

Les lasers

PETIT POINT SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE SUR LA TECHNOLOGIE LASER



par Paul COADOUR
Maître Jedi du sabre laser.

On vous explique
tout ou presque

Chacun a entendu parler du laser, mais il reste bien mystérieux ! Ses pouvoirs font rêver mais quelle est la véritable puissance de son faisceau ? Les films à succès en ont fait une arme mais il peut aussi soigner, mesurer, communiquer etc... avec une grande précision.

Un peu d'histoire

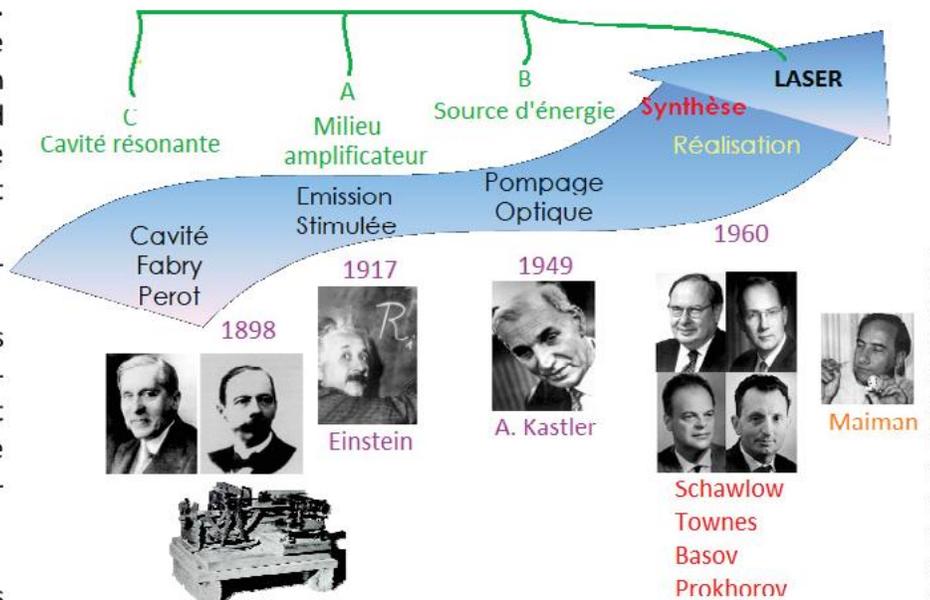
Le mot laser est un acronyme anglais « Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation », dont la traduction littérale est amplificateur de lumière faisant appel à l'émission stimulée. Son principe fondamental a été découvert par Albert Einstein en 1917. Il a fallu près de cinquante ans pour que le premier faisceau laser soit réalisé, en 1960, par le physicien Theodore Harold Maiman, en s'appuyant sur les idées de ses compatriotes Charles Hard Townes et Arthur Leonard Schawlow.

La recherche des physiciens du monde entier a permis d'écrire l'histoire du laser. En 1952, Townes ainsi que les Soviétiques Nikolaï Guennadievitch Bassov et Alexandre Mikhaïlovitch Prokhorov avaient proposé le principe du maser, qui porte sur les micro-ondes alors que le laser porte sur les longueurs d'onde optiques.

Le laser est donc directement issu des études sur la physique quantique et de

l'observation des divers rayonnements existants dans l'univers.

Le laser est incontestablement l'une des inventions majeures du XXe siècle.



De multiples lasers pour des utilisations innombrables

Il existe des lasers de toutes sortes qui peuvent émettre la lumière de façon continue, ou par impulsions, de toutes les « couleurs » et notamment à des longueurs d'onde que nos yeux ne perçoivent pas (l'infrarouge par exemple). Il en existe de très faible puissance (milli Watt) pour lire les codes barre ou les CD et autres DVD, mais aussi de très forte puissance (kilo Watt) qui peuvent par exemples graver, découper ou souder des métaux. D'autres encore sont utilisés comme des scalpels pour découper la cornée d'un patient malade, lui opérer l'intérieur de l'œil puis refermer (« souder ») la cornée.

Les lasers peuvent aussi bien émettre un faisceau continu que fonctionner en régime impulsif, auquel cas on pourra les qualifier également selon la durée caractéristique de leurs impulsions (lasers continus / lasers picosecondes / lasers femtosecondes ...). Les lasers peuvent aussi être classés par familles, en fonction de la nature du milieu excité.

LASERS À GAZ : Le milieu amplificateur des lasers à gaz est constitué soit par un gaz pur (laser à azote, laser à krypton ionisé, laser à argon ionisé), soit par un mélange de gaz (laser He-Ne, laser à CO₂), soit par un métal chauffé à l'état de vapeur (laser à vapeur de cuivre). On peut également citer les lasers chimiques HF/DF (Hydrogène-Fluor ou Deuterium-Fluor) qui émettent dans l'infrarouge et les lasers excimères (ArF, KrF, XeCl, XeF...) émettant dans l'ultra-violet.

LASERS À COLORANT (LIQUIDE) : Le milieu amplificateur est un liquide coloré. Ils sont peu pratiques à cause du remplacement régulier du colorant (souvent toxique) et de leur pompage (apport d'énergie) qui doit souvent se faire par un autre laser. Néanmoins, leur intérêt majeur est leur accordabilité (tout le spectre visible peut être balayé).

LASERS SOLIDES : C'est la catégorie de lasers la plus diverse et répandue. Pour le milieu amplificateur de ceux-ci, on emploie soit des verres, sous forme massive (« morceaux ») ou de fibre optique (sorte de « fil » de verre), soit des cristaux qui peuvent être optiques (transparents) ou semi-conducteurs. Le premier laser réalisé fut un laser à solide à base de rubis ! Dans la catégorie des cristaux optiques, on peut citer comme exemples le laser Nd : YAG (acronyme anglais : neodymium-doped yttrium aluminium garnet) et le laser Ti :Sa (Titane Sapphire).

Dans le cas des lasers à fibre, le milieu amplificateur est une fibre optique dopée avec des ions de terres rares (Ytterbium, Erbium, Néodyme). De plus, ce sont des réseaux de Bragg photo-inscrits dans une fibre qui jouent le rôle des miroirs de cavité et le pompage est généralement réalisé à l'aide de diodes laser elles-mêmes fibrées.

Les lasers à fibre les plus connus sont ceux de forte puissance (impulsionnels) utilisés dans l'industrie pour le marquage ou la découpe de matériaux. Il existe néanmoins des lasers à fibre infrarouges et visibles continus pour des applications allant de l'ophtalmologie (photocoagulation rétinienne avec un laser à fibre continu jaune de quelques Watts) jusqu'au refroidissement d'atomes de Rubidium (un laser à fibre continu émettant dans l'infra-rouge à 780 nm).



Les diodes laser sont des lasers à semi-conducteurs. Le milieu amplificateur est un semi-conducteur (par exemple l'arséniure de gallium GaAs). Le pompage est réalisé par le passage d'un courant électrique. La cavité est obtenue par simple clivage du matériau semi-conducteur rendant la face de sortie partiellement réfléchissante. Le résultat est un laser très compact (la partie émettrice est de l'ordre du micron), peu coûteux à fabriquer et facilement contrôlable par le courant électrique. C'est le type de laser le plus commun, que l'on trouve dans les lecteurs de DVD, les imprimantes ou les pointeurs. À noter que les lasers à semi-conducteurs sont aussi utilisés comme excitateurs (on parle de pompage à diode) dans les lasers à fibre optique par exemple.

LASERS À IMPULSIONS ULTRA-BRÈVES : souvent basés sur un milieu amplificateur solide, sont des dispositifs qui délivrent des impulsions laser ultra-puissantes et ultra-brèves comme par exemples les lasers pico-seconde, nano-seconde ou femtoseconde. Ils permettent de produire en un temps très court des puissances gigantesques (plusieurs milliards de Watts) sur des tailles de faisceau très petites.

À la diversité des lasers correspond une diversité encore plus grande de leurs applications ; par exemples : télé-détection, traitements ophtalmologiques, découpe de tissus, mesure précise de distances, détection de polluants atmosphériques, holographie, communications par fibres optiques, imprimantes lasers, et aussi, la fusion nucléaire contrôlée (le laser Megajoule).

Principe de fonctionnement

Pour créer de la lumière laser, il faut **trois éléments** :

- **un milieu amplificateur** (ou milieu actif) : du gaz, du liquide ou des solides qui, sous certaines conditions, ont la propriété d'amplifier la lumière,
- **une source d'énergie** (nommée aussi pompage) qui permet d'apporter de l'énergie au milieu amplificateur (électricité ou lumière),
- **un résonateur optique**, ou cavité, qui permet de piéger entre deux miroirs la lumière suivant une direction unique et produire le faisceau laser (lumière cohérente amplifiée).

Le milieu amplificateur (gaz, liquide, solide) est placé dans un résonateur composé de deux miroirs placés face à face.

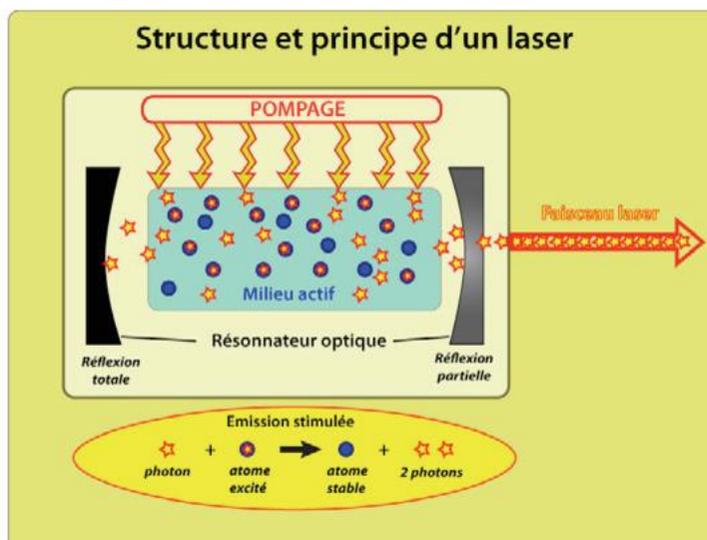


Schéma de principe d'un laser

Le milieu amplificateur est excité par l'apport d'énergie. Sous l'effet de cette excitation, il va émettre des photons (« particules » de lumière) dans toutes les directions de l'espace. Les photons émis suivant l'axe formé par les deux miroirs vont être réfléchis par le premier miroir (totalement réfléchissant), vont repasser dans le milieu amplificateur pour être multipliés à chaque passage.

Cet effet d'amplification de la lumière est dû au phénomène physique de « l'émission stimulée » prédit par Einstein. Ce phénomène n'est possible que dans certains matériaux lorsqu'ils sont excités. On leur apporte de l'énergie et ils restituent une partie de cette énergie sous forme de lumière.

Les atomes possèdent des niveaux d'énergie différents et peuvent passer de l'un à l'autre, un peu comme on monte ou descend d'une échelle, en absorbant ou en émettant de l'énergie, sous forme de chaleur, de vibrations ou de photons. Certains atomes excités reviennent spontanément

vers leur état fondamental en émettant un photon dans n'importe quelle direction de l'espace : c'est la fluorescence. Cette désexcitation peut être provoquée par la rencontre de l'atome excité avec un photon adéquat, le photon émis a alors les mêmes propriétés que le photon initial : c'est l'émission stimulée.

En continuant à apporter de l'énergie au milieu amplificateur, les photons piégés dans le résonateur optique vont se multiplier à l'infini. Une partie des photons passe à travers l'un des deux miroirs du résonateur (miroir semi-réfléchissant) et sort de la cavité en formant ce que l'on appelle faisceau laser.

Pour une analogie grossière, on peut prendre l'exemple de la guitare acoustique. Le doigt du guitariste apporte de l'énergie à une corde qui, en entrant en vibration, va produire un son. Cette note va être amplifiée dans la caisse de résonance de la guitare et, en sortant par la rosace, venir ravir vos oreilles de mélomane.

Lumière versus laser

COMPARAISON DE LA LUMIÈRE ORDINAIRE ET DE LA LUMIÈRE LASER

La lumière « classique » est



La lumière laser est

de plusieurs couleurs :

La lumière émise est composée de toutes les couleurs de l'arc-en-ciel (et même au-delà !)

Monochromatique :

La lumière laser est (le plus souvent) composée d'une seule longueur d'onde

Multidirectionnelle :

Les ondes lumineuses se propagent dans toutes les directions de l'espace

Unidirectionnelle :

Le faisceau laser est étroit, peu divergeant et dirigé dans une seule direction

« Désordonnée » :

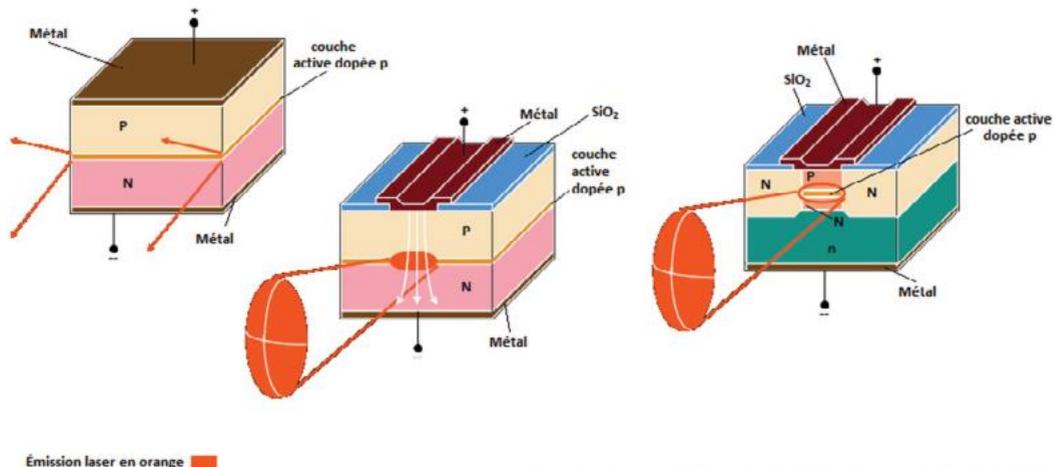
Les différentes ondes sont émises à des moments différents. Elles sont totalement indépendantes les unes des autres

Cohérente :

Les différentes ondes sont « en phase »

Il est possible de comparer la lumière laser à une armée de soldats marchant au pas cadencé et la lumière classique à une foule de personnes se déplaçant au hasard.

Comme tout laser, une diode laser fonctionne à l'aide d'un milieu amplificateur (amplification dans les semi-conducteurs par émission stimulée), d'une structure résonante (par exemple, une cavité de Fabry-Pérot : interféromètre optique constitué de deux surfaces partiellement réfléchissantes planes à hauts coefficients de réflexion) et d'un processus de pompage (courant électrique). Le faisceau laser émis est de forme ovoïde, donc beaucoup moins directif que les autres types de lasers.



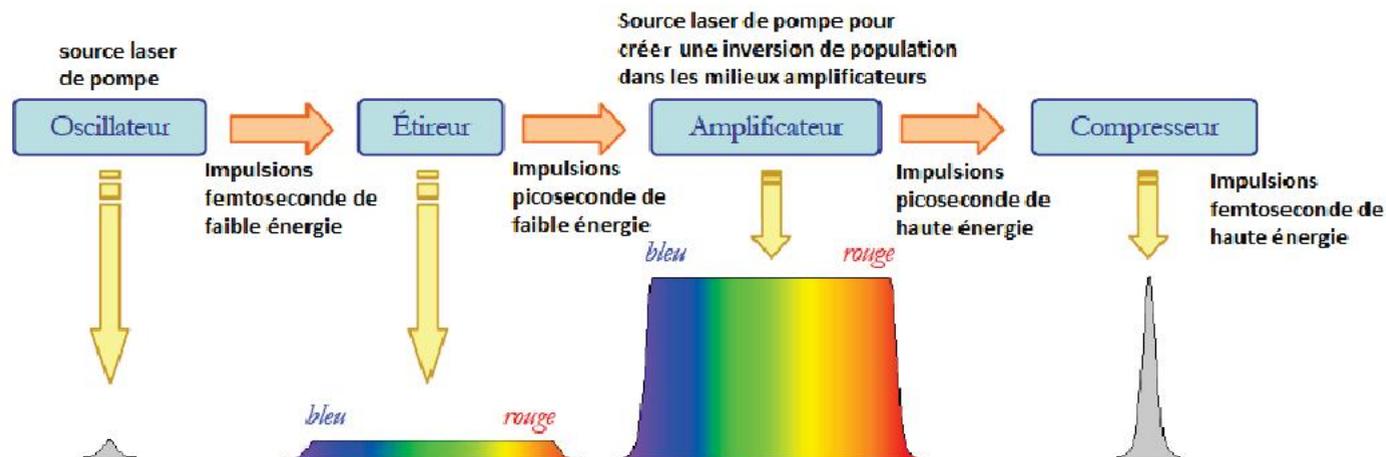
Copyright - Sébastien Forget / Laboratoire de Physique des Lasers / Université Paris Nord

Architectures des diodes lasers

Une diode laser est une jonction de semi-conducteurs. Elle possède trois zones caractéristiques :

- une couche de confinement de type N (dopée avec des atomes donneurs d'électrons),
- une zone active,
- une couche de confinement de type P (dopée avec des atomes accepteurs d'électrons).

Les couches de confinement permettent d'optimiser l'utilisation du courant dans la diode et d'augmenter le rendement. La zone active est formée d'un guide d'onde encadrant le lieu de l'émission laser : matériau massif ou quantique (puits, boîtes ou fil).



L'intérêt majeur des impulsions femtosecondes est une puissance crête très élevée car l'énergie apportée par la pompe (souvent continue) se trouve concentrée pendant des durées très brèves. La puissance crête fournie par une impulsion est définie par son énergie divisée par sa durée. Dans le cas d'impulsions très courtes (femtoseconde), il est impossible d'augmenter suffisamment l'énergie d'une impulsion sans atteindre rapidement les seuils d'ablation des matériaux et donc de détruire le milieu amplificateur. La solution, exploitée à ce jour, est la méthode CPA (Chirped Pulse Amplification - amplification d'impulsions étalées spectralement).

Principe d'une chaîne laser femtoseconde

La méthode du CPA comporte trois étapes :

Étirement : L'impulsion est d'abord étendue temporellement par un facteur de 103 à 105. Cette étape ne change pas l'énergie de l'impulsion d'entrée mais cela abaisse l'intensité d'entrée par le facteur d'étirement.

Amplification : L'impulsion est amplifiée par un facteur de 6 à 12, c'est-à-dire du nJ au kJ.

Compression : L'impulsion est finalement recompressée par le même facteur d'étirement à une durée proche de sa valeur initiale.

Laser : la course à la puissance

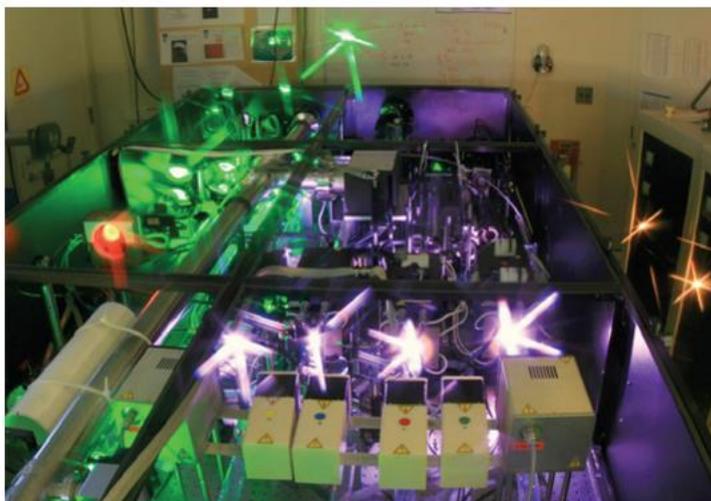
La puissance, mesurée en watt, est l'énergie (Joule) délivrée par unité de temps (seconde).

1 watt = 1 Joule / seconde

Si les lasers « basse puissance » (de l'ordre du milliWatt) sont largement utilisés (pointeur laser, lecteur CD ...), la recherche pousse toujours plus loin pour atteindre des valeurs maximum de puissance.

De 1972 à 1985, les puissances crêtes maximales disponibles des lasers ont progressé rapidement, puis ont plafonné autour du térawatt (10¹² watts). La durée des impulsions s'est réduite, mais l'amplification des impulsions brèves reste limitée à de faibles énergies en raison des effets non-linéaires destructeurs (autofocalisation par exemple) provoqués par la présence de fortes intensités dans les matériaux amplificateurs.

L'apparition en 1985 de la méthode de l'étirement de l'impulsion par dérive de fréquence (CPA pour chirped pulse amplification) a permis de franchir une étape importante en accroissant de plusieurs ordres de grandeur la puissance délivrée en sortie de chaîne laser. Le principe de cette méthode consiste à allonger temporellement l'impulsion, à l'amplifier en respectant les intensités admissibles par les matériaux traversés et enfin à la recomprimer temporellement (laser femtoseconde par exemple). De nouveaux champs de recherche en physique se sont alors ouverts : interaction laser-matière, production de matière dense d'intérêt astrophysique, accélération de particules, fusion thermonucléaire contrôlée, production de sources de rayonnement X ultra-brèves et intenses, etc.



Le laser Hercules avec lequel une puissance équivalente à celle de l'énergie du Soleil reçue par la Terre a été obtenue.

Le Laboratoire pour l'Utilisation des Lasers Intenses (LULI), unité mixte CNRS-Ecole polytechnique à Palaiseau, vient

de développer une nouvelle chaîne laser à impulsions brèves et intenses. Ce laser délivre d'ores et déjà une puissance par impulsion de 13 000 milliards de watts (13 térawatts).

Dans les années à venir, Thales va développer un nouveau laser intense d'une puissance record pour l'Institut National de Recherche Roumain. Le système laser proposé fournira une puissance record de 2 fois 10 petawatts (soit 20 millions de milliards de watts) sur impulsion ultra-courte. Ce type de laser ouvre la voie à de nouvelles générations d'accélérateurs de particules très puissantes, moins encombrantes et moins coûteuses, destinées à la recherche fondamentale en physique des matériaux et pour des applications médicales.

Attention aux chiffres tout de même ! Ces lasers d'un nouveau genre ne sont pas des centrales électriques. Leur puissance gigantesque est liée au fait que l'énergie est libérée dans des temps très courts, de l'ordre de quelques dizaines de femtosecondes (10⁻¹⁵ s).

En un clin d'œil, 100 000 milliards de femtosecondes s'écoulent.

Pourtant, cette concentration brève et très locale d'énergie suffit à rendre possibles des projets dignes de la science-fiction : thérapies contre le cancer, transmutation des éléments radioactifs en d'autres moins dangereux, fusion de noyaux atomiques pour une nouvelle source d'énergie, déclenchement de la foudre, ou encore simulation d'étoiles et de cœurs de planète en laboratoire ...

Le laser, la lumière qui illumine l'avenir

L'avenir prouvera que de nombreux problèmes ont été résolus grâce au laser et que les réalisations ont atteints les rêves des premiers temps (télécommunications, fusion par laser, bistouri laser ...). Ce qui ne semblait qu'un encombrant « joujou » pour les chercheurs, est aujourd'hui unanimement cité parmi les inventions majeures du siècle dernier, au plan de la physique comme au plan des applications. Le laser a maintenant atteint une maturité qui lui ouvre des domaines très variés et de plus en plus larges : traitement des matériaux, biomédical, instrumentation et mesure, show laser ...

Bonus

Les sabres lasers de Star Wars sont-ils possibles ?



Obtenir une lumière de la forme d'un sabre et matériellement « solide » comme les sabres lasers de Star Wars est probablement impossible. La solution qui serait la plus admissible, mais encore difficile à mettre en œuvre serait peut-être l'utilisation d'un plasma ...

Mais on a jamais dit que ce n'était pas possible dans une galaxie "far, far away"...

Références

© Cours laser : Les lasers et leurs applications par Sébastien Forget, Maître de Conférences, Laboratoire de Physique des Lasers et Université Paris Nord

© Cours laser : Le laser, une solution sans problème ? par Sébastien Forget, Maître de Conférences

© Le Journal de la Science : Des chercheurs inventent un laser révolutionnaire, par Nicolas Revoy, vendredi 29 mars 2013

<http://www.journaldelascience.fr/physique/articles/laser-ican-2987>

© Le Monde Science et Techno : Lasers : les feux de l'extrême, par David Larousserie, le 03 juin 2013

<http://www.lemonde.fr/sciences/article/2013/06/03/>

© Le laser et ses applications, 50 ans après son invention, sous la direction de Pascal Besnard et Pierre-Noël Favennec, aux éditions Lavoisier