

LES ECHOS DE SAINT-MAURICE

Edition numérique

Henri MICHELET

Le laser : pour ou contre la vie ?

Dans *Echos de Saint-Maurice*, 1980, tome 76, p. 37-49

© Abbaye de Saint-Maurice 2013

Le laser

Pour ou contre la vie ?

Depuis des décades, des romans d'anticipation narrent avec plaisir les merveilleuses aventures ou les terribles méfaits du « rayon de la mort ». Jusqu'à ces quinze dernières années, le public n'accordait guère d'attention à ce mystérieux rayon, le tenant pour un pur produit de l'imagination. Mais voici que la découverte d'une lumière aux propriétés surprenantes l'a rangé dans le domaine de la réalité. Du coup, le laser est devenu objet, tout à la fois, de crainte et d'espoir pour l'humanité. Son existence et ses réalisations méritent désormais notre intérêt.

Mais au préalable, pour comprendre la nature et les propriétés du laser, il est utile de nous familiariser quelque peu avec le monde des ondes.

« **Tout est onde** »

Chacun sait qu'il existe une multitude d'ondes aux propriétés fort diverses. N'a-t-on pas dit que tout est onde ? Commençons par mentionner un phénomène tout simple et bien connu.

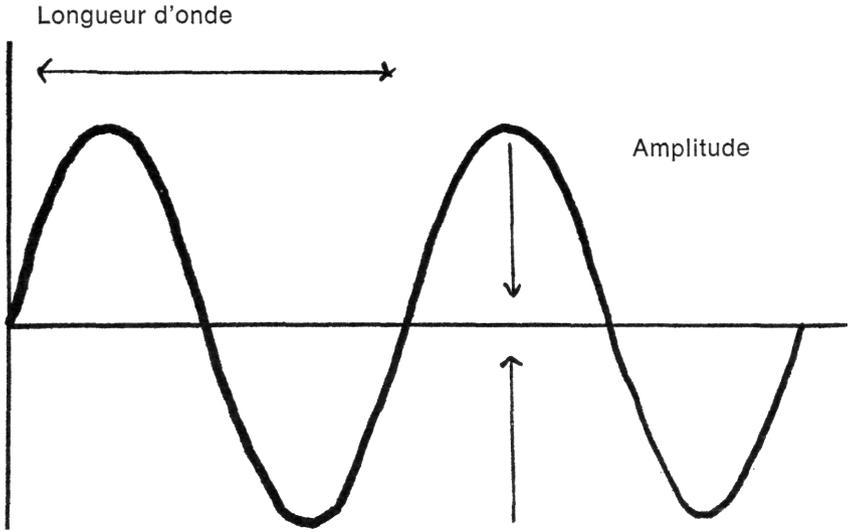
Quand on jette une pierre dans une eau calme, des dénivellations circulaires surgissent, s'agrandissant à mesure que le temps s'écoule. Cette perturbation, qui s'étend de proche en proche dans toutes les directions, constitue une propagation par ondes.

Cet exemple permet de définir les grandeurs caractéristiques des phénomènes vibratoires.

On appelle **vitesse de propagation** le chemin parcouru par le front de l'onde en une seconde. La dénivellation est l'**amplitude** de l'onde ;

la distance séparant deux sommets successifs constitue la **longueur d'onde**. Le temps nécessaire pour qu'une crête remplace une autre est la **période**. La **fréquence** se mesure par le nombre de sommets qui passent en un point durant une seconde.

Deux relations faciles à comprendre unissent entre elles ces grandeurs :



- La longueur d'onde λ égale la vitesse de propagation V multipliée par la période T ; soit, sous forme mathématique : $\lambda = VT$.
- La longueur d'onde λ égale le quotient de la vitesse de propagation par la fréquence, soit : $\lambda = V/F$.

Peut-être est-il encore opportun de rappeler les unités les plus usuelles servant à mesurer les ondes.

Suivant sa grandeur, la longueur d'onde s'exprime en kilomètres (km), en mètres (m), en millimètres (mm), en microns (1 micron = 10^6 m, ou 0,000 001 m), en angströms (1 angström = 10^{-10} m, ou 0,000 000 0001 m). On exprime habituellement la période en secondes. La fréquence s'évalue en hertz ou cycles (1 hertz = 1 cycle = 1 vibration par seconde).

Avec ces quelques notions élémentaires, il est possible de connaître sur quelles longueurs d'ondes ou quelles fréquences parlent les innombrables vibrations qui peuplent l'univers.

Les unes, comme les ondulations de l'eau ou les vibrations d'une corde qu'on agite périodiquement, sont de caractères purement mécaniques, elles ne retiendront pas notre attention. D'autres, comme les ondes de radio ou les ondes lumineuses sont associées à une production d'énergie appelée électromagnétique, parce qu'elles propagent un champ électrique et un champ magnétique. C'est dans ce groupe que se range la lumière émise par le laser.

Le tableau suivant donne une idée de l'immense variété des ondes électromagnétiques :

Nature des ondes	Longueur d'onde	Fréquence	Emploi
Oncles électriques du cerveau	30 000 km	10 hertz	Appareils électriques
Courant du réseau	6 000 km	50 hertz	
Ondes hertziennes			
Longues	3 km à 1 km	10^5 - $3 \cdot 10^5$ hertz	Radio Télévision
Moyennes	1 km à 100 m	$3 \cdot 10^5$ - $3 \cdot 10^6$ hertz	
Courtes	100 m à 10 m	$3 \cdot 10^6$ - $3 \cdot 10^7$ hertz	
Métriques	10 m à 1 m	$3 \cdot 10^7$ - $3 \cdot 10^8$ hertz	
Décimétriques	1 m à 10 cm	$3 \cdot 10^8$ - $3 \cdot 10^9$ hertz	Radar (maser) Radio-astronomie
Centimétriques	10 cm à 1 cm	$3 \cdot 10^9$ - $3 \cdot 10^{10}$ hertz	
Millimétriques	1 cm à 1 mm	$3 \cdot 10^{10}$ - $3 \cdot 10^{12}$ hertz	
Lumière			
Infrarouge	0,3 mm à 0,79 micron	$3 \cdot 10^{12}$ - $3,8 \cdot 10^{14}$ hertz	Chauffage
Visible	0,79 à 0,39 micron	$3,8 \cdot 10^{14}$ - $7,7 \cdot 10^{14}$ hertz	Laser Vue
Ultraviolet	0,39 à 0,02 micron	$7,7 \cdot 10^{14}$ - $1,3 \cdot 10^{16}$ hertz	Thérapeutique
Rayons x	20 à 0,03 angströms	$1,5 \cdot 10^{17}$ - 10^{20} hertz	Radiographie
Rayons Y	1 à 0,01 angström	$3 \cdot 10^{18}$ - $3 \cdot 10^{20}$ hertz	Spectrographie
Radiations cosmiques	0,01 à 0,0001 angström	$3 \cdot 10^{20}$ - $3 \cdot 10^{22}$ hertz	Thérapeutique

Comme nous l'expliquerons plus loin, le laser à cristal de rubis émet une lumière rouge ayant une longueur d'onde de 0,6943 micron, soit 6 943 angströms.

Le laser, nouveau-né dans la famille des ondes

Ce sont les recherches effectuées pour produire des ondes de plus en plus courtes qui ont abouti à la découverte du laser. Aussi, ne sera-t-il pas inutile, pour établir sa fiche d'identité, de rappeler les grandes étapes dans la maîtrise des ondes hertziennes.

Chacun le sait : on appelle ainsi les ondes qui transportent les émissions de radio. Leur découverte, due à Hertz (1857-1894), physicien allemand remonte à l'année 1888. A cette date, Hertz parvenait à produire des courants à haute fréquence qui possèdent la propriété de se propager sans conducteur. Mettant à profit cette qualité, le Français Branly (1844-1940), le Russe Popov (1859-1905), et l'Italien Marconi (1874-1937) établissent ensuite les bases des communications par radio. Les premiers émetteurs construits par ces savants fonctionnent sur des longueurs d'ondes de 10 à 20 km.

Un inconvénient se manifeste bientôt montrant que dans le domaine des grandes ondes le nombre d'émissions est limité. Quelques exemples le démontrent facilement : entre 1000 et 2 000 m, il n'y a de places que pour trois ou quatre stations. Des dizaines de stations peuvent émettre sur les ondes allant entre 200 et 500 m et des centaines sur les ondes courtes, entre 10 et 50 m.

Ces constatations ont orienté les recherches des physiciens vers la production et l'emploi d'ondes de plus en plus courtes. Issues de cet effort, de belles réalisations se succèdent à une cadence rapide. Dès 1934, avec l'icône du russo-américain Zworkin, l'emploi des ondes métriques se généralise en télévision. L'année suivante, l'écosais Watson-Watt conçoit l'utilisation des ondes centimétriques dans le radar. Vingt ans plus tard, un nouveau pas est franchi dans la conquête des ondes : trois équipes de chercheurs, celles de Townes Schwartz (université de Columbia) et de Weber (université de Maryland) aux Etats-Unis, et celle de Basov et de Prokhorov en Union soviétique, inventent simultanément le maser. Ce dernier mot est le sigle de l'expression

« Microwave Amplifier by Stimulated Emission of Radiations », ce qui signifie « amplification de micro-ondes par émission stimulée de radiations ». La fonction du maser était d'amplifier les ondes de 3 cm, habituellement utilisées dans le radar.

La technique nouvelle adoptée dans cette production aboutit bientôt à la découverte du laser. Comme on le voit, dans le nom donné à celui-ci une seule lettre a changé. Laser est le sigle de « Light Activation by Stimulated Emission of Radiations », ce qui signifie « Amplificateur de lumière par émission stimulée de radiations ». Au lieu d'amplifier les micro-ondes, le laser amplifie la lumière, qui se range parmi les ondes déci-micrométriques.

Cette nouvelle maîtrise des ondes, invention capitale, date de l'année 1960. Elle est due à Théodore Maiman, physicien de la Bell Téléphone, à Los Angeles.

L'explication du fonctionnement du laser fera ressortir son apport dans le domaine des ondes.

La lumière : des ondes de photons indisciplinés

Avant 1960, il paraissait impossible de produire des ondes plus courtes que celles du radar. Les moyens techniques imposaient cette limitation. Le laser en créant des ondes déci-micrométriques vient de franchir cette limite. Il doit sa réussite à un procédé nouveau. Au lieu de produire des ondes en faisant appel à des courants électriques, comme cela se passe ordinairement, le laser commande directement aux électrons. Cette manière de faire rejoint celle de l'émission de la lumière.

Pour comprendre ce processus, il suffit d'avoir une connaissance élémentaire de l'atome. Celui-ci est constitué d'un noyau dans lequel est concentrée la matière, et d'un nuage d'électrons périphériques. Ces derniers, formés d'électricité négative, occupent des orbites situées autour du noyau et définies par des lois aujourd'hui bien connues. Sous l'effet d'une cause extérieure, les électrons peuvent sauter d'une orbite « autorisée » à une autre. C'est précisément le saut d'un électron sur un niveau plus proche du noyau qui provoque le départ d'un grain de lumière : un photon.

Un exemple nous fera mieux saisir le phénomène. L'énergie thermique fournie par l'échauffement d'un corps force les électrons à se loger sur les couches extérieures. Ces électrons ainsi « excités » se trouvent dans un état instable. Ils ne tardent pas à retomber sur leur orbite normale. En y revenant, chaque électron libère de l'énergie sous la forme d'un photon. Plus grand est le saut, plus l'énergie libérée est importante. Dans le spectre lumineux, le rouge correspond aux énergies les plus faibles, le violet aux plus fortes.

Grâce à ces connaissances, il y a longtemps que les physiciens réalisent sur demande la lumière de couleur désirée. Un défaut entache pourtant toujours la lumière : elle est incohérente. La raison en est connue. A chaque instant, dans la masse des atomes, d'innombrables électrons jouent à chat perché et sautent d'une orbite à l'autre sans aucune discipline. Au lieu d'une troupe de photons marchant au pas, c'est une foule qui grouille en tous sens. Par leurs mouvements désordonnés, les électrons émettent ainsi des ondes lumineuses qui ne sont pas en phase. A cause de ce « désordre » le plus parallèle des faisceaux diverge très vite. Pour la même raison, il était impossible, jusqu'à ce jour de se servir des rayons lumineux à la manière des ondes hertziennes.

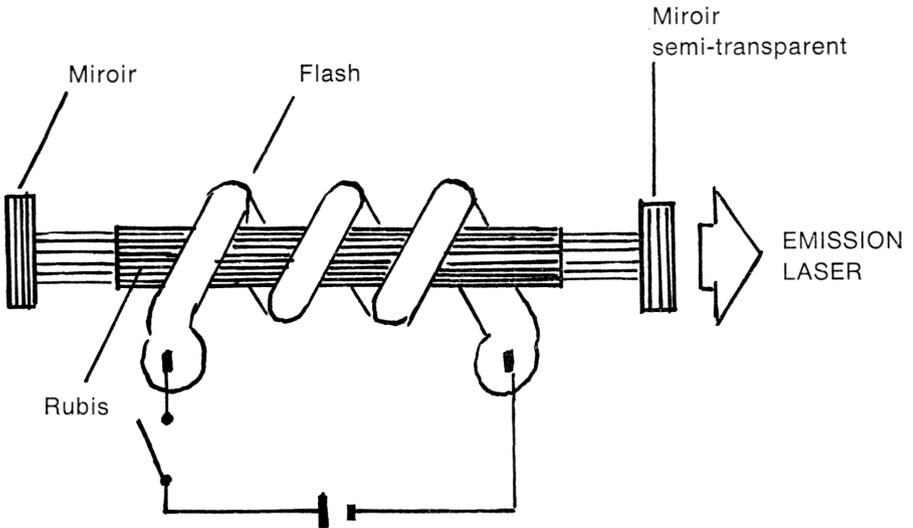
C'est en disciplinant les électrons émetteurs de photons que le laser produit de la lumière cohérente.

Comment le laser fait marcher au pas les électrons

Pour discipliner les électrons, le laser applique une découverte faite en 1949 par le Français Kastler. Le processus mis en jeu porte le nom de pompage optique. Cette image hydraulique indique bien en quoi réside le mécanisme : une excitation appropriée fait monter les électrons à un niveau supérieur ; puis, ces électrons reviennent à leur orbite stable, comme de l'eau pompée à un bassin supérieur redescend par son propre poids.

On connaît aujourd'hui **quatre types principaux de lasers**, c'est-à-dire d'appareils capables d'effectuer ce pompage optique.

Le premier en date, utilisé par Maiman, est le **laser à cristal de rubis**.



Dans cet appareil, l'excitation des électrons est réalisée au moyen d'un bâtonnet de rubis synthétique. L'usine Djévhirdjian à Monthey compte parmi les principaux producteurs de cette pierre synthétique. Celle-ci se fabrique en chauffant de l'alumine dans la flamme d'un chalumeau oxyacétylénique. Le cristal obtenu est fait d'oxyde d'aluminium dans lequel des atomes de chrome, un pour deux mille atomes d'aluminium, sont incorporés.

Ce sont précisément ces « impuretés » de chrome qui donnent la couleur rouge intense, caractéristique du rubis.

Pour fabriquer le laser, on place un bâtonnet de rubis synthétique argenté aux deux extrémités dans l'hélice d'un flash électronique puissant. La lampe-éclair fait sauter dans les atomes de chrome un électron d'un niveau 1 à un niveau 3. Ce dernier étant extrêmement instable, l'électron retombe aussitôt sur le niveau 2, en émettant un photon de lumière rouge. Après un temps variable, il revient au niveau 1, produisant un nouveau photon de lumière rouge. Le rubis fonctionne ainsi comme une mécanique qui fractionne en deux photons de lumière rouge une lumière d'énergie supérieure qui l'éclaire. Au lieu de les laisser tomber « en désordre », le laser provoque brutalement, à un instant donné, la chute de tous les électrons présents en position 2. Il obtient

cet effet de la façon suivante : par une fenêtre minuscule percée dans l'argenteure d'une des extrémités du bâtonnet, il envoie un faible faisceau de lumière rouge ayant la même longueur d'onde que celle produite par le saut des électrons de chrome du niveau 2 au niveau 1. Instantanément par un effet de résonance, tous les atomes de chrome se déchargent, produisant une lueur un million de fois plus forte que celle qu'émet une même surface de soleil.

En réalité, il n'est même pas besoin d'envoyer une impulsion rouge. De même que dans l'uranium 235, il se trouve toujours des neutrons pour amorcer la réaction en chaîne, de même dans le rubis, des électrons du chrome reviennent à leur état stable en produisant la lumière rouge. Une infime lueur suffit à déclencher l'averse d'électrons. Ensuite, l'émission s'entretient d'elle-même. A l'intérieur du rubis, la lumière subit de nombreuses réflexions sur les faces du bâtonnet et sur les extrémités argentées. Le cristal se trouve au milieu d'un jeu de glaces. Dans ce va-et-vient d'ondes, celles qui ne sont pas en phase s'annulent. Seules s'échappent entre les molécules d'argent les ondes strictement en phase. On obtient de la sorte une lumière parfaitement cohérente. Cette lumière rouge a une longueur d'onde de 0,6943 micron.

Il existe actuellement des **lasers à liquides**.

On utilise dans ces derniers des liquides chargés de colorants organiques — cyanines, xanthènes, coumarines, etc. Leur durée de vie dans l'état excité est plus brève que pour les solides, ce qui oblige à fournir par pompage une puissance accrue ou un temps très court. Mais il est possible, par ce procédé, en raison de leurs nombreux niveaux énergétiques voisins, de faire varier la fréquence de leur émission.

De plus, on dispose dans ce système d'un grand choix de matériaux utilisables, qui peuvent être obtenus à un prix modique.

Les **lasers à gaz** font intervenir un mélange d'hélium, à une pression qui est de l'ordre du millimètre de mercure, et du néon, à la pression de 0,1 mm de mercure.

Une décharge d'un courant à haute fréquence entre des électrodes extérieures au tube excite un grand nombre d'atomes d'hélium, dans un état de durée relativement longue. Leurs chocs avec les atomes de

néon ont pour effet de produire dans ces derniers un déplacement d'électrons. Les gaz ont sur les cristaux l'avantage d'être exempts de défauts de structure.

Les lasers à gaz se prêtent à un fonctionnement continu.

Le quatrième type est le **laser à semi-conducteurs**.

Un semi-conducteur est un corps non métallique qui conduit très peu le courant à l'état pur et aux températures peu élevées. Ce sont des éléments quadrivalents, comme le silicium et le germanium. Dans ces corps, la conductivité augmente rapidement avec l'élévation de température ou par introduction d'impuretés.

Si l'on introduit comme impureté un atome pentavalent, comme l'arsenic ou l'antimoine, la liaison qui s'opère entre le semi-conducteur et l'impureté laisse un électron libre pour la conduction : on a alors un semi-conducteur de type négatif ; si l'on choisit comme impureté un atome trivalent, comme le bore ou l'aluminium, la liaison laisse un défaut d'électrons ou « trou » : le semi-conducteur est du type positif. La conduction a lieu par l'intermédiaire de ces trous, les électrons qui viennent les remplir laissant derrière eux de nouvelles lacunes.

Le laser à semi-conducteur est fait d'une diode, c'est-à-dire d'un tube à vide avec jonction à arséniure de gallium, par exemple. Lorsqu'on envoie un courant dans cette diode, l'occupation des trous par les électrons du courant produit une libération d'énergie qui apparaît sous forme de rayonnement stimulé.

De tels lasers exigent des courants intenses ; ils travaillent donc de préférence par impulsions.

Dotée de propriétés surprenantes, la lumière du laser paraît appelée à des applications innombrables.

Le laser fait mouche sur la lune et sur les satellites

Même émise par les plus puissants projecteurs, la lumière se dissipe assez rapidement à travers l'espace. Quel que soient les lentilles ou les miroirs paraboliques employés, on ne peut en effet éviter une

dispersion de la lumière. Le laser produit une lumière d'un parallélisme remarquable. Un faisceau de 1 cm de diamètre parcourt 140 m sans subir de dispersion. Mettant à profit cette propriété, les savants des Etats-Unis ont réussi, il y a déjà une quinzaine d'années, une expérience qualifiée alors d'étonnante. Ils ont dirigé un faisceau laser sur la lune et obtenu l'écho en retour. Le voyage de ce rayon, à la lune et retour, a duré deux secondes et demie.

Une telle opération est utilisée aujourd'hui pour mesurer la distance des satellites terrestres. Le principe consiste à envoyer vers l'objet dont on veut connaître l'éloignement une impulsion lumineuse très courte. Une partie de cette lumière diffusée par l'objet, revient vers le point d'émission où elle est recueillie. De la mesure du temps séparant l'émission du signal et le retour de l'écho, on tire la distance de l'objet à l'« observateur ».

On utilise pour la mesure des distances des lasers déclenchés. Par analogie avec le radar (radio detection and ranging), ces dispositifs sont appelés lidar (Light detection and ranging).

Vers le rayon de la mort ?

Doué d'une grande énergie, le faisceau laser se prête merveilleusement bien à la concentration ponctuelle par les appareils optiques.

Les militaires utilisent cette propriété pour désigner une cible lointaine à l'attention du tir terrestre ou aérien ou encore à des fusées qui se dirigent automatiquement vers l'objet éclairé. On peut aussi asservir un engin à se diriger le long d'un faisceau laser : un engin antichar est ainsi guidé comme par un fil vers le char adverse. Guidé par le faisceau laser, une machine de forage creuse en ligne droite malgré les irrégularités de la roche.

Il existe aussi dans un grand nombre de laboratoires de petits lasers continus pour les réglages et les alignements d'éléments d'optiques ou mécaniques.

Des températures de plusieurs millions de degrés

Le laser est aussi une source de chaleur idéalement propre pour la soudure et l'usinage de matériaux ultra-purs, par exemple le silicium destiné à l'industrie des semi-conducteurs. Certains lasers, en particulier le laser au gaz carbonique, fournissent plusieurs kilowatts en régime continu. Concentrée, cette puissance provoque la fusion de n'importe quel matériau. Une lame de rasoir est percée instantanément ; une brique est traversée en quelques secondes et l'on envisage, sur ce principe, la construction de machines de forage silencieuses et propres pour les tunnels et les galeries de mines.

Ce sont les lasers déclenchés qui permettent de créer les plus énormes concentrations d'énergie que l'on sache produire.

Au moyen de lasers émettant plusieurs dizaines de joules en quelques nanosecondes, on est déjà parvenu à atteindre des températures de plusieurs millions de degrés. De telles températures peuvent amorcer certaines réactions nucléaires, comme la fusion atomique. On sait qu'une telle réaction atomique contrôlée fournit actuellement l'espoir d'obtenir une énergie moins dangereuse que celle de désintégration réalisée dans les centrales nucléaires.

De nombreux travaux se poursuivent dans cette voie, et des lasers 100 à 1000 fois plus puissants sont en construction.

Au service des télécommunications

On compte aussi sur le laser pour faciliter et améliorer les télécommunications.

Comme nous l'avons déjà fait remarquer, le laser jette un pont entre le domaine de l'optique et celui de l'électronique classique. Cette lumière peut être envoyée dans l'espace à la façon des ondes hertziennes. A cause de ses propriétés exceptionnelles, elle est envisagée comme un moyen commode pour les communications interstellaires et interplanétaires.

Dans les télécommunications terrestres, le laser supprimerait le problème de bande passante. Quelle que soit la densité des échanges dans un pays ou entre les nations, le laser suffira pour tous les messages. Ayant une fréquence très élevée, de l'ordre de 10^{14} hertz, le laser serait un excellent support d'information. Des centaines de milliers de canaux de télévision, des centaines de milliers de voies téléphoniques pourraient être acheminés simultanément. Cependant, on se heurte actuellement à la difficulté de moduler l'amplitude de l'onde en fonction du signal à transmettre, dès que ce signal présente une fréquence élevée. On ne sait pas encore construire de système capable de moduler l'onde lumineuse avec un rendement suffisant au-delà de quelque 10^7 hertz.

Applications médicales

Les rayons lasers ont aussi trouvé de multiples applications en biologie et en médecine.

En chirurgie, un laser continu peut servir comme une sorte de scalpel lumineux incisant les tissus par brûlure.

On utilise à cet effet les lasers à gaz carbonique, émettant sous une longueur d'onde de 10,6 micron. Le faisceau est focalisé sur environ 1 mm^2 . Pour des incisions cutanées, la vitesse de coupe est d'environ 3 cm/s. L'échauffement des régions voisines n'est pas gênant. La vitesse de cicatrisation est plus lente avec ce nouveau scalpel. Son principal avantage est d'être hémostatique et capable de coaguler des vaisseaux de 1 mm de diamètre, d'où son usage en chirurgie du foie.

Le laser a été employé aussi avec succès dans des opérations d'angiome oculaire. Il détruit les cellules malades instantanément et sans douleur ; il sert à souder des rétines sujettes à un décollement.

Dans le traitement des cancers, le laser a donné quelque espoir. Toutefois, les résultats obtenus sont variés et discutés. Pour le moment, le laser ne constitue pas un outil en cancérologie, car il n'atteint pas les cellules qui se trouvent en profondeur.

En biologie, les éclairs de laser utilisés en photographie ultra-rapide servent à l'étude de certains comportements de molécules : réactions chimiques, diffusion, polarisation, etc., dont la rapidité interdisait jusqu'à présent l'étude dynamique.

La mention de ces déjà nombreuses applications doit suffire à attirer l'attention sur l'importance de la découverte du Dr Maiman. Issu, comme l'énergie atomique, d'une plus grande maîtrise de l'homme sur la matière, le laser a été annoncé au public avec moins d'éclat. Pour beaucoup n'est-il pas encore une nouveauté insignifiante ? Son pouvoir lui-même se résume à peu de chose : par des procédés divers, il règle les « sauts » des électrons dans les atomes. Mais l'effet qui en résulte, la lumière cohérente, possède des propriétés qui étonnent le monde. Déjà, les réalisations obtenues grâce à cette lumière font classer le laser parmi les grandes découvertes de notre époque.

Henri Michelet