Le Laser

De l'invention inutile à l'outil indispensable

Charles Hirlimann
Directeur de recherche émérite CNRS @IPCMS
Institut de physique et chimie des matériaux de Strasbourg
23 rue du Lœss, BP 43, 67034 Cedex2, Strasbourg, France

Le LASER est l'objet quantique le mieux connu et pourtant il reste mal compris du grand public. Ce texte essaye d'en expliquer en mots simples les mystères, sur la trame de l'historique de son invention et de montrer la variété des applications qu'il a permises. Le rôle de la France à travers Alfred Kastler sera présenté et le propos sera émaillé de souvenirs de l'auteur dans le domaine des lasers à impulsions lumineuses ultra-courtes.

Quelques principes physiques

Le mot LASER est l'acronyme anglais « light amplification by stimulated emission of radiation », amplification de la lumière par émission stimulée de radiation. Il est l'objet quantique que nous côtoyons le plus.

À la fin du XIXe siècle, la science de l'électricité a permis de comprendre la nature ondulatoire de la lumière. La lumière est de même nature que les ondes Hertziennes, les ondes radio, sa longueur d'onde associée ne vaut que de ½ micron environ au lieu de quelques dizaines de cm pour les ondes de la radio. Par contre, la science reine de l'époque, la thermodynamique, la science qui régit les échanges chaleurs <-> énergie mécanique, la science des machines à vapeur, a piteusement échoué à comprendre la relation qui relie la température d'un objet et sa couleur. Elle ne permet pas d'expliquer pourquoi le fer à cheval du forgeron passe du blanc au sortir de la forge au rouge sombre en refroidissant.

De cet échec va naître, pendant le premier quart du XXe siècle, la mécanique quantique qui fournit le cadre conceptuel nécessaire à la compréhension du fonctionnement des lasers.

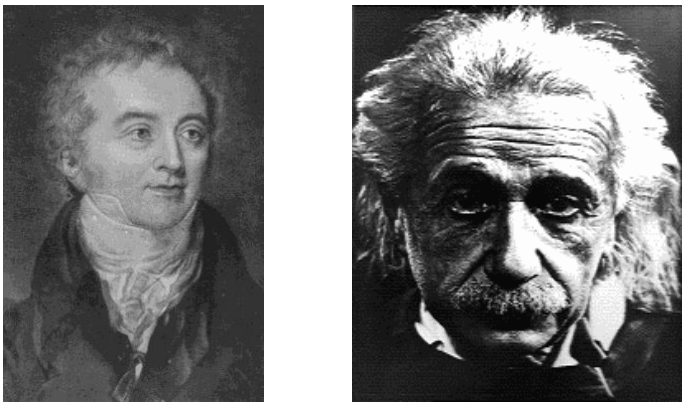

Figure 1. à gauche: Tomas Yung (1773-1829) démontre, en 1801, la nature ondulatoire de la lumière ; à droite : Albert Einstein (1875-1955) démontre, en 1905 la nature corpusculaire de la lumière.

En 1801, Thomas Young, le savant anglais qui a été un moment en concurrence avec Jean-François Champollion sur le déchiffrement des hiéroglyphes égyptiens, démontre expérimentalement la nature ondulatoire de la lumière à travers une superbe expérience d'interférence par l'éclairement de deux fentes fines. Patatras, cent ans plus tard, Albert Einstein, comprent l'effet photoélectrique, où de la lumière éclairant un métal produit une tension électrique. Il découvre que la lumière est constituée de « grains » d'énergie qu'il nommera photon. C'est pour ce travail, publié en 1905, qu'il obtiendra le prix Nobel de physique.

On notera que la longueur d'onde du rouge (800 nm) est le double de celle du bleu (400 nm). On sait, par ailleurs, que plus la longueur d'onde est petite plus est grande l'énergie transportée par le photon qui lui est associé (voir la Figure 2).

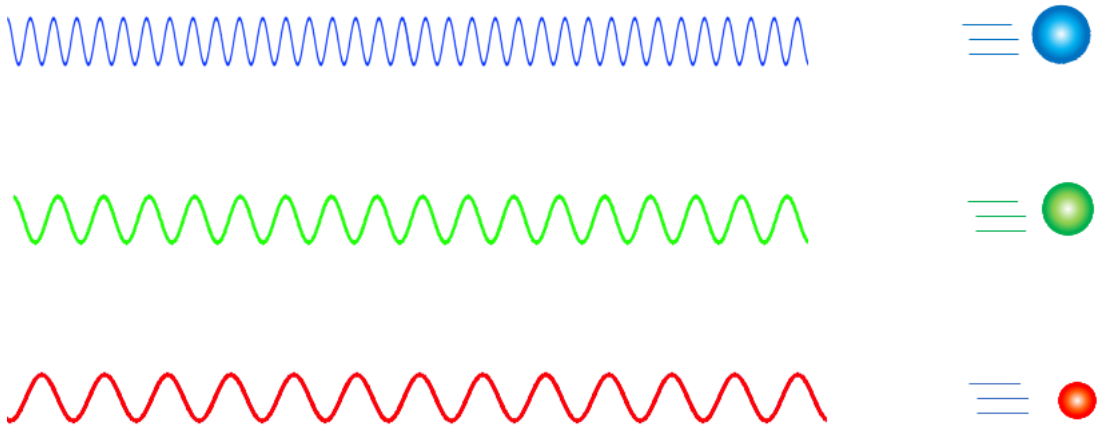

Figure 2. La lumière est à la fois une onde et une particule. Les ondes de la lumière s'étendent du bleu (400 nm) au rouge à la longueur d'onde doublée (800 nm). L'énergie des photons associés varie en sens inverse : l'énergie transportée par un photon bleu est le double de celle transportée par un photon rouge.

Un point spectaculaire de la construction de la mécanique quantique a été la proposition par Louis de Broglie, dans sa thèse, soutenue en 1924, qu'il est, comme pour la lumière, nécessaire d'associer une « onde » aux particules de matière[1]. La figure 3 représente, au centre, un atome d'hydrogène, soit de manière simplifiée, un proton de charge positive autour duquel tourne un électron de charge opposée, comme la Terre tourne autour du Soleil, c'est le modèle planétaire (Rutherford) qui était jusqu'alors accepté pour décrire les atomes. Deux « orbites » sont représentées, une de basse énergie et une de plus haute énergie. Les électrons ne peuvent pas avoir n'importe quelle énergie on dit que leur énergie est **quantifiée**. Les interactions lumière-matière se font par changement d'orbite des électrons avec émission d'un photon emportant la différence d'énergie entre les niveaux quand l'électron passe de l'orbite haute à l'orbite basse ; à contrario pour qu'il passe de l'orbite basse à l'orbite haute il lui faut acquérir l'énergie d'un photon qui disparaît.

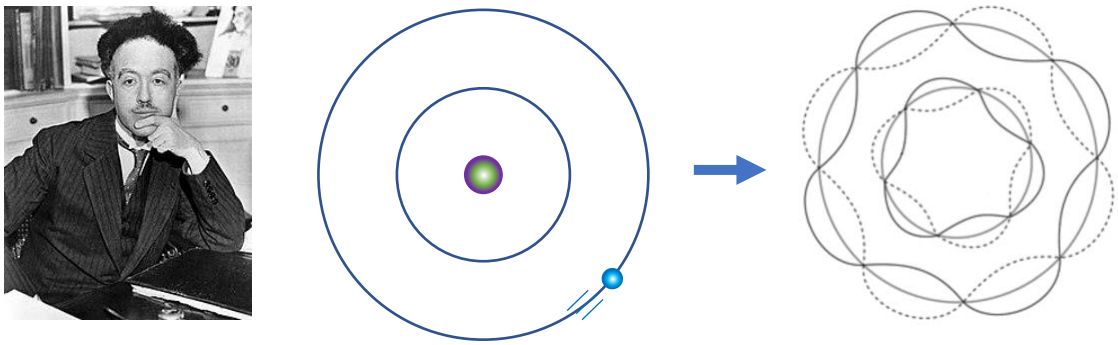

Figure 3. Louis de Broglie (1892-1987) a introduit l'idée unificatrice que si un corpuscule était associé à l'onde de la lumière alors par symétrie on doit avoir une onde associée aux corpuscules matériels (électron, proton).

La partie à droite de la Figure 3 montre la conception Broglienne de l'atome d'hydrogène, l'électron est représenté par une onde centrée sur l'orbite. On voit bien que, pour que cela fonctionne, il faut qu'il y ait un nombre entier d'oscillations de l'onde sur la circonférence de l'orbite. Par cette démarche de Broglie avait trouvé l'explication de la quantification de l'énergie des électrons dans les atomes !!

[1] L'observation de l'onde des électrons valu à G. Thomson et J. Davisson le prix Nobel 1937.

Que faut-il pour faire un laser ?

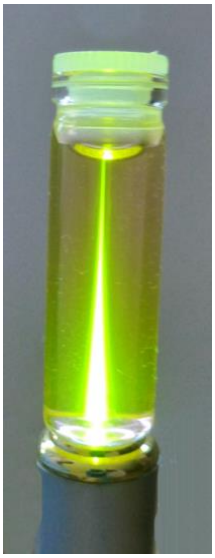

Figure 4. Luminescence Jaune d'éosine dans l'eau

Le premier ingrédient nécessaire à la réalisation d'un laser est un milieu matériel qui émette de la lumière lorsqu'on fournit de l'énergie à ses électrons. La Figure 4 montre un flacon contenant une minuscule goutte d'éosine dissoute dans de l'eau. Dans cette expérience le faisceau de lumière verte d'un pointeur laser pénètre le milieu, par le fond du flacon, fournissant de l'énergie aux électrons des molécules d'éosine. Les molécules évacuent cette énergie sous la forme d'une émission de lumière jaune intense. L'augmentation de longueur d'onde observée montre qu'il y a une perte d'énergie (sous forme de chaleur) dans le processus. On trouve aussi une forte luminescence dans les tubes dits « néons », mais cette fois c'est un gaz qui est excité par une décharge électrique à haute tension. La couleur de la lumière émise dépend de la nature du gaz : bleu-vert pour l'argon, jaune pour le sodium…

Dans ce processus de luminescence la perte d'énergie des électrons avec émission de lumière se fait de manière aléatoire, on parle d'*émission spontanée de lumière*. On ne sait pas à quel moment une molécule va se désexciter, mais on sait mesurer le temps moyen que leur assemblée va mettre pour perdre toute son énergie.

Le second ingrédient nécessaire est un autre effet découvert lui aussi par Albert Einstein en 1905, l'*émission de lumière stimulée*. Dans un milieu où les électrons ont acquis de l'énergie par une excitation extérieure, un photon émis lors de la perte d'énergie d'un électron peut provoquer la désexcitation d'un autre électron déclenchant l'émission d'un photon identique au photon incident. Cet effet est schématisé sur la Figure 5. Dans cet effet, les deux photons résultants sont strictement identiques, on parle de *photons jumeaux*, il se propagent dans les mêmes sens et direction, ils ont la même « couleur », toutes leurs propriétés sont identiques. Cet effet quantique est le mécanisme au cœur du fonctionnement des lasers.

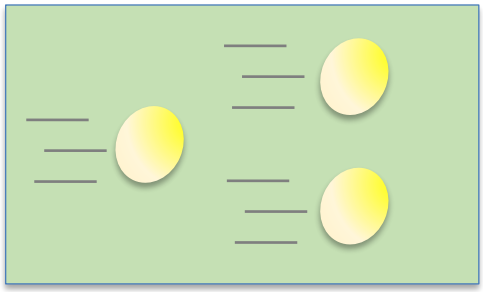

Figure 5. Représentation schématique de l'émission stimulée de lumière. Un photon déclenche la désexcitation d'un électron avec l'émission d'un photon qui lui est identique.

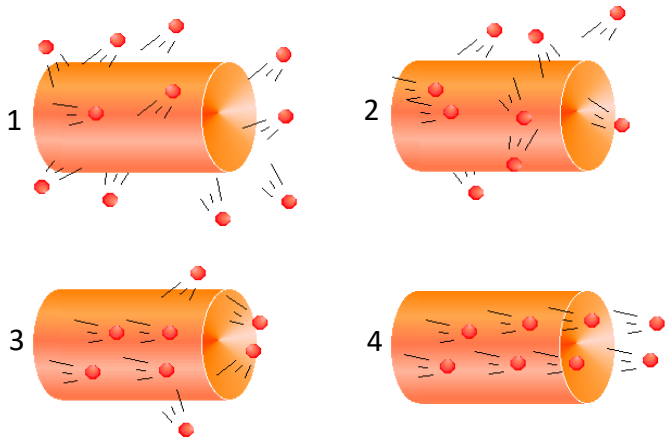

Figure 6. Schéma de l'amplification par émission stimulée.

Le troisième ingrédient nécessaire est décrit sur la Figure 6 qui montre un milieu où les électrons ont gagné de l'énergie. 1) des photons sont émis dans toutes les directions 2) un photon à gauche déclenche la création d'une paire de photons jumeaux. 3) les photons jumeaux déclenchent à leur tour des photons jumeaux et le nombre de photons semblables croit exponentiellement. Cet effet, *d'émission spontanée amplifiée*, se produit dans toutes les directions de l'espace, mais on voit qu'il est le plus fort dans la direction de la plus grande longueur du milieu amplificateur.

La question qui se pose alors est de savoir comment produire un milieu amplificateur, un milieu dans lequel une population, la plus grande possible, d'électrons possèdent l'énergie nécessaire pour créer des photons en se désexcitant. La réponse est venue d'Alfred Kastler.

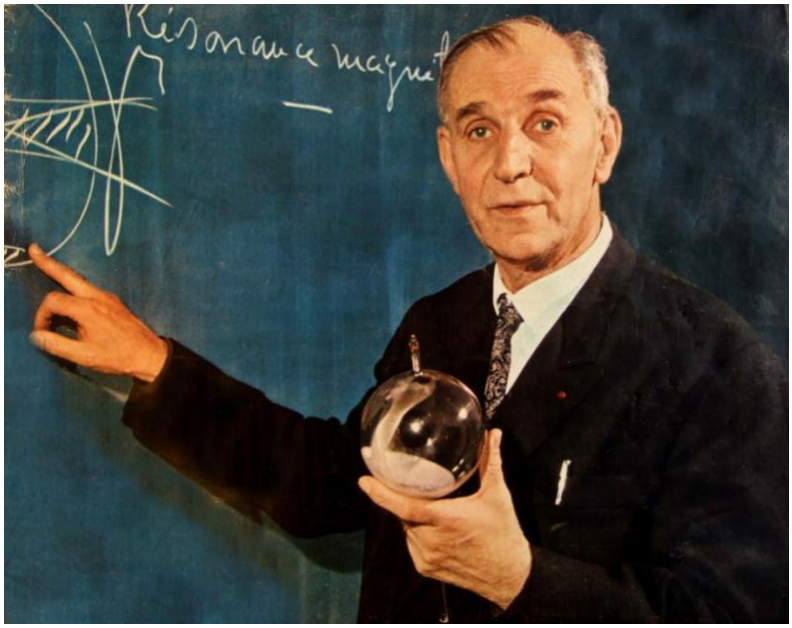

Figure 6. Alfred Kastler, Guebwiller 1902 - Paris 1984 pendant un cours sur la résonance magnétique.

Pour que le mécanisme de génération de photons jumeaux soit efficace, il faut fournir en permanence de l'énergie aux électrons et trouver des systèmes dans lesquels les électrons excités ne retournent pas trop vite dans leur état de moindre énergie. Dans un milieu au repos la population d'électrons de basse énergie est supérieure à la population d'électrons d'énergie supérieure. On parle pour cela d'*inversion de population*.

Alfred Kastler est né à Guebwiller en 1902. Physicien des atomes, il obtint le prix Nobel de Physique en 1966 pour ses travaux sur l'inversion de population. L'inversion de population est le *quatrième* ingrédient essentiel au fonctionnement des lasers car il permet l'émission stimulée à grande échelle.

Alfred Kastler était un expérimentateur fondamental qui s'intéressait aux mécanismes d'interaction de

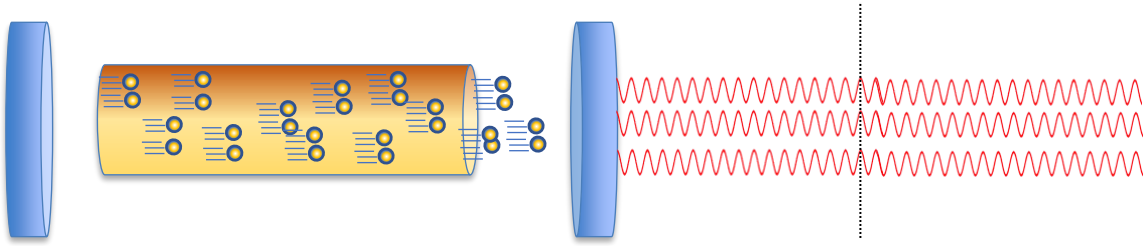

Figure 7. Schéma de principe d'un laser. Un milieu matériel, en inversion de population, permettant l'amplification de lumière par émission stimulée, est placé entre deux miroirs les plus réfléchissants possible. Les interférences qui se produisent entre les deux miroirs synchronisent complètement les rayons lumineux. Ce schéma souligne le caractère à la fois corpusculaire et ondulatoire du laser.

la lumière avec la matière. Bien que nommé « père du laser » par la presse française, il a toujours rejeté cette appellation. Il n'en reste pas moins que ses travaux ont été nécessaires à la compréhension profonde du fonctionnement des lasers[2][3].

---

[2] Sur le rôle de Kastler dans les débuts des lasers en France on peut lire : **https://hal.science/hal-03339484** (seul le titre est en anglais).

[3] J'ai eu le plaisir de suivre son cours de thermodynamique en 1967-1968 et de le côtoyer durant la semaine des prix Nobel de Lindau en 1972.

Le cinquième et dernier ingrédient nécessaire pour réaliser un laser est l'adjonction d'une paire de miroirs parallèles à l'extérieur du milieu excité. Pour faire simple, il suffit de dire que la paire de miroirs oblige la lumière à effectuer un grand nombre d'aller-retours dans le milieu d'amplification pour mettre « au pas » la génération des photons jumeaux. Un des miroirs est transparent à quelques % pour permettre l'émission d'un faisceau de lumière vers l'extérieur.
Toutes les descriptions des effets à l'œuvre dans un laser ont été faites jusqu'à maintenant sur le mode corpusculaire où la lumière est traitée comme un ensemble de photons. On voit ici apparaître l'obligation de tenir compte de son caractère *ondulatoire*. En effet lorsque l'on règle une paire de miroirs de sorte à être rigoureusement parallèles il se produit des choses bizarres. Cette paire de miroirs qui devrait être complètement opaque à la lumière devient transparente à une couleur particulière qui dépend de l'espacement entre les deux miroirs. La lumière qui se réfléchit entre les miroirs interfère avec elle-même et comme pour les orbites de de Broglie (voir plus haut) seules les couleurs qui ont un nombre entier d'oscillations comprise entre les deux miroirs peuvent y exister. Cette interférence est la cause de la parfaite synchronisation des ondes lumineuse produites par un laser.

Et le laser fut !

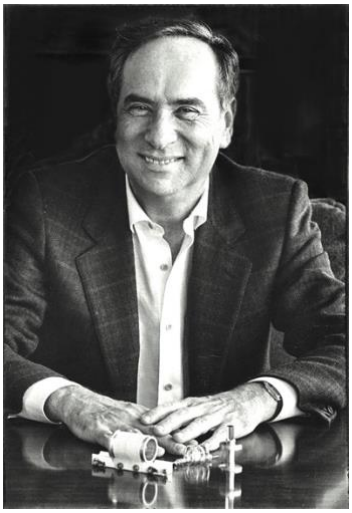

Figure 8.
Theodore Maiman 1927 - 2007

Figure 9. En rouge à droite, le barreau de rubis constituant le milieu actif placé dans la lampe flash hélicoïdale (à gauche). De l'aluminium était déposé sur les faces extrèmes et parallèles du barreau.

Le laser est né d'une compétition intense entre grands laboratoires de recherche industriels et académiques. Les laboratoires de recherche de la compagnie de téléphone AT&T, les « Bell labs » (d'après le logo de la compagnie en forme de cloche) se considéraient comme les mieux placés pour l'emporter. N'avaient-ils pas réalisé les premières télécommunications expérimentales par satellites ? Ils voyaient le laser comme un prolongement de leurs dispositifs émetteurs d'ondes radio, les masers qui émettaient des faisceaux intenses de micro-ondes utilisés pour les télécommunications.
Theodore Maiman travaillait lui dans les laboratoires de la compagnie Hughes Aircraft sur les hauteurs qui surplombent la plage de Malibu à Los-Angeles. Il avait mis au point un maser utilisant le rubis comme milieu actif. Il fut le gagnant de la compétition.

Le laser de Maiman était constitué d'un barreau cylindrique de rubis artificiel (alumine cristallisée contenant 6% d'impuretés chrome, 1,5cm x 1 cm). Un tube à décharge hélicoïdal, enveloppant le cristal, transférait sous forme de flash lumineux de l'énergie aux électrons des impuretés de chrome pour réaliser une inversion de population. Les miroirs de l'interféromètre de Fabry et Pérot étaient simplement constitués par le polissage optique parallèle des extrémités du barreau de rubis et le dépôt d'une mince couche d'aluminium. Le laser à rubis fonctionne en mode impulsionnel dans le rouge (694 nm).

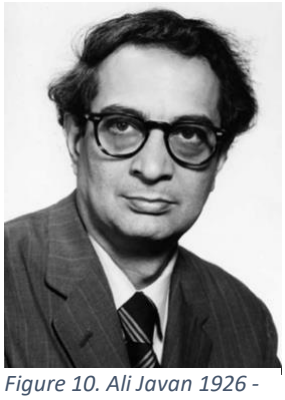

Figure 10. Ali Javan 1926 - 2016

C'était les temps bénis d'après la seconde guerre mondiale où les très riches grandes compagnies américaines avaient compris que leur capacité d'innovation dépendait de leurs investissements dans des recherches très en amont.

Ali Javan, des Bell labs a fait fonctionner 6 mois après Maiman le premier laser à gaz utilisant un mélange d'hélium et de néon émettant dans le rouge (632,8 nm). Ce laser fonctionne en mode continu. L'excitation du gaz est directement obtenue par décharge électrique.

Le laser une invention inutile…

L'invention du laser a fait l'objet d'un énorme battage médiatique au niveau international et les moqueries allaient bon train. On disait du laser qu'il était « une invention qui attend le problème à résoudre ».

L'illustration de la Figure 11 caricature le fantasme de « rayon de la mort » véhiculé par le laser. Ce phantasme était toujours vivace en 1983, lorsque le président des États-Unis-d'Amérique, Ronald Reagan, lança son initiative de défense stratégique qui pris rapidement le nom de « Guerre des Etoiles » car elle soutenait des programmes de recherche sur des armements laser.

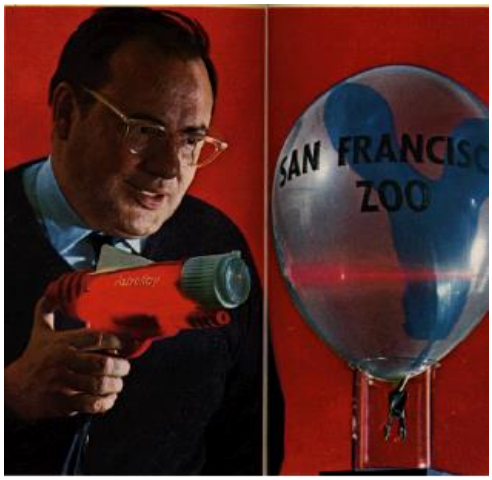

Figure 11. Un laser à rubis caricaturé en "rayon de la mort". La lumière rouge d'un laser à rubis passe à travers le ballon transparent mais elle est absorbée par le ballon bleu qui crève. Dr Shawlow ©Time-Life, 1966.

… devenue indispensable !

Très rapidement les lasers ont excité l'imagination des chercheurs et des ingénieurs qui ont su les faire émettre des faisceaux lumineux dans toutes les couleurs du spectre visible, et 60 ans plus tard les lasers sont partout. Le développement de l'électronique des semiconducteurs a permis la réalisation de lasers miniatures commandés électriquement à basse tension qui leur ont de se glisser dans nos environnements quotidiens : lecteurs CD/DVD, baladeurs. La caisse de supermarché fait que l'on côtoie très régulièrement des lasers. Des lasers à gaz plus puissants sont aussi abondamment utilisés dans certains spectacles.

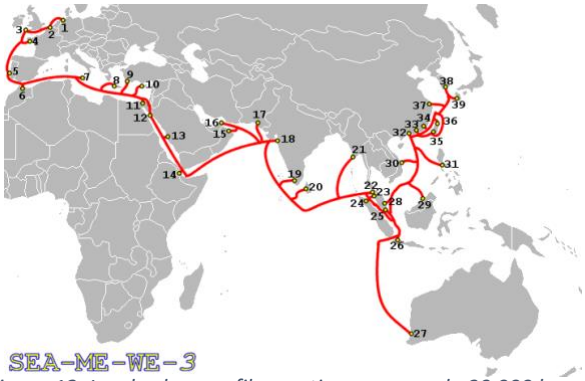

Figure 12. La plus longue fibre optique au monde 39 000 km .©J.P.Lon, CC BY 2.5, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2308375

Les diodes lasers ont pris une importance considérable dans les télécommunications par fibre optiques. La Figure 12 montre la carte du câble à fibres optiques le plus long du monde. Le signal qui se propage dans les fibres est engendré par des diodes lasers. Sachant qu'il faut régénérer les

impulsions lumineuses tous les 70 km environ à l'aide d'autres diodes lasers leur nombre se compte en milliers.

Figure 13. Laser de puissance infra-rouge utilisé pour usiner une pièce industrielle en acier.

Figure 14. Niveau laser permettant la réalisation précise d'alignements sur de grandes distances.

Les lasers sont aussi beaucoup utilisés dans l'industrie pour faire de la découpe, de la soudure, du marquage sur toutes sortes de supports (Figure 13). Mais à plus faible puissance ils sont utilisés pour faire de la métrologie (Figure 14). N'oublions pas que les « radars » portatifs utilisés par la police de la route utilisent eux aussi des lasers (ceux-là ne sont peut-être pas indispensables).

Très tôt l'ophtalmologie s'est emparé des lasers pour opérer dans les systèmes optiques que sont les yeux et réaliser des recollements de rétine par exemple. Avec le temps les techniques sophistiquées de « sculpture » par laser de la cornée ont permis la correction permanente de défauts de la vision, myopie, presbytie.

Figure 15. Chirurgien ophtalmologue intervenant à l'aide laser à impulsions courtes sur la cornée d'un patient pour corriger sa vision.

Toujours plus court.

Il est apparu très rapidement que les lasers permettent de produire des impulsions lumineuses d'une durée extrêmement courtes. Dans ce domaine la Figure 15 montre le premier laser qui a produit des flashs de 100 millionièmes de milliardièmes de seconde.

Pendant une durée d'une seconde (le temps d'un battement de cœur) la lumière parcourt la distance de la Terre à la Lune, en 100 millionièmes de milliardièmes de seconde elle n'a plus le temps que de parcourir l'épaisseur d'un cheveu ! De tels flashs de lumière ultracourts sont indispensables pour étudier les déplacements des électrons dans la matière.

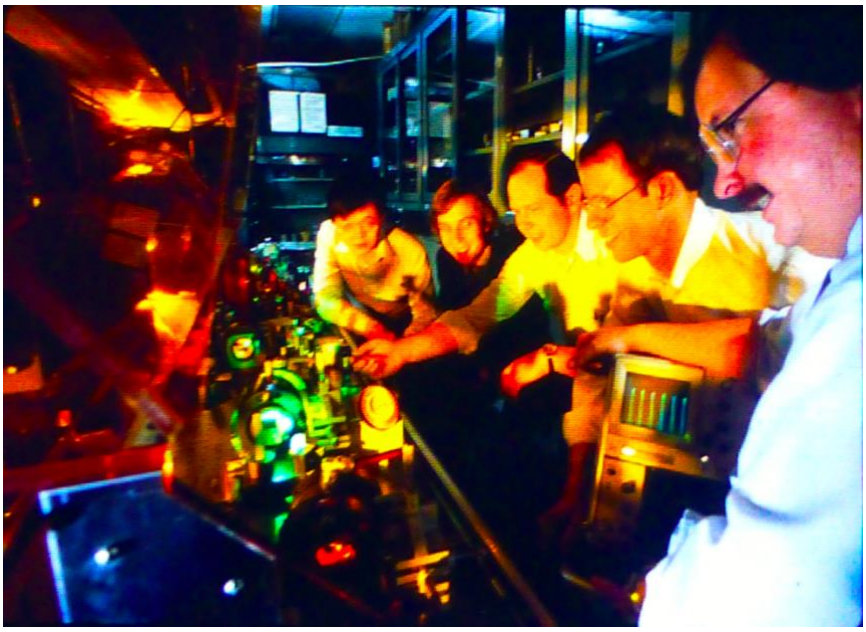

Figure 16. Le premier laser à impulsions lumineuses ultra-courtes. Au premier plan, Charles Shank, à l'arrière-plan droite l'auteur. © Bell-Labs Nokia.

Toujours plus puissant

Parallèlement à la course au toujours plus court, il existe une course au toujours plus puissant. Les techniques de puissance reposent sur des impulsions ultra-courtes que l'on s'efforce d'amplifier par toujours la même technique faisant appel à l'émission stimulée produisant des photons jumeaux et en traitant la durée des impulsions lumineuses de manière spécifique.

Figure 17. La grande salle d'amplification laser du dispositif ELI construit par le Nobel Gérard Mourou à Bucarest. Tous les dispositifs visibles sur cette photo sont des lasers destinés à produire des inversions de population. © ELI Nuclear physics.

Ces dispositifs géants produisent des impulsions lumineuses dont la puissance peut atteindre un million de milliards de Watts. Les plus grosses centrales nucléaires n'atteignent que des puissances qui ne dépassent pas quelques millions de Watts.
Le laser « MégaJoule », à Bordeaux produit des impulsions lumineuses qui contiennent une énergie de 1 million de Joules. Cette énergie correspond à l'énergie potentielle acquise par un objet de 10 tonnes que l'on élève de 10m. Les techniques utilisées sont tellement complexes, elles nécessitent des réglages tels que le laser MégaJoule ne peut produire que 200 impulsions lumineuses en une année !

Ces lasers de très grosse puissance sont, pour l'essentiel, destinés à des études de physiques nucléaires et des plasmas.

Rêvons un peu

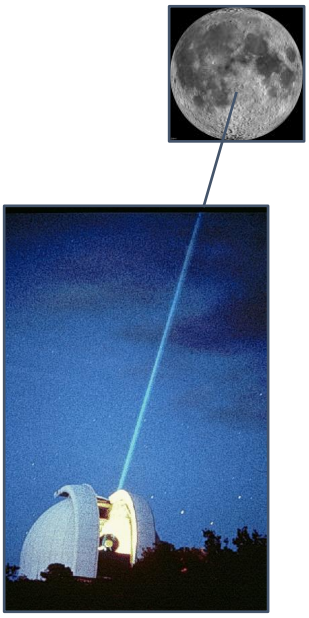

Figure 18. Mesure "radar" de la distance Terre-Lune à l'aide d'un laser impulsionnel.

L'excellente synchronisation des rayons d'un faisceau laser lui confère une très faible divergence. Cette propriété a été mise à profit pour mesurer la distance de la Terre à la Lune en projetant un faisceau laser en direction de notre satellite à l'aide d'un télescope. La divergence du faisceau est telle qu'en utilisant un télescope dont le miroir principal a un diamètre de 3,6 m de diamètre, la tache de lumière projetée sur la Lune n'est que de 6,5 km. Une partie de la lumière est réfléchie sur le sol lunaire et captée par le télescope. Afin d'augmenter la quantité de lumière réfléchie sur la Lune les astronautes d'Appolon 11 ont déposé des miroirs catadioptriques sur notre satellite. Avec un catadioptre de 50 cm de côté on ne récupère que 7,5 milliardièmes de la lumière reçue, quantité suffisante pour mesurer un signal de retour sur Terre. Le laser employé est du type impulsionnel dont les flashs de lumière qu'il émet ont une extension spatiale de l'ordre de la dizaine de centimètres. Connaissant la vitesse de la lumière en mesurant le temps mis par une impulsion lumineuse pour faire un aller-retour Terre-Lune-Terre on détermine la distance de notre satellite avec une précision du centimètre.

C'est fini

Le laser est réellement devenu indispensable et dresser la liste complète de ses applications deviendrait rapidement ennuyeux. J'espère simplement que ce court texte permettra au plus grand nombre d'acquérir une idée de ce qu'est un laser, cet objet quantique qui nous est tout à la fois familier et inconnu. J'espère aussi que les spécialistes ne seront pas choqués par les raccourcis employés.