



Le 60^e anniversaire du laser : des microchips aux lasers extrêmes

Costel Subran

Président de la F2S¹

Introduction

Le laser est un instrument qui émet des photons de lumière identiques, ayant la même longueur d'onde (énergie) et la même direction. C'est à la base un oscillateur optique contrôlé. Pour réaliser un laser, le physicien ou l'ingénieur a besoin de trois éléments :

- un milieu actif amplificateur : gaz, liquide (colorant), cristal solide ou semi-conducteur ;

- une source de pompage énergétique du milieu actif : flash, décharge électrique ou un autre laser pour exciter le milieu actif ;

- une cavité laser constituée de deux miroirs parfaitement parallèles, ultra-stables pour piéger les photons cohérents générés à l'intérieur de la cavité, en permettant leur amplification jusqu'à des niveaux extrêmement élevés (figure 1). Un des deux miroirs, dit miroir de sortie, partiellement réfléchis-

sant, permettra après amplification des photons à chaque passage et pour un niveau de puissance élevée dans la cavité, de laisser échapper un faisceau laser parfaitement directionnel (direction imposée strictement par la propagation selon l'axe optique de la cavité).

A la différence de la lumière naturelle qui comprend une grande variété de couleurs (longueurs d'onde) depuis l'ultra-violet jusqu'à l'infra-rouge en passant

¹ La F2S (Fédération de sociétés scientifiques) regroupe quatre sociétés savantes : SEE (Société d'électricité, d'électronique et des TIC), SFO (Société française d'optique), SFP (Société française de physique) et SFV (Société française du vide). www.f2s-asso.org

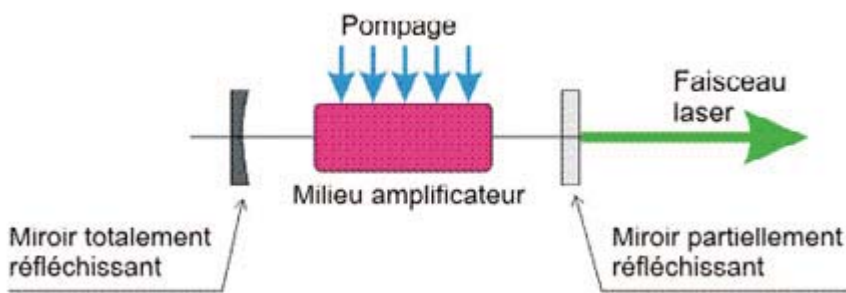


Figure 1 : Schéma de fonctionnement de l'effet laser.

“Aux lendemains de la deuxième guerre mondiale, des recherches importantes furent entreprises aux Etats-Unis et en Union soviétique dans le domaine des radars, afin de chercher des longueurs d’onde plus courtes que les ondes radio millimétriques utilisées jusqu’alors.”

●●● par le spectre visible et qui est multidirectionnelle et désordonnée, la lumière laser est monochromatique, autrement dit l'émission se fait à une seule longueur d'onde, le faisceau est unidirectionnel et peut se propager sur de très longues distances avec une divergence minimale, il est extrêmement intense et parfaitement cohérent, c'est-à-dire que toutes les ondes du faisceau laser sont parfaitement en phase.

Prémices et naissance du laser

Le laser n'est pas né *ex nihilo*. Il est l'aboutissement d'un long cheminement qui a commencé dès 1917 avec la théorie de l'émission stimulée d'Einstein qui, à partir de considérations purement théoriques sur le rayonnement du corps noir, avait montré que sous certaines conditions, la matière pouvait amplifier la lumière.

Alfred Kastler découvre, en 1949, le pompage optique qui a permis de créer les conditions expérimentales néces-

saires à la manifestation de l'émission stimulée. Cette technique permet de préparer des atomes dans des états d'énergie supérieure à celle prévue par l'équilibre thermodynamique. Appliquée

à une population d'atomes, elle permet de créer une « inversion de population », condition indispensable à l'amplification de la lumière par cette population.

Aux lendemains de la deuxième guerre mondiale, des recherches importantes furent entreprises aux Etats-Unis et en Union soviétique dans le domaine des radars, afin de chercher des longueurs d'onde plus courtes que les ondes radio millimétriques utilisées jusqu'alors, longueurs d'onde susceptibles d'autoriser des précisions de détection et de mesure supérieures. Ces travaux ont permis, d'une façon progressive, dans les années 50 d'aller vers la découverte des masers (radiation cohérente dans le domaine des micro-ondes).

Charles Townes (Columbia University) parvint à créer en 1954 une inversion de population (et donc une amplification par émission stimulée) dans un jet de molécules d'ammoniac à l'intérieur d'une cavité résonante. Cette émission se faisant à 24 GHz, le dispositif fut baptisé MASER (*Microwave Amplifier by Stimulated Emission of Radiation*). Le rôle de la cavité était de réinjecter le rayonnement

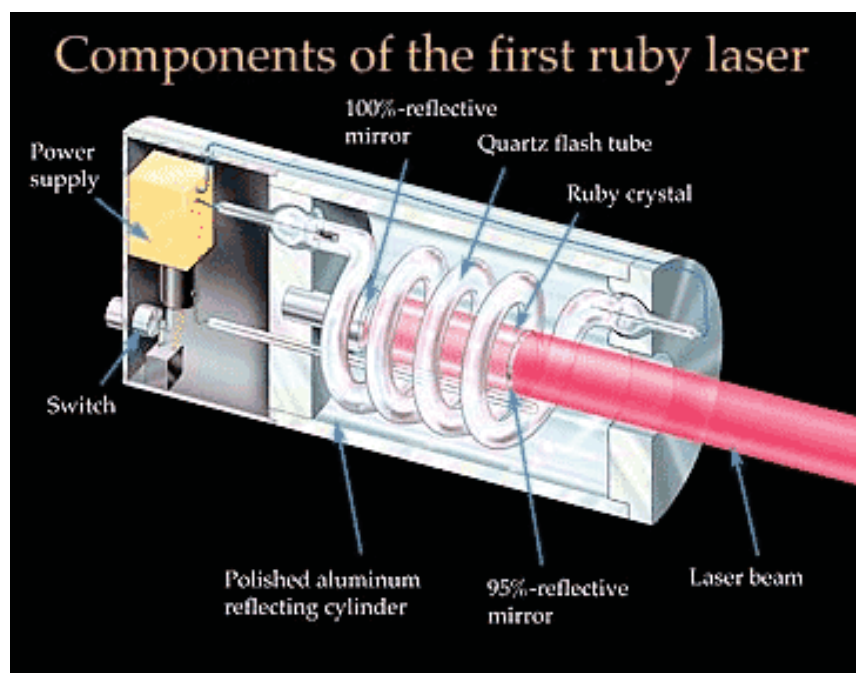


Figure 2a : Principe de fonctionnement du premier laser à rubis (Maiman 1960) – Source : Wikipedia.

émis par émission stimulée vers la population amplificatrice, créant ainsi une contre-réaction positive, élément essentiel d'un oscillateur. Le maser est donc le premier oscillateur fonctionnant avec des ondes électromagnétiques dans le domaine des micro-ondes.

Survint la grande invention du laser dans le visible (figure 2), Theodore Maiman fait fonctionner le premier laser à rubis impulsionnel à Hughes Research Lab, le 16 mai 1960, découverte extraordinaire qui bouleversa le monde de l'optique et signa l'acte de naissance d'une nouvelle science de ce qu'on a appelé un peu plus tard la photonique. Cette première constitua un premier pas vers la domestication de la lumière, vers la lumière cohérente. On pouvait ainsi imposer à la lumière de prendre une « forme » inexistante à l'état naturel, on pouvait la contrôler, l'obliger à osciller, à s'amplifier, à se propager en ligne droite selon des nouvelles lois. Le terme de laser fut donné à ce Graal des chercheurs des années 60, acronyme de l'anglais « *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* ».

Les découvertes permises par l'utilisation du laser

Ces nouveaux instruments trouvèrent très vite des applications variées dans des disciplines très différentes. Citons quelques « premières » qui firent date et ouvrirent la voie à de nombreux développements ultérieurs dans leurs domaines respectifs :

- 1961 - Traitement d'une tumeur de rétine ;
- 1964 - Emeth Leiths et Juris Upatnieks réalisent les premiers hologrammes 3D ;
- 1968 - Première utilisation médicale, ophtalmologique du laser Ar+ pour la thérapie de la rétine ;
- 1969 - Premier tir laser de mesure de la distance Terre – Lune à l'aide d'un laser à rubis ;
- 1972 - Premier laser haute énergie du monde 50 J/10 ns réalisé en France par la CILAS ;



Figure 2b : Laser à rubis pompé par diode (2020) - Source: Dr. Walter Luhs. Pendant la décennie 1960-1970, furent inventés la majorité des lasers utilisés de nos jours : diodes lasers, lasers à CO₂, lasers Nd : YAG, lasers à fibre, lasers à colorant, lasers à excimère. Les recherches destinées à la réalisation de nouveaux lasers ont conduit vers des horizons de puissance de l'ordre du pétawatt ou, à l'autre bout de la chaîne, vers la miniaturisation des lasers.

- 1974 - Codes à barres dans les supermarchés ;
- 1975 - Première imprimante laser IBM & Xerox ;
- 1978 - Premier disque vidéo avec un laser He-Ne par Philips & MCA ;
- 1982 - Prototype du lecteur du disque audio avec diode laser 780 nm par Philips ;
- 1988 - Première diode laser rouge 670 nm ;
- 1992 - Premier laser à fibre 2W Er double clad et premier amplificateur optique à ●●●

Le rôle éminent de la France dans l'histoire du laser

On ne peut évoquer les développements extraordinaires du laser sans évoquer le rôle éminent qu'a joué l'école française dans l'étude de la physique de ce dispositif aux retombées exceptionnelles. Pas moins de trois prix Nobel de physique furent décernés à des scientifiques français, sur des thématiques relatives au laser :

- **Claude Cohen-Tannoudji** en 1997 pour les travaux sur le refroidissement et le piégeage des atomes ;
- **Serge Haroche** en 2012 pour la mesure et la manipulation des systèmes quantiques individuels et la « boîte à photons » ;
- **Gérard Mourou**, pour la transposition de l'utilisation de la technologie CPA au laser et à la production d'impulsions ultra-brèves de forte intensité.



De gauche à droite : Claude Cohen-Tannoudji, Serge Haroche, Remise du prix Nobel de physique 2018 à Gérard Mourou (Source: Fondation Nobel).

“L’usinage laser est applicable à toute sorte de matériaux : acier inoxydable, aluminium, autres matières métalliques, matières plastiques, verre, bois, céramiques.”

- fibre pour les télécommunications très longue distance par IPG Photonics ;
- 1994 - Première LED bleue 450 nm par Nichia Japon ;
- 1996 - Première diode laser bleue 405 nm à l’origine du futur standard Blu-Ray pour les DVD (2009) par Nakamura ;
- 2001 - Première impulsion laser attoseconde à l’université de Vienne par Ferencz Krausz et al ;
- 2006 - Premier laser Yb industriel 10 kW par IPG Photonics ;
- 2008 - Premier laser commercial ECDL à cascade quantique pour l’infra-rouge moyen et pour les THz ;
- 2019 - Des années 2000 à nos jours : lasers de haute énergie Mégajoule Aquitaine et Livermore USA ; lasers de forte puissance pétawatt et térawatt, comme Apollon à Saclay ou les installations laser européennes ELI (Extreme Light Infrastructure) de Bucarest (Roumanie), Szeged (Hongrie) et Prague



Figure 3 : Laser jaune utilisé en astronomie pour la création d’étoiles artificielles - Source ESO.

(République tchèque). Notons que le leadership mondial dans l’industrie des lasers de puissance est détenu par deux sociétés françaises, Thales Laser et Amplitude Systems.

Quelques applications importantes du laser

Stockage de l’information

De l’enregistrement de la musique sur CD, en passant par l’archivage des films et des données numériques sur DVD, ce mode de stockage à grande longévité s’est généralisé dans tous les gestes de la vie quotidienne. Tous les graveurs et lecteurs de disques DVD et CD, initialement à base de diodes laser rouges à 785 nm, puis à 635 nm, sont équipés maintenant des diodes laser bleues à 405 nm (standard Blu-ray haute définition).

Internet rapide

L’Internet rapide s’est développé grâce aux réseaux de fibres optiques basés sur des diodes laser à 1,55 μm et aux amplificateurs à fibres à haut débit dépassant 40 Gbit/s et bientôt 100 Gbit/s. La technologie par fibre optique est implantée dans les transmissions très longues distances et haut débit via les câbles sous-marins qui constituent la colonne vertébrale du réseau mondial.

Fabrication des microprocesseurs par laser

Le besoin de microprocesseurs de plus en plus rapides et de mémoires de plus en plus denses est une des préoccupations majeures de l’industrie de la microélectronique et des circuits intégrés

pour les ordinateurs modernes. Le fort développement des recherches sur l’intelligence artificielle, grande consommatrice de données, ne pourra que renforcer les exigences d’une électronique encore plus miniaturisée et surtout moins consommatrice d’énergie.

Usinage et traitement des matériaux

La plupart des opérations industrielles de découpe, soudage, perçage, marquage, structuration, ablation, traitement des surfaces, fabrication additive à partir de poudres, micro-perforations sont réalisées à l’aide de lasers de différents types. L’usinage laser est applicable à toute sorte de matériaux : acier inoxydable, aluminium, autres matières métalliques, matières plastiques, verre, bois, céramiques.

Lasers pour les technologies quantiques

Ces applications ont en ligne de mire la cryptographie quantique, les ordinateurs quantiques, les horloges atomiques à très haute précision, les gravimètres quantiques.

Lasers médicaux, thérapie et diagnostic

Dès la découverte des lasers, les chercheurs se sont penchés vers les possibles applications médicales et biomédicales. Le monde médical a utilisé les lasers en 1961 en ophtalmologie et 1963 en dermatologie.

Tests, analyses et diagnostic

- Imagerie
- Cytométrie en flux.
- Thérapeutique
- Photothérapie dynamique (cancer, DMLA)
- Ophtalmologie
- Chirurgie cornéenne
- Ablation au niveau cellulaire en cancérologie
- Etc.

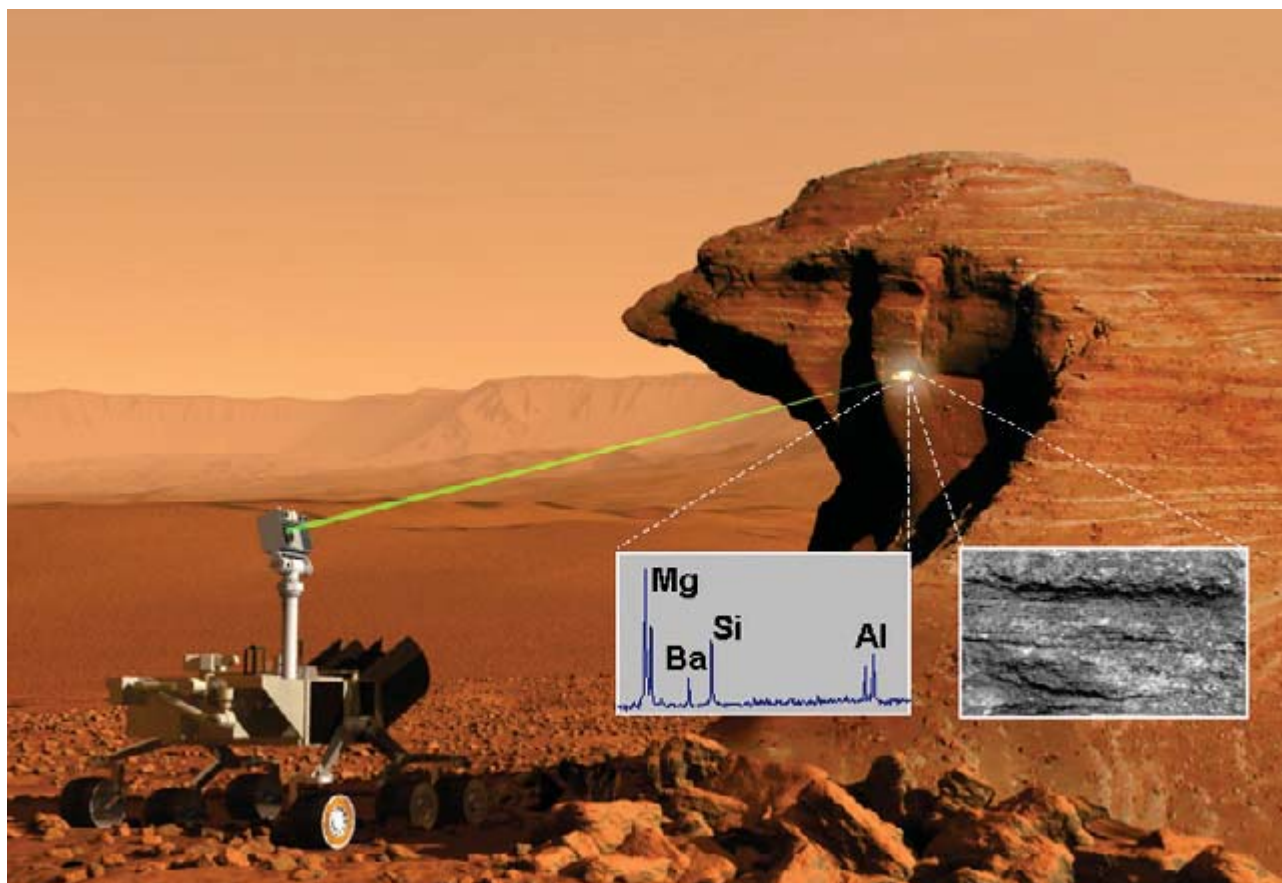


Figure 4 : Laser embarqué sur la sonde Curiosity pour l'analyse des sols sur Mars.

“On ne peut plus fabriquer une automobile, un avion, un paquebot, un ordinateur, un smartphone, un téléviseur une imprimante 3D sans lasers.”

Métriologie laser

Dès l'invention du laser en 1960, les chercheurs et les ingénieurs pensèrent à utiliser les lasers impulsionsnels ou modulés en fréquence pour la mesure des distances en utilisant les temps de vol aller-retour de ces « segments » de lumière qui se réfléchissent sur la cible : terre, satellites, hauteur des nuages, perturbations atmosphériques, voitures autonomes, relevés topographiques et bathymétriques, couche d'ozone, scanner aéroporté en archéologie pour détecter des vestiges d'occupation du territoire, détection et analyse des aérosols, radars laser pour la mesure de la vitesse des automobiles.

Lasers pour l'espace

- Création d'étoiles artificielles « guide » pour les astronomes (figure 3)
- Détection de la nature des sols sur Mars au moyen de la sonde Curiosity (figure 4).

Les lasers extrêmes de puissance voisine du TW pourraient devenir à terme des accélérateurs de particules ou équiper une station orbitale pour frapper à l'aide des faisceaux laser les débris spatiaux pour les déplacer, les désorbiter, les pousser de leur orbite vers l'atmosphère pour leur désintégration.

Impact économique des lasers

Les lasers sont devenus des outils indispensables dans presque toutes les technologies modernes. On ne peut plus fabriquer un automobile, un avion, un paquebot, un ordinateur, un smartphone, un téléviseur, une imprimante 3D sans lasers. Le marché mondial à l'aube de 2020 est d'environ 10 milliards d'euros pour les seules sources laser. On peut imaginer que la photonique, qui regroupe les sciences et technologies de la lumière, qui a pris son essor grâce aux lasers, sera au 21^e siècle ce que l'électronique fut au 20^e.

La photonique, qui regroupe l'ensemble des sciences et technologies de la lumière, a été identifiée comme étant l'une des clés du développement de l'Union européenne. Le marché mondial de la photonique atteint 750 milliards d'euros en 2018.



“ La photonique, qui regroupe l’ensemble des sciences et technologies de la lumière, a été identifiée comme étant l’une des clés du développement de l’Union européenne. ”

●●● Le contenu du dossier

Le présent dossier est issu pour l’essentiel des présentations faites lors de la 3^e Conférence « Science et Progrès » organisée par la F2S, qui s’est tenue à l’Ecole normale supérieure, le 7 janvier 2020 à Paris, une occasion de célébrer le 60^e anniversaire de l’invention du laser.

Il n’a pas la prétention de dresser un panorama exhaustif de l’état des recherches en cours sur ce thème mais de donner la parole à quelques-uns des acteurs, entreprises et laboratoires, les plus actifs dans ce domaine dans notre pays. Beaucoup d’autres contributions auraient eu leur place dans un tel dossier mais nous avons dû opérer des choix pour rester dans les limites de l’exercice.

Un premier article, signé par **Erik Lefebvre**, présente un bilan d’exploitation des cinq dernières années de la grande installation Laser Mégajoule (LMJ) du CEA Cesta, Le Barp et les premières expériences de fusion thermonucléaire dans le cadre du programme de simulation pour la dissuasion nucléaire. Le LMJ fait appel aux technologies laser les plus modernes, en mettant en œuvre 176 faisceaux laser de forte énergie UV à 0,35 μm .

En second lieu, **Thierry Georges**, le président fondateur d’Oxxius, avec ses collaborateurs et la contribution du **Pr Pascal Etienne**, nous conduit à l’autre bout de l’échelle vers les lasers microchips miniatures pompés par diodes et leurs applications dans le domaine biomédical.

Un troisième article, dû à **David Pureur**, directeur R&D de Quantel Medical, et **Patrick Maine**, directeur de la technologie à Lumibird, présente les lasers à

fibres, une des technologies les plus intéressantes de ces dix dernières années, et leurs applications dans le domaine médical.

Jean-Pierre Cariou, directeur de la recherche scientifique et technologique de la société Leosphere, nous expose ensuite les diverses méthodes de télédétection par laser, ou lidar, technique de mesure à distance développée dans sa compagnie, fondée sur l’analyse des propriétés d’un faisceau de lumière renvoyé par l’atmosphère vers son émetteur.

Le dossier est complété par l’article de **Sébastien Le Pape** et **Sylvie Jacquemot**, du laboratoire LULI et de **Philippe Zeitoun** du LOA, sur le laser à rayons X dans lequel le principe du laser est transposé à des radiations électromagnétiques courtes situées dans le domaine X par deux techniques : Lasers X à plasma ou lasers XFEL à électrons libres.

Remerciements

Je tiens à remercier **Alain Brenac**, membre du Bureau de la F2S et membre émérite de la SEE, pour l’aide précieuse apportée à l’élaboration de ce dossier. ■



L’auteur :

Costel Subran, docteur-ès-sciences, est président de la Fédération française de sociétés scientifiques (F2S). Il est expert et reviewer en photonique auprès de la Commission européenne. Il reçoit en 2017 le diplôme de la Société française d’optique pour sa longue activité comme vice-président et secrétaire de cette société savante et pour son rôle dans la promotion de la filière « optique & photonique ». Il a été vice-président du CNOP (Comité national d’optique et photonique), de 2001 au 2016. Costel Subran a fondé Opton Laser International en 1990, leader dans le domaine des lasers et de la photonique, et plusieurs autres sociétés en photonique. Il a continué d’enseigner entre 1998 et 2020 comme professeur invité dans plusieurs grandes écoles et universités. Il est membre de l’EOS (European Optical Society), Member of Corporate Committee of OSA et membre fondateur du Comité de rédaction de la revue Photoniques.

Les articles

Cinq années d’expérimentation au laser Mégajoule.....	p.47
Lasers microchips pour l’instrumentation optique : du laboratoire au grand public.....	p.55
Les lasers à fibres pour applications médicales	p.64
Principes et applications des lidars pour l’analyse de l’atmosphère.....	p.73
Le laser X : de la guerre des étoiles à l’infiniment petit.....	p.83