



Lasers et hologrammes

DES OUTILS DE RECHERCHE ET D'EXPLOITATION

Le 16 mai 1960, le physicien américain Theodore Maiman fait jaillir d'un cristal de rubis le premier rayonnement laser. Ce générateur de lumière cohérente, encore mystérieux aux yeux du grand public, va révolutionner bon nombre de techniques : on ne s'étonne plus aujourd'hui de voir un laser couper de l'acier comme un fil coupe du beurre.

HISTOIRE D'UNE DÉCOUVERTE

Dans la préhistoire du laser, désormais outil indispensable de l'industrie, de la médecine, mais aussi de certains spectacles, on rencontre **Albert Einstein**,

qui découvre en 1905 l'existence du photon, particule élémentaire constitutive de la lumière, qui véhicule une énergie reliée à la fréquence de l'onde lumineuse. Cette découverte bouleverse la conception que les physiciens se font de la lumière. Puis en 1917, Einstein énonce la théorie de l'émission stimulée : un atome excité par un photon d'énergie adéquate émet un photon identique au photon initial. Cependant, cette théorie ne trouvera pas d'applications avant plusieurs décennies.

Pour en arriver au laser, il faudra une succession de découvertes qui permettront de concrétiser la théorie d'Einstein. Il reste à trouver comment obtenir suffisamment d'émissions stimulées pour produire cette lumière. C'est le physicien



français **Alfred Kastler** (1902-1984) qui apporte sa pierre à l'édifice.

En 1949, il met au point un processus appelé « pompage optique » qui permet de transférer de l'énergie lumineuse à des atomes pour qu'ils occupent majoritairement des niveaux d'énergie excités, normalement beaucoup moins occupés que les niveaux inférieurs. Cette « inversion de population » permet l'« effet laser », c'est-à-dire une émission stimulée ordonnée qui est privilégiée par rapport à l'émission spontanée aléatoire et désordonnée.



En 1953, l'Américain **Charles Townes** (né en 1915), de l'université de Columbia, conçoit le

« maser » (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation, amplification des micro-ondes par l'émission stimulée de radiation), qui utilise des ondes courtes (micro-ondes) pour produire un rayonnement. La découverte de l'effet maser vaudra à Townes le prix Nobel de physique en 1964



Quelques années plus tard, le physicien américain **Theodore Maiman** remplace le « M » de micro-ondes par le « L » de lumière – light –, d'où son nom : « laser ».

UNE SOURCE DE LUMIÈRE UNIQUE

LE PRINCIPE DU LASER

- Le principe du laser repose sur la stimulation d'entités atomiques (atomes, ions, molécules) pour les amener à produire de l'énergie sous forme de lumière, à une fréquence déterminée.
- Une entité « excitée » par un photon produit un autre photon réplique du photon extérieur agent d'excitation.
- Ces photons correspondent à de l'énergie dégagée sous forme de lumière. Il suffit alors de multiplier le phénomène pour obtenir une lumière composée de photons tous identiques. On retrouve là la théorie d'Einstein sur l'émission stimulée, un des rouages essentiels de la chaîne.

LA FABRICATION DU LASER



Le premier dispositif mis au point par Maiman consiste à placer un bâtonnet de **cristaux de rubis** dans un cylindre aux deux extrémités duquel on place un miroir, l'un complètement réfléchissant et l'autre partiellement argenté de sorte qu'il ne laisse passer qu'une lumière très intense. Une lampe flash est enroulée autour du cylindre.

- Lorsqu'on l'allume, les atomes

du rubis sont stimulés et produisent des photons. C'est le phénomène de l'émission simultanée qui est alors activé et une multitude de photons est libérée qui génère cette puissante source d'énergie.

Depuis, le dispositif de base est resté le même. Le cylindre de Maiman est nommé « oscillateur laser » ou encore « résonateur optique » et l'élément producteur de photons « milieu laser » ou « milieu amplificateur ».

- Si on utilise toujours le rubis – aujourd'hui synthétique –, d'autres milieux sont employés : gaz, liquides, etc. L'énergie nécessaire à la stimulation est apportée, selon les cas, par une lampe flash, un courant électrique ou une réaction chimique.

LES CARACTÉRISTIQUES DU LASER

Le laser est un faisceau de lumière composé de photons qui présentent tous exactement les mêmes caractéristiques. Il est défini par la fréquence des photons qu'il émet.

- La plupart des lasers sont monochromatiques, c'est-à-dire qu'ils n'émettent que sur une seule longueur d'onde bien déterminée, contrairement à une lampe par exemple, qui couvre un spectre plus large.

THEODORE MAIMAN, UN BRICOLEUR DE GÉNIE

Theodore Maiman, inventeur du laser, naît en 1927 à Los Angeles. Au collège déjà, il bricole les postes radio de ses camarades. Il entreprend des études de physique à l'université du Colorado, puis d'électricité à celle de Stanford. En 1960, alors qu'il travaille dans les laboratoires de recherche Hughes, il réalise la première émission laser au moyen d'un cristal de rubis.

- Les industriels ironisent alors, qualifiant le laser de « géniale invention » à la recherche d'applications ». Cela n'empêche pas Maiman de créer sa propre société, la Korad Corporation, dédiée à la recherche, au développement et à la construction de lasers.
- Maiman est aujourd'hui directeur de la Control Laser Corporation, la firme qui contrôle la norme des lasers aux États-Unis. Si le prix Nobel lui a échappé, son autorité et sa réussite l'auront consolé.
- On raconte que l'épouse de Maiman se rendait toujours aux conférences universitaires de son mari en arborant un collier de rubis en hommage à la découverte de celui-ci.

Constant et ordonné, le faisceau laser garde la même direction une fois sorti de sa source. Cela est dû à la cohérence de ses ondes qui sont toutes en phase. Le point d'impact du faisceau, même sur une plaque située à plusieurs mètres, ne sera rien de plus qu'un simple point. Cette propriété est à la base de bon nombre d'applications, celle notamment de la lecture des CD.

- La propagation d'une onde est parfaitement rectiligne et visible sur de longues distances, une caractéristique que l'on peut observer dans les spectacles son et lumière, mais qui sert aussi dans les travaux de construction où de longs tracés sont nécessaires.



La couleur du laser dépend du milieu amplificateur. Il en existe de différentes couleurs, ce

qui sur un plan spectaculaire offre de nombreuses possibilités.

- La puissance des lasers continus classiques varie de 1 milliwatt (mW) à 50 kilowatts (kW).
- Les lasers émettent en continu ou par impulsion, en fonction de la source de stimulation.
- Le faisceau laser est directif et ne diverge pas : son point d'impact à plusieurs mètres est réduit à un point.
- La propagation d'une onde laser est donc parfaitement rectiligne et visible sur de longues distances.
- La lumière émise est cohérente : les rayonnements dont elle est composée vibrent en phase, « à l'unisson » et conservent cette propriété durant leur propagation (technologie des CD)
- Enfin elle permet de focaliser une quantité d'énergie importante dans un espace réduit.

LES TYPES DE LASER

Les lasers sont classés en fonction du milieu amplificateur utilisé.

LES LASERS À GAZ



Ils sont les plus répandus étant donné leur coût de revient plus modéré que d'autres et leur simplicité

relative de fabrication.

- Le laser à l'hélium néon est le plus répandu. Il émet dans différentes couleurs et peut produire une puissance allant jusqu'à 200 W.

Le laser à oxyde de carbone est le plus puissant. Il peut délivrer cette forte puissance aussi bien en continu qu'en impulsion.

La longueur d'onde des lasers au krypton et à l'argon réunis couvre la totalité du spectre des couleurs. Ils peuvent émettre plusieurs raies de couleurs différentes en même temps ce qui permet les **spectacles de son et lumière**, par exemple.



LES LASERS À SOLIDES

Le premier laser réalisé par Maiman utilisait du rubis naturel. Le rubis synthétique utilisé aujourd'hui présente l'avantage d'être très pur, ce qui augmente l'efficacité du laser.

- Le laser Nd:YAG, au grenat d'aluminium et à l'yttrium (YAG pour Yttrium Aluminium Garnet), est dopé au néodyme (Nd). Ce cristal étant bon conducteur de chaleur, le faisceau peut être exploité en émission continue ce qui offre des résultats rapides.

LES LASERS À LIQUIDES

Le principal avantage des lasers à liquides est la possibilité de choisir la longueur d'onde du faisceau. En effet, selon le choix du colorant, la longueur d'onde et donc la couleur varient.

LES LASERS À ÉLECTRONS LIBRES



Laser de l'avenir, sa fréquence de rayonnement est ajustable et il peut générer de très hautes énergies.

LES MULTIPLES USAGES DU LASER

EN MÉDECINE

- Le laser a été une grande découverte pour la médecine. Le scalpel tranchait les chairs : le laser cautérisait les plaies.
- Le procédé permet des interventions plus précises et moins lourdes et supprime les longs délais de cicatrisation.
- L'effet thermique permet la destruction localisée de cellules par la chaleur : tumeurs bénignes, angiomes (taches de vin).

Laser records

70 millions °C
La température d'une goutte d'hydrogène atteinte par le faisceau du futur laser français Mégajoule.

1 000 milliards de milliards d'ampoules de 100 W

La concentration de la lumière émise par le futur laser américain Pétawatt sur 1 cm².

384 403 km

La distance de la Terre à la Lune mesurée par laser depuis que des réflecteurs y ont été déposés à cet effet lors de la première expédition Apollo.

Nova



125 milliards de watts

Femtolasers



1 millionième de millionième de seconde de temps de pause

Le plus puissant

Le plus rapide



• En ophtalmologie, les caractéristiques exceptionnelles d'ablation du laser UV émettant à 193 nm sont utilisées en chirurgie de la cornée, notamment afin de corriger des problèmes de vision (myopie, cataracte, décollement de la rétine).

• En esthétique, le laser contribue à l'effacement des ridules ou des tatouages, ainsi qu'à l'épilation.

DANS L'INDUSTRIE, LE BÂTIMENT ET L'INGÉNIERIE

• Le laser, source de chaleur intense, permet la soudure, le ponçage et le découpage des métaux.

• Le principe de soudage laser repose sur la fusion d'un point du matériau sur lequel le faisceau va se concentrer grâce au système d'optique.



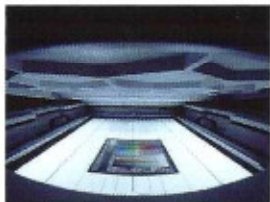
• On exploite également l'intensité des lasers pour percer les métaux ou le diamant, ou pour polir des surfaces rugueuses.

• Le laser permet le nettoyage de grandes surfaces et d'objets. Il est ainsi employé pour rénover des monuments.

• La rectitude de son faisceau est exploitée par les ingénieurs des travaux publics (tracés de route, conception de grattes-ciel) et par les carrossiers.

• Les travaux mécaniques de haute précision pour la fabrication des puces de silicium nécessaires à l'industrie électronique et aux télécommunications ont recours à la technologie du laser.

EN INFORMATIQUE ET EN BUREAUTIQUE



• L'apparition du scanner et de l'imprimante laser a permis d'améliorer la rapidité de reproduction et surtout la qualité des images ainsi obtenues.

• En reprographie et en imprimerie, les faisceaux laser sont focalisés sur de très petites surfaces de l'ordre du micromètre carré. On peut, en balayant une surface, reconstituer une image point par point avec une définition de 10 points par mm² (application : imprimante laser et photocopieur).



• La lecture des codes à barres par de petites diodes laser a révolutionné la gestion des flux

de marchandises, notamment aux caisses des supermarchés. Le faisceau laser balaye le code à barres et la modulation en intensité du signal recueilli est un code binaire (composé de 0 et de 1) identifiant l'article.

DANS LE TRAITEMENT DE L'IMAGE ET DU SON, DANS L'INDUSTRIE DU SPECTACLE ET DES TÉLÉCOMMUNICATIONS

• Le laser lit les informations contenues sur les pistes des Compact Disks (CD) ou des Digital Video Disks (DVD) pour les transcrire en sons et en images.



• Les spectacles de son et lumière ainsi que certains concerts utilisent la grande portée du faisceau laser pour illuminer la scène ou des monuments.

• Le laser est aussi utilisé comme moyen de transport d'informations dans les fibres optiques. Il pourrait transporter jusqu'à mille fois plus d'informations que les ondes micrométriques actuellement utilisées pour les retransmissions télévisées.

EN ASTROPHYSIQUE

• L'utilisation du laser en télémétrie présente des applications en astrophysique. C'est à l'aide d'un laser qu'on mesure aujourd'hui la distance entre la Terre et la Lune. Les astronautes des missions Apollo ont placé un miroir réfléchissant sur la Lune.

• Les physiciens envoient en direction de la Lune un faisceau laser qui, réfléchi par le miroir, revient vers la Terre. Connaissant la vitesse de propagation du laser, ils calculent la distance Terre-Lune en fonction du temps de parcours du faisceau.

DANS LE DOMAINE MILITAIRE

• Les militaires utilisent aussi les différentes propriétés du laser pour la détection et l'identification de cibles, la désignation d'un objectif ou le guidage d'engins balistiques. Ainsi, certains missiles sont programmés pour se diriger vers une source laser. Lorsqu'un faisceau frappe une cible, le missile détecte les rayons réfléchis et remonte jusqu'à la source du rayonnement.

LES DANGERS DU LASER

• Les rayonnements laser présentent des risques plus ou moins importants pour l'œil et la peau.

• Ces risques varient en fonction de la puissance de ces rayonnements, de leur temps d'exposition, de la dimension de leur faisceau et de leur longueur d'onde (ultraviolet, infrarouge ou visible).

• Ils induisent sur les tissus des effets biologiques différents, de nature thermique, photochimique, électromécanique ou photoablatif.

• Les rayonnements ultraviolets naturels (UV) ont des effets photochimiques néfastes sur la peau (brûlures, coupures, vieillissement prématuré, cancers). Sur les yeux, la surexposition aux UV provoque de la conjonctivite et des brûlures de la cornée.

L'HOLOGRAPHIE : MAGIE OU RÉVOLUTION VISUELLE

• L'holographie est un procédé de photographie « en relief » qui permet de reconstruire virtuellement dans l'espace un objet en trois dimensions.

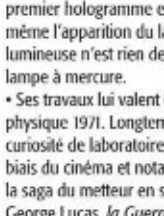
• Ces images tridimensionnelles servent à la fabrication d'objets décoratifs.



• Les découvertes du Français Gabriel Lippmann (1845-1921) sur la photographie interférentielle, en 1891, se

trouvent à la base du procédé.

• Mais c'est Dennis Gabor (1900-1979), savant d'origine hongroise installé en Grande-Bretagne, qui réalise le premier hologramme en 1947, avant même l'apparition du laser. Sa source lumineuse n'est rien de plus qu'une lampe à mercure.



• Ses travaux lui valent le prix Nobel de physique 1971. Longtemps restée une curiosité de laboratoire, c'est par le biais du cinéma et notamment à travers la saga du metteur en scène

George Lucas, *la Guerre des étoiles*, que l'holographie se fait connaître du grand public.

UN PROCÉDÉ EN DEUX PHASES



• Deux phases sont nécessaires à la réalisation d'un hologramme. Dans une première phase, l'objet est éclairé à l'aide d'un laser. La lumière réfléchie par l'objet est envoyée sur une plaque photographique. C'est l'hologramme. Il ne ressemble pas à l'objet lui-même, mais contient toutes les informations nécessaires à sa reconstitution.

LE MUSÉE DE L'HOLOGRAPHIE

• Destiné à promouvoir l'holographie jusqu'alors mal connue du grand public français, le musée de l'Holographie de Paris est créé en 1980, quatre ans après celui de New York, premier du genre au monde.

• Ses collections sont d'une grande richesse et d'une grande diversité. Elles regroupent des centaines d'hologrammes d'œuvres artistiques ou d'objets historiques provenant du monde entier, proposant ainsi un voyage étonnant. On peut notamment admirer l'hologramme du sabre de Napoléon, dont l'original se trouve au musée de l'Ermitage, à Saint-Petersbourg.

• La deuxième phase consiste à éclairer cette plaque à l'aide d'un laser. Grâce aux propriétés de la lumière monochromatique, l'image de l'objet apparaît. Comme lors de la lecture d'un CD, le faisceau laser illuminant la plaque déchiffre les informations et permet à l'objet d'être recréé en trois dimensions (3D).

LES DIFFÉRENTS TYPES D'HOLOGRAMMES

• Ce premier essai de Dennis Gabor en 1947 est considéré à lui seul comme un type d'hologramme. Il est communément appelé « dispositif originel de Gabor ». C'est à l'aide d'une lampe à vapeur de mercure que le savant britannique obtient son hologramme, l'objet étant une diapositive permettant la diffraction de la lumière. Le défaut majeur de ce dispositif est la présence de l'image réelle entre l'œil du spectateur et l'hologramme.

• Plus tard, Emmett Leith et Juris Upaniecki, toujours à l'aide d'une lampe à vapeur de mercure et d'une diapositive, parviennent à déplacer l'image réelle afin qu'elle ne soit plus dans le champ de vision. Pour cela, ils font passer le faisceau de référence à côté de l'objet et le dévient à l'aide d'un prisme de façon à le superposer au faisceau objet. Ce genre d'hologramme est appelé « hologramme par transmission à faisceau de référence incliné ».

• L'avènement du laser va permettre l'holographie d'objets opaques. Le faisceau objet jusqu'alors transmis par l'objet devient réfléchi par celui-ci. Le faisceau de référence est dirigé à l'aide d'un miroir. Le principe reste le même : les deux faisceaux sont superposés au niveau de la plaque photographique pour former l'hologramme. Ces hologrammes sont dits « à transmission à faisceau objet réfléchi ».

• Le dispositif des « hologrammes par réflexion restituable en lumière blanche » est original. Dans les trois cas précédents, l'angle entre le faisceau objet et le faisceau de référence est quasiment nul : ici, il peut être de 60° ou même plus. Cela permet d'obtenir un hologramme moins étalé en longueur.

• Aujourd'hui, on réalise des hologrammes en couleurs.

LES RÉUSSITES DE L'HOLOGRAPHIE

DANS LA VIE QUOTIDIENNE



• L'holographie s'est imposée dans notre vie quotidienne. Difficiles à reproduire, les hologrammes placés sur les *billets de banque* ou les cartes de crédit servent à lutter contre la contrefaçon.

• On trouve aussi à présent des illustrations holographiques sur certains timbres ou encore sur les images que les enfants s'échangent dans les cours de récréation.

DANS LES DOMAINES DES CONTRÔLES ET DES MESURES



• En médecine par exemple, on peut créer des répliques de parties du corps humain grâce à l'holographie. Ce procédé autorise

un diagnostic rapide et plus précis des fractures ou des tumeurs.

• L'holographie permet également aux industriels de contrôler la qualité de leurs produits. Si la forme de l'objet reproduit par hologramme n'est pas exactement identique au tracé de référence, l'ordinateur est capable de le détecter.

• L'holographie est particulièrement utilisée en microscopie pour augmenter la résolution d'un microscope sans en diminuer la profondeur de champ.

LES APPLICATIONS D'AVENIR

• Certains rêvent de lire des revues illustrées d'hologrammes, d'autres d'aller voir un film en 3D sans les lunettes jusqu'à présent nécessaires. Les progrès de l'holographie les satisferont peut-être un jour.

• L'holographie pourrait éventuellement servir au stockage de données, sous forme de points brillants ou sombres, arrangés selon une structure tridimensionnelle. La grande capacité de stockage d'informations que possèdent les hologrammes laisse envisager, à plus court terme, la fabrication de CD capables de contenir cinq fois plus d'informations que les disques actuels.

LASER, HOLOGRAPHIE : UNE HISTOIRE CROISÉE

1905 Découverte du photon par Einstein.

1917 Einstein énonce la théorie du phénomène d'émission simultanée.

1947 Dispositif holographique originel de Gabor.

1960 Premier laser réalisé par Maiman.

1962 « Train and Bird » premier hologramme fabriqué au laser (université du Michigan) ; première opération en chirurgie oculaire.

1968 Invention de l'hologramme à transmission par Stephen.

1969 Première mesure Terre-Lune à l'aide d'un laser à rubis.

1975 Première imprimante laser.

1983 Premier missile équipé de laser.

1984 Premier laser à rayons X ; le magazine *National Geographic* est le premier à utiliser un hologramme sur sa couverture ; premier disque compact (CD).

1986 Premier CD vendu à plus d'un million d'exemplaires : *Brothers in Arms* de Dire Straits.

1987 Un faisceau laser du Los Alamos National Laboratory (Nouveau-Mexique, États-Unis) crée la lumière artificielle la plus intense jamais produite.

1990 Naissance du scanner 3D.

1995 Première opération contre la myopie ; premier DVD.

2003 Lancement de la technologie « laser blanc » (stockage énorme de données sur DVD).