

# Les différents lasers : un tour d'horizon

**Sébastien Forget<sup>(1)</sup>** (sebastien.forget@univ-paris13.fr), **Isabelle Robert-Philip<sup>(2)</sup>** et **Philippe Balcou<sup>(3)</sup>**

(1) Laboratoire de physique des lasers, Université Paris 13, 99 avenue J.-B. Clément, 93430 Villetaneuse

(2) Laboratoire de photonique et de nanostructures, CNRS, Route de Nozay, 91460 Marcoussis

(3) Centre des lasers intenses et applications, Université de Bordeaux 1, 351 cours de la Libération, 33405 Talence Cedex

Les lasers sont multiples : en fonction de leurs caractéristiques physiques intrinsèques (quel milieu à gain ? quelle cavité ? quel pompage ?), ils produisent des rayonnements couvrant des plages extrêmement vastes, tant du point de vue spectral – de l'extrême ultraviolet au lointain infrarouge – que temporel – du régime continu aux attosecondes – ou encore énergétique – du nano au mégajoule. C'est de cette impressionnante diversité que les lasers tirent leur capacité à répondre à tant d'applications différentes.

Nous vous proposons dans cet article de faire un rapide tour d'horizon des différents types de lasers existants et de leurs performances.

Le laser a cinquante ans. Ses premiers photons sont nés dans un cristal de rubis, formant le premier laser solide (voir encadré 1 et p. 22). Puis ont été inventés les lasers à gaz (p. 22), les lasers à semi-conducteurs (p. 23) et les lasers à colorants (p. 23)... Cette invention majeure du siècle dernier a bouleversé nos modes de vie : à la maison, le laser nous permet de visionner des DVD, d'écouter des CD ; au supermarché, le laser lit les codes-barres imprimés sur les emballages ; dans l'industrie, il peut couper, souder, percer [1] ; en médecine, il répare ou il brûle des zones malades sans endommager les zones saines [2]... À chaque application son laser : une myriade de lasers aux propriétés variées (puissance, durée d'impulsions, longueur d'onde, finesse spectrale...) permet ainsi de trouver la bonne solution à chacune des problématiques.

Parallèlement à ces nombreuses applications dans notre quotidien, les lasers restent encore présents dans les laboratoires. Ils ont notamment ouvert la voie à d'importantes découvertes en physique fondamentale : on peut citer, par exemple, la manipulation et le refroidissement d'atomes par les lasers, qui ont conduit à l'élaboration d'horloges atomiques toujours plus précises [3]. Outre un outil devenu indispensable pour la recherche, le laser est aussi un objet de recherche en soi. Dans les laboratoires, les chercheurs conçoivent aujourd'hui les lasers de demain, toujours plus performants. Sans prétendre faire une liste exhaustive de toutes les études menées à ce jour, donnons ici quelques exemples d'axes aujourd'hui explorés pour en montrer la diversité : certains d'entre eux seront développés plus en détails dans d'autres articles de ce numéro spécial.

## Des lasers de plus en plus petits

Vedettes des lasers par leur nombre et leur chiffre d'affaires, les lasers à semi-conducteurs (voir p. 23) font toujours l'objet de travaux de recherche. Avec les progrès des techniques de fabrication, la réduction de la taille des composants microélectroniques se poursuit. Dans cette course, on conçoit qu'à l'avenir, la seule adaptation des technologies antérieures ne permettra pas de poursuivre le rythme des améliorations de performances. Devant cet état de fait, il est donc nécessaire de mettre en œuvre des solutions évolutives (nouveaux matériaux, architectures originales...) ou révolutionnaires. Parmi ces dernières, une solution vise à combiner optique et microélectronique. Ceci passe par une réduction de la taille des lasers. C'est là la clé du succès des lasers semi-conducteurs de petite taille.

Mais les chercheurs veulent aller plus loin, avec le développement des microlasers, voire des nanolasers. Dans ce domaine, on peut citer pour exemple le développement de lasers Raman sur silicium, matériau peu onéreux et compatible avec les technologies de la microélectronique. Une autre approche explore des technologies hybrides, associant microcircuits en silicium et circuit photonique en arsénure de gallium ou phosphore d'indium. Cependant, à ces échelles submicroniques, les mécanismes qui gouvernent le fonctionnement de la source laser sont significativement modifiés, imposant de revisiter la physique des lasers lorsque leurs dimensions deviennent égales ou inférieures à la longueur d'onde optique [4].

>>>

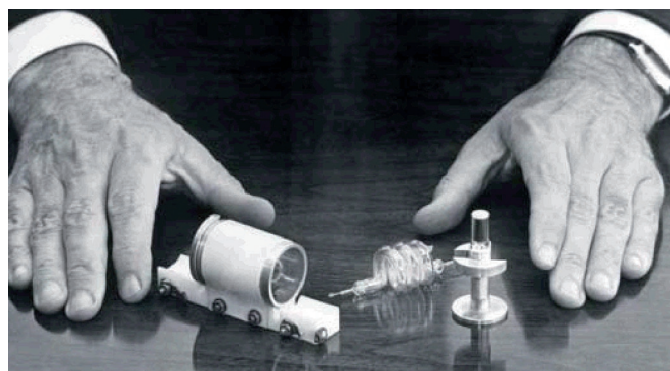


Cristaux de silicates de calcium et d'aluminium dopés par différentes terres rares, et utilisés comme matériaux lasers (CMCP, Paris). © CNRS Photothèque / DELHAYE Claude.

## ► Les glorieux pionniers

Encadré 1

16 mai 1960, dans le laboratoire de Ted Maiman (Hughes Research Labs), à Malibu, Californie : c'est d'un cristal de rubis que sort le premier photon laser. Ce fait historique ne relève pourtant pas de l'évidence. En effet, une intense période de recherches visant à créer le premier laser, à la fin des années 50, a suivi le succès rencontré par Charles Townes (Columbia University) dans sa démonstration du « maser », avec un « m » comme *microwaves*, quelques années auparavant. Le maser utilisait le phénomène d'émission stimulée pour amplifier des micro-ondes dans un milieu gazeux, et ce, de façon continue. C'est ce même type de fonctionnement, mais dans le domaine des longueurs d'ondes optiques, que Townes et Schawlow envisageaient pour former ce qu'ils appelaient alors un « maser optique ». Malheureusement, le gain dans le mélange gazeux identifié par Ali Javan et Bill Bennett, des Bell Labs, est si faible que des trésors de technique et d'ingéniosité, soutenus par les fonds quasi illimités de ce prestigieux laboratoire, sont nécessaires pour enfin obtenir un effet laser à 1,15  $\mu\text{m}$ , fin 1960.



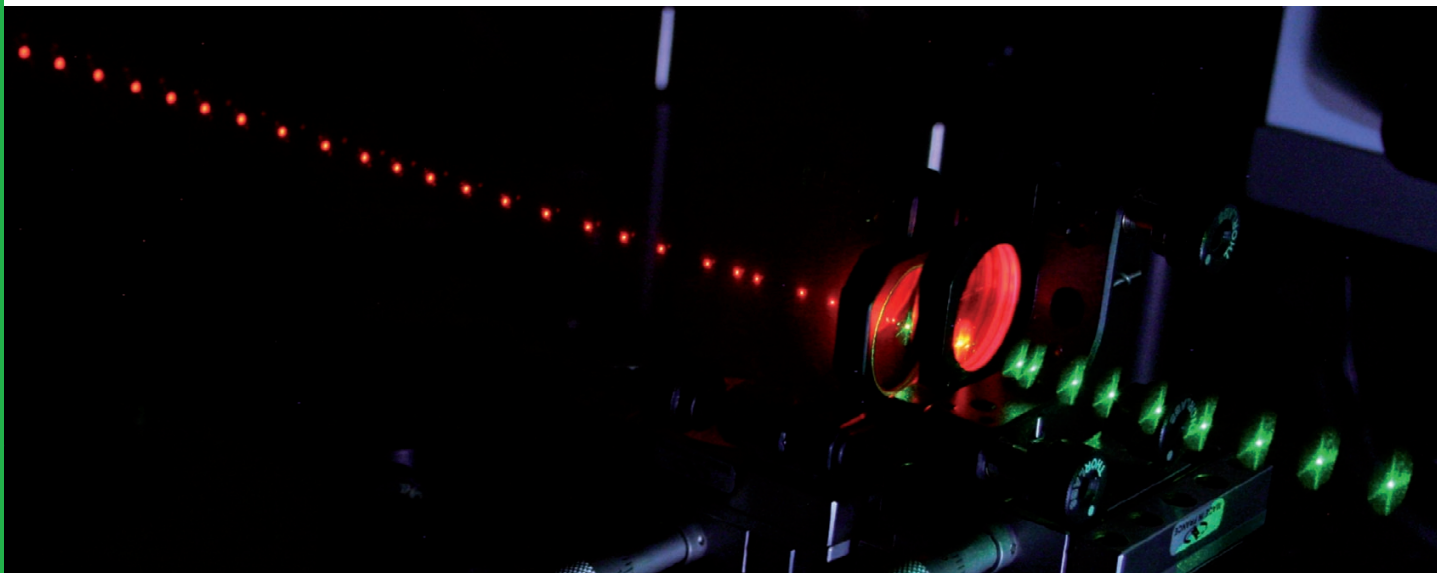
Le laser à rubis de Maiman, ici démonté : on est frappés par l'élégance, la simplicité et la compacité du dispositif.

Mais c'est trop tard : dans son coin, et malgré les prédictions pessimistes d'Arthur Schawlow, Ted Maiman est persuadé que son rubis (c'est-à-dire un cristal d'alumine dopé avec des ions chrome, un matériau déjà bien connu des « maseristes ») est un milieu favorable à l'obtention d'un effet laser. L'idée décisive sera d'accepter d'obtenir une émission pulsée en utilisant comme pompe des lampes flash du commerce, produisant une intensité énorme pendant un temps bref. Bien que la structure de l'ion chrome produise un système laser dit à « trois niveaux » (voir glossaire, p. 7) peu efficace, et que les miroirs ne soient pas de haute qualité, l'inversion de population peut être obtenue grâce à ces flashes, et l'effet laser est observé !

Javan réalisera néanmoins le premier laser continu (c'est également le premier laser à gaz, et aussi le premier laser pompé électriquement), avec son mélange d'hélium et de néon, laser qui rencontrera un succès commercial et scientifique d'importance. On oublie pourtant souvent qu'un autre laser a été « inventé » entre les deux : Peter Sorokin et Mike Stevenson, dans les laboratoires d'IBM, ont mis au point le premier laser solide à quatre niveaux (voir glossaire, p. 7), avec un seuil d'oscillation (*cf.* p. 16) bien plus bas que celui du rubis, en utilisant un cristal de fluorure de calcium dopé avec de l'uranium ou du samarium. Néanmoins ces lasers, qui nécessitaient un refroidissement cryogénique, n'ont jamais eu d'application.

Les cinq années qui suivirent virent un foisonnement de nouveaux lasers dans des matériaux plus ou moins exotiques. Les avancées les plus marquantes furent l'invention du laser à semi-conducteur (1962, R. Hall), du laser  $\text{CO}_2$  (K. Patel, 1964) et du laser à colorant (P. Sorokin, 1966).

Les décennies ultérieures virent le développement d'une myriade d'applications et de quelques types de lasers d'importance : laser à excimère (N. Basov 1970), laser à électrons libres (J. Madey, 1976), laser titane-saphir (P.F. Moulton, 1982), laser à cascade quantique (J. Faist / C. Sirtori / F. Capasso, 1994)... ; mais l'essentiel des bases était déjà jeté.



Laser pulsé à colorant solide. (Laboratoire de physique des lasers, Villetaneuse) © LPL, S. Forget

>>>

## Des lasers de plus en plus puissants

Si la course à la miniaturisation est bel et bien engagée, une autre course est ouverte aujourd'hui : celle à la puissance. Par exemple, l'industrie soude, coupe et perce avec des lasers à gaz très puissants (voir p. 22 et référence [1]). Les lasers à fibres optiques (p. 22) pourraient succéder à ces lasers à gaz. Outre ces applications industrielles, les lasers se sont rapidement révélés comme des outils extraordinaires pour faire apparaître, puis étudier, des états extrêmes de la matière. Il est en particulier possible de concentrer en temps l'énergie d'un laser en une impulsion lumineuse, dont la durée peut varier de quelques femtosecondes, jusqu'à quelques centaines de nanosecondes. La puissance du laser – son énergie concentrée en temps – peut devenir absolument colossale, allant du gigawatt pour les « petits » lasers intenses, jusqu'à des niveaux dépassant aujourd'hui le petawatt ( $10^{15}$  watts). À titre de comparaison, la puissance électrique maximale disponible en France sur l'ensemble du territoire national est de l'ordre de 100 GW ! Mais cette puissance électrique est mise à notre disposition en continu, alors que les lasers intenses ne délivrent de telles puissances que pendant des temps très brefs.

Toute matière soumise à de telles puissances se transforme en plasma, c'est-à-dire en fluide d'électrons arrachés des atomes, et d'ions. L'état plasma nous est en fait bien connu – il est dominant à l'échelle de l'Univers, et est présent dans notre vie quotidienne *via* les tubes fluorescents, la flamme des bougies... Un plasma créé par

laser a la particularité d'être généralement très chaud – de quelques milliers jusqu'à plusieurs dizaines de millions de kelvins. Un grand nombre de phénomènes physiques s'y déroulent, avec des applications potentiellement révolutionnaires. Ainsi, une particularité des plasmas est de pouvoir supporter des champs électriques très importants, typiquement dix mille fois supérieurs à ceux que peuvent supporter des isolants avant de claquer – l'avantage du plasma est ici évident, puisqu'un claquage n'est autre qu'une transition brutale vers un plasma – et on ne peut pas « claquer » un milieu déjà ionisé. Grâce à un mécanisme appelé « accélération par sillage », il apparaît aujourd'hui possible d'accélérer des électrons sur des distances millimétriques ou centimétriques jusqu'à des énergies énormes – l'accélération d'électrons par laser jusqu'à un gigaélectron-volt a ainsi été démontrée expérimentalement. On envisage donc très sérieusement de futures générations d'accélérateurs de particules par laser [5] !

Les avancées les plus spectaculaires en termes de puissance viendront certainement des lasers ultra-intenses qui occuperont des infrastructures gigantesques. On peut citer le Laser Mégajoule, actuellement en construction à Bordeaux. Au cœur de ce dispositif, deux cents faisceaux laser convergeront en un point pour fournir une énergie colossale de deux mégajoules en quelques nanosecondes. Une application phare de tels lasers de puissance concerne la production d'énergie par fusion contrôlée [6]. Un autre exemple est le projet européen Extreme Light Infrastructure, qui devrait voir le jour d'ici quelques années et produire des puis-

sances si considérables (de l'ordre de l'exawatt –  $10^{18}$  watts) qu'elles permettront d'étudier les interactions lumière-matière à une échelle inédite [7].

## Des lasers aux grandes et basses longueurs d'onde

La prometteuse carrière du laser dans le domaine de la recherche ne s'arrête pas à sa réduction en taille et à ses performances en termes de puissance. Si la diversité des milieux amplificateurs utilisés et l'ingéniosité dans l'architecture des sources lasers permettent de couvrir une large partie du spectre électromagnétique, il reste néanmoins que les sources de lumière laser sont encore absentes dans certaines gammes de longueurs d'onde.

C'est ce à quoi tentent de répondre notamment les lasers à cascade quantique, qui couvrent de nos jours le moyen infrarouge entre 3 et 24  $\mu\text{m}$  et le térahertz (THz) entre 60 et 300  $\mu\text{m}$ , territoires pratiquement vierges pour les lasers. Pourtant, le champ d'applications est vaste : détection de molécules polluantes, contre-mesures optiques... Ces lasers, démontrés pour la première fois en 1994 dans le moyen infrarouge et en 2001 dans la gamme THz, sont des lasers à semi-conducteurs (voir p. 23). Cependant, à la différence des diodes lasers usuelles, dans lesquelles l'émission de lumière provient de transitions optiques entre la bande de conduction et la bande de valence, les lasers à cascade quantique utilisent les transitions entre les « sous-bandes » de la bande de conduction dans



les hétérostructures de semi-conducteurs : la longueur d'onde d'émission du laser n'est pas déterminée par le *gap* du matériau, comme pour les lasers interbandes, mais par une astucieuse ingénierie des niveaux électroniques dans les puits quantiques. Il est donc possible d'obtenir une longueur d'onde donnée en travaillant sur la structure du composant (en particulier la largeur des puits quantiques). Les performances de tels lasers dans le moyen infrarouge ont connu des progrès remarquables (fonctionnement à température ambiante, opération en continu ou en pulsé, accroissement des puissances délivrées jusqu'à 100 watts crête...), au point qu'ils sont aujourd'hui commercialisés.

En revanche, le développement de ces lasers dans le domaine THz est plus complexe et moins mature, notamment du fait de la difficulté d'obtenir une inversion de population avec une transition optique aussi faible en énergie, et de la nécessité de développer des guides optiques adéquats. Actuellement, le record de température de fonctionnement dans cette gamme de fréquences est de l'ordre de 180 kelvins, et les puissances délivrées sont de quelques dizaines de milliwatts. Les efforts se poursuivent, notamment pour élever la température de fonctionnement de ces sources, accroître la puissance qu'elles délivrent ou bien obtenir une accordabilité en longueur d'onde.

De l'autre côté du spectre électromagnétique, les rayonnements ultraviolet et X ont longtemps été une zone interdite aux lasers, en raison de la très faible durée de vie des niveaux excités. Depuis environ vingt ans, on parvient néanmoins à créer des lasers dans l'extrême ultraviolet, dans lesquels le milieu actif est un plasma. Ces « lasers EUV » sont complétés par des approches alternatives, issues de l'optique non linéaire : on sait, par exemple, partir d'une impulsion laser dans le proche infrarouge, et la convertir en fréquence directement jusque dans le domaine de l'extrême ultraviolet (de 10 à 50 nm) [8]. Enfin, une troisième voie tend à s'imposer aujourd'hui, pour créer des lasers à rayons X : les « lasers à électrons libres X ». Ces systèmes comprennent tout d'abord un accélérateur d'électrons, de plusieurs centaines de mètres à quelques kilomètres de longueur, portant des paquets d'électrons à des énergies dépassant 10 GeV. Ces électrons sont alors injectés dans un onduleur, dispositif magnétique les faisant osciller plusieurs centaines de fois ; un pro-

cessus en avalanche se déclenche, menant à un groupement des électrons, qui diffusent de manière simultanée le champ de l'onduleur, créant un faisceau « laser » de rayons X, jusqu'à une longueur d'onde d'un ångström ! Le système américain LCLS, à Berkeley, a ainsi fourni ses premiers faisceaux de lasers X en 2009. Là encore, ce nouveau dispositif ouvre de nombreux champs d'études et d'applications ; si la taille de ce type de laser à rayons X reste encore prohibitive, plusieurs idées apparaissent aujourd'hui pour reproduire le processus sur des distances de l'ordre de dix mètres, voire même de quelques millimètres !

## Des impulsions lasers de plus en plus courtes

Le premier laser était impulsif. Depuis, ce régime de fonctionnement s'est révélé extrêmement fécond, et le nombre d'applications de tels lasers a augmenté de façon inversement proportionnelle à la durée des impulsions produites. Grâce à la technique du laser déclenché (ou « Q-switched »), le régime nanoseconde est accessible depuis très longtemps. L'avènement des lasers à spectres larges (colorants – voir p. 23, puis lasers saphir dopés au titane – voir p. 22) a permis d'utiliser le verrouillage de modes en phase (voir glossaire, p. 7) pour diminuer la durée d'impulsion et atteindre le régime femtoseconde (fs). En effet, lorsque de nombreux modes longitudinaux présents dans une cavité laser ont la même phase, ils peuvent interférer constructivement et former des impulsions d'autant plus courtes que le nombre de modes en jeu est grand [9]. La durée  $\Delta t$  des impulsions produites par cette technique est donnée par la relation  $\Delta\nu\Delta t \geq 1/4\pi$ , qui traduit dans le domaine spectro-temporel la relation d'incertitude de Heisenberg. Avec des lasers titane-saphir, capables de rayonner dans un large domaine de fréquences  $\Delta\nu$ , le record de brièveté pour une impulsion laser est de moins de 4 fs, ce qui correspond à peine à plus d'une période du champ électrique : on atteint donc là les durées les plus courtes accessibles dans le domaine visible.

Avec de tels lasers, il est déjà possible de produire des puissances crêtes colossales, ouvrant le champ de toute l'optique non linéaire, ou encore d'étudier les mouvements des atomes au cours de réactions chimiques, comme le ferait un appareil

photo ultrarapide (c'est le champ de la femtochimie, couronné par le prix Nobel d'Ahmed Zewail en 1999). La question qui se pose alors est : peut-on faire plus court ? Cela permettrait, par exemple, d'étudier la dynamique des processus électroniques au cœur des atomes, qui se déroulent à des échelles de temps sub-fs et restent à ce jour inaccessibles à l'observation. Depuis quelques années, la réponse est « oui », en se plaçant dans le domaine X-UV [8]. Les flashes de lumière les plus courts que l'on peut actuellement produire sont de l'ordre de 80 attosecondes ( $80 \cdot 10^{-18}$  s) : bientôt les électrons devront révéler leurs secrets...

La découverte du laser, il y a 50 ans, a élargi le champ du savoir. Elle a eu, rapidement, des conséquences sur la vie quotidienne des citoyens et dans le monde économique. Pourtant, les lasers restent encore un objet de recherche à part entière dans les laboratoires. Les chercheurs imaginent les lasers de demain, toujours plus petits, plus puissants ; leurs travaux visent à réduire encore la durée des impulsions ou à étendre le spectre couvert... Déjà omniprésent, le laser continuera à faire parler de lui, ouvrant la voie à une physique nouvelle et offrant des promesses toujours plus grandes pour demain. ■

## Références

- 1 • P. Aubourg *et al.*, « Applications industrielles des lasers », dans ce numéro, p. 83 ; M. Wautelet et L. Laude, « Le laser, outil industriel », *La Recherche*, n° 169 (septembre 1985).
- 2 • S. Mordon, « Applications médicales des lasers », dans ce numéro, p. 65.
- 3 • M. Leduc et P. Lemonde, « Atomes froids : réseaux optiques et horloges », dans ce numéro, p. 46.
- 4 • I. Abram *et al.*, « Les nanolasers : vers une nouvelle physique des lasers ? », dans ce numéro, p. 26.
- 5 • V. Malka *et al.*, « Un faisceau de rêve à portée de plasma », *Les dossiers de La Recherche*, n° 38 (février 2010), p. 48.
- 6 • M. Decroisette, « La fusion thermonucléaire par laser », dans ce numéro, p. 35.
- 7 • Pour en savoir plus sur ELI : [www.extreme-light-infrastructure.eu/](http://www.extreme-light-infrastructure.eu/)
- 8 • T. Ruchon *et al.*, « Sources cohérentes de laboratoire dans l'extrême ultraviolet », dans ce numéro, p. 30.
- 9 • A. Amy-Klein, « Mesures absolues de fréquences optiques avec un laser femtoseconde », dans ce numéro, p. 42.

# Quatre types de lasers

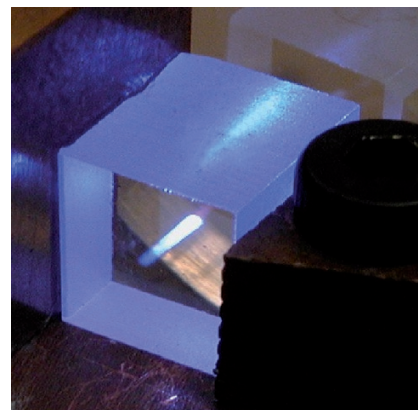
## 1 Les lasers à solides

Dans les lasers à solides, on utilise en général des cristaux dopés comme milieu amplificateur. Les ions utilisés comme dopants sont les éléments actifs produisant l'effet laser, la matrice cristalline servant essentiellement à les accueillir (et à légèrement influencer sur la longueur d'onde d'émission ou les propriétés thermiques de l'ensemble). La densité d'ions actifs dans un cristal est bien supérieure à celle des milieux gazeux, et on peut ainsi obtenir des gains importants sur de petits volumes. Les cristaux dans les lasers prennent en général la forme d'une tige ou d'un cube de dimensions millimétriques. La cavité optique est formée autour du cristal, soit en recouvrant deux faces opposées du cristal par des miroirs diélectriques, soit en le plaçant entre deux miroirs indépendants. Dans tous les cas, le laser obtenu est compact et robuste.

Les cristaux utilisés ne sont autres que des pierres semi-précieuses affectées en joaillerie : du rubis, du saphir, du grenat... Comme on l'a dit plus haut, ce n'est pas le cristal qui rayonne, mais les ions métalliques que l'on inclut dans la matrice cristalline. Les ions utilisés sont issus soit des métaux de transition (chrome ou titane, par exemple), soit des terres rares (comme le néodyme ou l'ytterbium). La plupart de ces ions émettent dans l'infrarouge proche : on peut néanmoins assez facilement obtenir un rayonnement visible par doublement de fréquence, en plaçant un cristal non linéaire dans la cavité ou en sortie du laser. L'efficacité de conversion peut être excellente avec des lasers impulsionnels intenses.

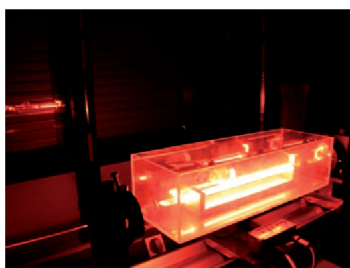
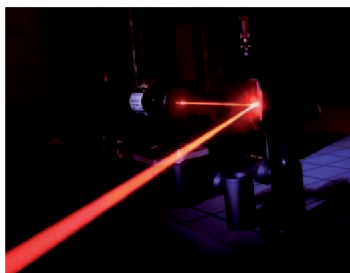
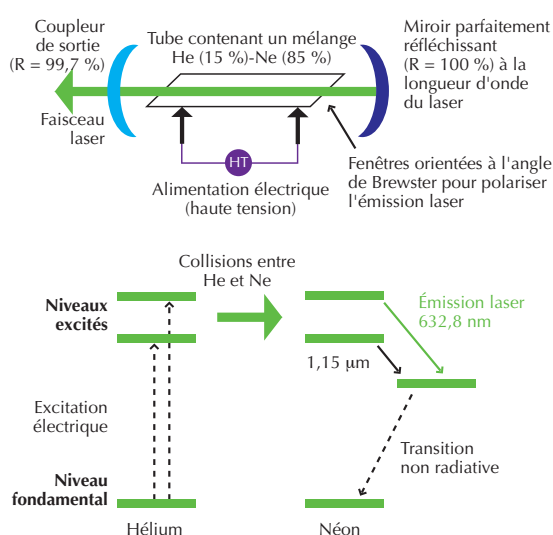
Un cas particulier mérite une place à part : en insérant des ions de titane dans une matrice de saphir, on obtient un laser capable de rayonner depuis le rouge (vers une longueur d'onde de 700 nm) jusque dans l'infrarouge (à une longueur d'onde supérieure à 1000 nm), au choix. Ce sont ces lasers « saphir-titane » qui sont aujourd'hui utilisés pour créer des flashes de lumière ultra-brèves et ultra-intenses : le principe du verrouillage de modes en phase (voir glossaire, p. 7), qui donne naissance à ces impulsions ultra-brèves, implique en effet que la durée minimale des impulsions obtenues est inversement proportionnelle à la largeur spectrale du milieu à gain.

Les cristaux ne sont pas les seules matrices permettant d'accueillir des ions actifs : on peut aussi utiliser des fibres optiques (donc de la silice). Dans ce cas, la très grande longueur du milieu amplificateur permet de gérer efficacement l'échauffement produit par la pompe et donc d'obtenir des lasers de très haute puissance, tout en conservant la qualité du mode spatial du faisceau (ce dernier ayant tendance à se détériorer fortement en présence, par exemple, de gradients de température dans le milieu amplificateur).



Cristal d'oxyapatite dopé à l'ytterbium ( $\text{Yb}^{3+}:\text{SrY}_4(\text{SiO}_4)_3\text{O}$ ), utilisé comme milieu amplificateur solide dans un laser. © I06S – F. Druon

## 2 Les lasers à gaz



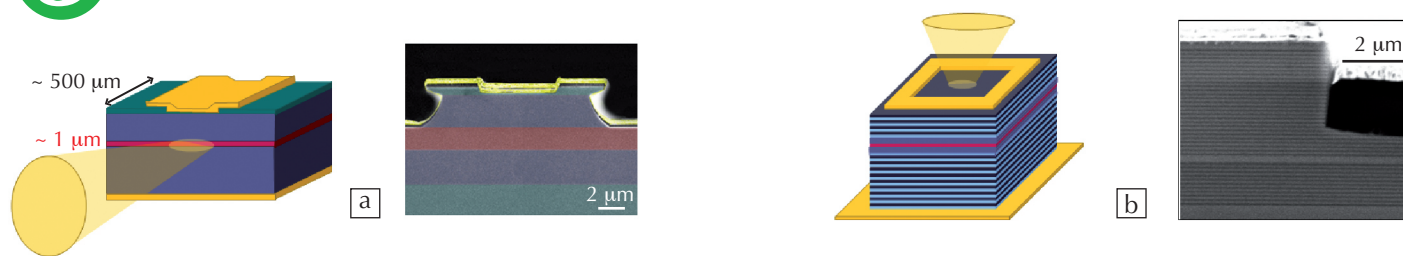
**Un exemple typique de laser à gaz : le laser hélium-néon.** À gauche : schéma d'un laser à hélium-néon (en haut) et des niveaux d'énergie (en bas). L'hélium est utilisé comme gaz tampon. Une alimentation électrique cède de l'énergie aux atomes d'hélium, qui transfèrent par collision cette énergie aux atomes de néon. Ceux-ci émettent alors des raies laser de longueur d'onde 633 nm. À droite : photos du laser He-Ne, émettant un faisceau rectiligne de lumière rouge (en bas, le laser est « ouvert » pour que l'on puisse observer la fluorescence). © LPL, UPI3 / CNRS S. Forget.

Le milieu amplificateur est ici constitué d'un gaz ou d'un mélange de gaz, en général contenu dans un tube en verre ou en quartz. Lorsqu'on envoie une décharge électrique dans le gaz, on excite directement ou indirectement (c'est-à-dire suite à des collisions) les atomes, créant ainsi une inversion de population. Pour former un laser, le tube enfermant le mélange gazeux est placé dans une cavité optique, constituée usuellement de deux miroirs se faisant face. Le gain optique dans le milieu gazeux étant faible, les pertes se doivent de l'être aussi : les miroirs utilisés sont généralement très réfléchissants (plus de 99,9 % de réflexion).

Les différents gaz employés permettent de couvrir une vaste plage de longueurs d'onde. Les plus courants sont l'argon ionisé (émission dans le bleu – 488 nm – et le vert – 514 nm), les mélanges d'hélium et de néon (rouge – 633 nm – essentiellement), le  $\text{CO}_2$  (un des lasers « les plus infrarouges », avec une longueur d'onde autour de 10  $\mu\text{m}$ ), ou encore les « exciplexes » formés d'un mélange de gaz rare et d'halogène (comme le xénon et le chlore, ou bien le krypton et le fluor), qui émettent quant à eux dans le domaine ultraviolet.

Chacun de ces lasers à gaz présente des caractéristiques différentes en termes de puissance (du mW des He-Ne rouges d'alignement, utilisés en travaux pratiques, aux kW des lasers  $\text{CO}_2$ , permettant la découpe des métaux), de régime de fonctionnement ou de qualité de faisceau, par exemple. Ils partagent néanmoins une très grande pureté spectrale (les raies d'émission atomiques sont très fines).

## 3 Les lasers à semi-conducteurs ou « diodes lasers »



(a) Laser de type ruban à émission par la tranche. À gauche : schéma simplifié. À droite : photo d'une face prise par microscopie électronique © CNRS Photothèque / GRECH P., COT D., ROUILLARD Y., VICET A. (IES, Montpellier).

(b) Laser de type VCSEL à émission par la surface. À gauche : schéma simplifié. À droite : photo en coupe, prise par microscopie électronique © CNRS-LPN, Marcoussis.

Les régions optiquement actives sont figurées en rouge ; les couches métalliques en jaune permettent d'apporter le courant nécessaire pour exciter le milieu amplificateur.

Les diodes lasers représentent aujourd'hui (et de loin !) les lasers les plus vendus dans le monde. Ces dispositifs bien particuliers utilisent comme milieu amplificateur des matériaux semi-conducteurs (InP, GaAs...), en général sous forme de jonctions ou d'hétérostructures. L'émission de lumière provient usuellement de transitions optiques entre des niveaux de la bande de conduction et des niveaux de la bande de valence. Pour réaliser un laser, il faut amener suffisamment d'électrons dans la bande de conduction pour obtenir l'inversion de population. Ce déséquilibre thermodynamique peut être obtenu, par exemple, dans des jonctions p-n (côté p : défaut d'électrons / côté n : excès d'électrons). Au niveau de la jonction se crée une zone de charge d'espace de dimensions réduites, vide de porteurs de charges mobiles, et donc très résistive. Toute tension appliquée sur la jonction se concentre dans cette très petite partie du cristal et, de fait, on peut créer dans la zone de charge d'espace un déséquilibre thermodynamique très intense, permettant d'atteindre l'inversion de population. En appliquant une tension, on abaisse le champ interne et donc la barrière de diffusion, permettant l'apparition d'un courant de diffusion d'électrons de conduction et de trous de valence dans la zone de charge d'espace ; on se retrouve avec des électrons et des trous au même endroit dans la zone centrale : la recombinaison radiative est donc possible. Une autre stratégie pour obtenir l'inversion de population consiste à recourir non pas à une jonction p-n, mais à des hétérostructures, en général des puits quantiques. Les structures types puits quantiques sont obtenues par l'empilement de trois couches, deux couches de grand *gap* de chaque côté d'une couche de bande interdite plus faible. Ceci crée un puits de potentiel, à la fois pour les électrons de conduction et les trous de la bande de valence. Ces hétérostructures permettent notamment d'accroître le gain, en créant un véritable « entonnoir » pour les électrons et les trous, et en formant des zones actives de dimensions encore réduites.

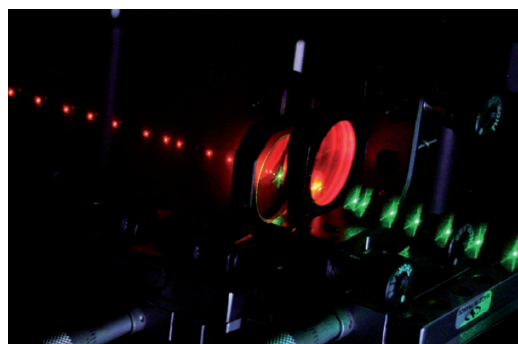
Un tel milieu à gain émet facilement de la lumière lorsqu'on le pompe avec un courant électrique : on obtient alors une diode électroluminescente. Pour observer un effet laser, il faut atteindre l'inversion de population (il suffit de pomper plus fort) et utiliser une cavité. Souvent dans les diodes lasers, il est inutile de rajouter des miroirs pour réaliser cette inversion : on utilise simplement les faces opposées du cristal semi-conducteur, à l'interface entre le cristal et l'air (le fort contraste d'indice produit des coefficients de réflexion assez importants). On forme ainsi des lasers rubans (fig. a). Une autre approche consiste à entourer le milieu actif par deux miroirs plans, usuellement des miroirs de Bragg. Ces derniers, formés d'un empilement périodique adéquat de couches semi-conductrices d'indices de réfraction différents, utilisent des processus interférentiels pour réfléchir la lumière. On forme alors des lasers à cavité verticale et émission par la surface (ou VCSEL, acronyme anglais de Vertical Cavity Surface Emission Laser, fig. b).

## 4 Les lasers à colorants

Dans les lasers à colorants, le milieu amplificateur est souvent (mais pas toujours, voir photo) liquide. Il est composé d'une solution que l'on enferme dans une cuve de verre et qui contient des molécules organiques de colorants. On place ensuite la cuve de verre dans une cavité optique, formée de deux miroirs. Pour l'excitation, c'est une autre affaire : les molécules de colorant diluées dans l'alcool sont bien incapables de conduire correctement le courant électrique, et le pompage se doit donc d'être optique.

Les lasers à colorants émettent principalement dans le visible. Le principal avantage de ce type de laser, qui a fait leur succès, est leur très large plage d'accordabilité en longueur d'onde. Tout d'abord, il existe une quantité énorme de molécules colorantes émettant chacune dans une plage de couleur donnée : il suffit de choisir la bonne molécule pour avoir la couleur souhaitée... Mais le plus intéressant n'est pas là. Chaque molécule a, en effet, le pouvoir d'émettre plusieurs longueurs d'onde : cela vient du fait que, contrairement aux atomes des lasers à gaz, les molécules complexes de colorant dans un liquide possèdent de très nombreux niveaux d'énergie (correspondant aux différents états de rotation-vibration des molécules), très proches les uns des autres. L'effet laser peut avoir lieu entre n'importe lesquels de ces niveaux, ce qui fait que différentes couleurs sont susceptibles d'être émises. La longueur d'onde d'émission est ensuite sélectionnée par la cavité laser, par exemple en utilisant un réseau de diffraction comme miroir.

Les molécules organiques utilisées dans les lasers à colorants ont tendance à se dégrader rapidement sous excitation lumineuse : avec un milieu solide (colorant emprisonné dans une matrice de polymère par exemple), le laser possède donc une durée de vie courte (quelques heures de fonctionnement si aucune précaution spécifique n'est prise). On peut néanmoins obtenir un fonctionnement durable en déplaçant régulièrement le milieu à gain, ce qui permet d'évacuer les molécules rapidement de la zone de pompage (par exemple, *via* l'utilisation d'une circulation si le colorant est dans un milieu liquide).



**Exemple de laser pulsé à colorant solide.** En vert, le laser de pompe, et, en rouge, le faisceau laser produit par une couche d'épaisseur micrométrique de polymère, dopé avec de la rhodamine. © LPL, S. Forget