses, centre de recherches situé à Palaiseau dans la région parisienne).

Conclusion

La course vers les petites longueurs d'onde n'a cessé depuis qu'elle a été inaugurée il y a

plus de quarante ans. Cette recherche constante est motivée par les promesses de champs d'application nouveaux dont toute nouvelle longueur d'onde laser émise semble porteuse.

Pour clore cet article, citons-en une en particulier, qui, si elle se concrétise, enthousiasmera certainement Charles Townes, spectateur attentif de ces quatre décennies fructueuses. Elle concerne en effet un domaine qui lui est cher : l'étude de la conformation moléculaire, l'un des objectifs de la spectroscopie moléculaire pour laquelle, rappelons-le, il conçut cet outil qu'est le laser. Toute nouvelle molécule créée par un chimiste ou un biologiste exige une description propre, c'est-à-dire la connaissance de la disposition dans l'espace des atomes qui la composent. Aujourd'hui, ce sont des logiciels complexes qui construisent une représentation mathématique de ces architectures moléculaires. Demain, lorsque les lasers X seront suffisamment performants, ce seront peut-être des hologrammes qui nous montreront directement ces constructions. Voilà, dans un futur encore lointain, l'une des perspectives les plus stupéfiantes qu'offriront ces nouveaux lasers. Gageons qu'elle doit être pour Townes l'objet de longues rêveries...

H. B.



Titulaire d'une maîtrise de physique et d'un DEA de robotique, **Hervé Boisson** a tout d'abord occupé des fonctions d'ingénieur dans l'industrie pendant quatre ans. Il intègre ensuite le Palais de la découverte en 1993 comme médiateur scientifique au sein du département de physique. A ce titre, il a notamment la responsabilité des salles consacrées à la lumière et est également à l'origine de plusieurs formations sur le thème de la lumière destinées aux enseignants.

Quand le laser joue les artistes...

Vous avez sûrement déjà aperçu ces objets décoratifs constitués d'un bloc de matière transparente (verre, cristal, plastique) dans lequel est gravée une image en trois dimensions dans un bloc de matière transparente (verre, cristal, plastique). Vous vous êtes sans doute demandé comment cette dernière avait été réalisée ? Réponse : par focalisation de brèves impulsions laser. Quelle que soit sa pureté, toute matière transparente ne l'est jamais totalement. Chaque matière présente un coefficient d'absorption plus ou moins élevé pour un rayonnement d'une longueur d'onde donnée. Les conséquences de cette absorption se ressentiront lorsque la densité d'énergie apportée au matériau sera telle qu'elle induira un effet thermique suffisant pour modifier (ici localement) l'état de ce dernier. Elle créera alors un impact, résultat d'une microdilatation. Produire une image au sein d'un matériau revient donc à produire une série d'impacts aux points voulus.

Une première étape informatique décompose une image tridimensionnelle continue en une image tridimensionnelle en pointillé ; chaque point représentant un point de l'espace. La deuxième étape consiste à focaliser, aux points calculés, des impulsions laser suffisamment intenses pour engendrer un impact (en traversant le matériau, à mesure de l'approche du point de focalisation, la densité d'énergie du rayonnement augmente ; la focalisation est calculée pour qu'elle soit maximale aux points considérés). Pour une image sophistiquée en trois dimensions, 100 000 micro-impacts peuvent être nécessaires. Pour éviter toute fêlure, notons qu'une distance minimale entre chacun d'entre eux doit être respectée.