

LE LASER, 50 AN

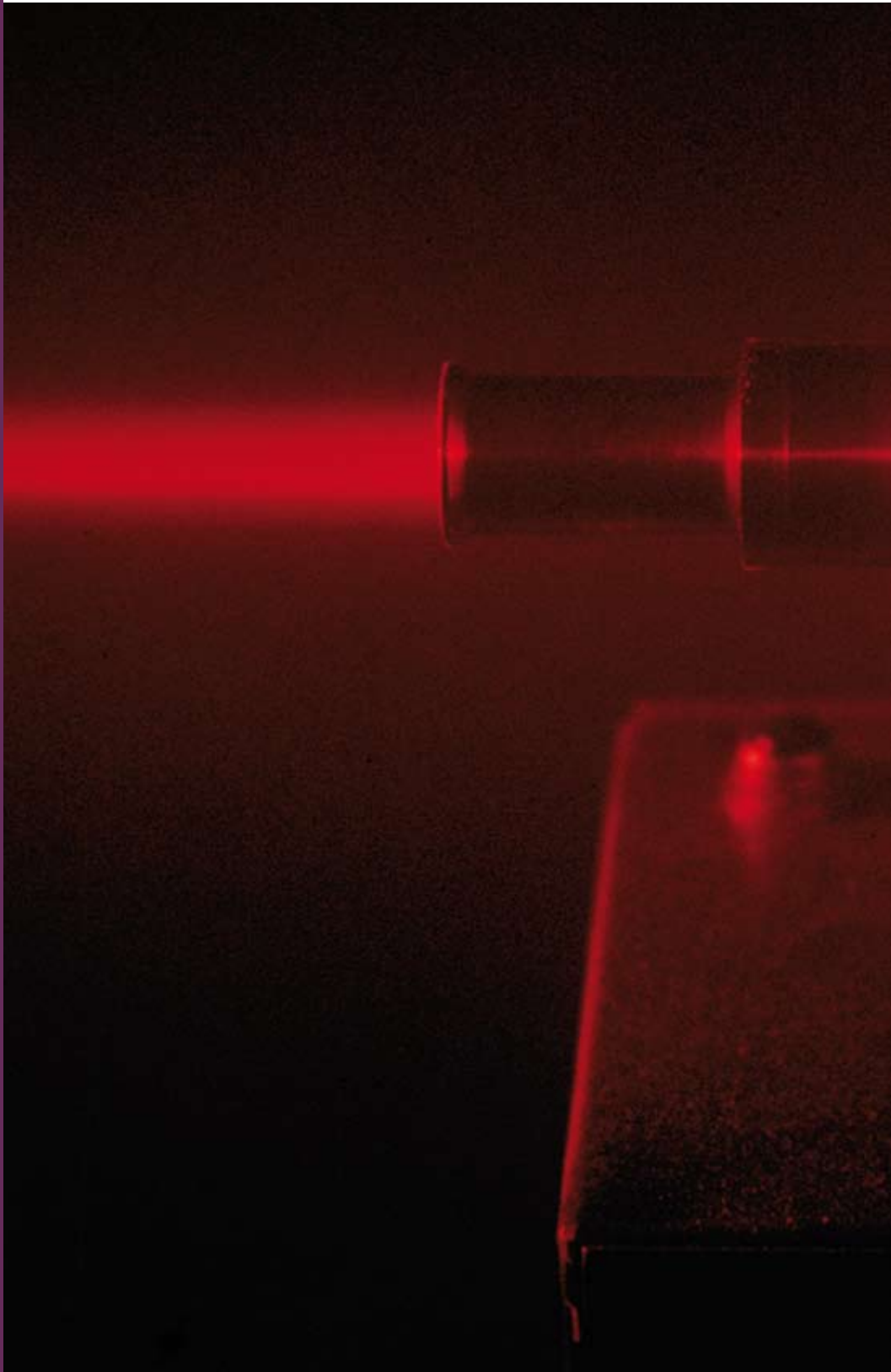
FRITZ GORO/TIME & LIFE PICTURES/GETTY IMAGES

Inventé en 1960 par Théodore Maiman, le laser était à l'origine «une solution cherchant un problème». Il est rapidement devenu un rayon à tout faire, qu'il s'agisse de lire de la musique ou de faire tomber la foudre

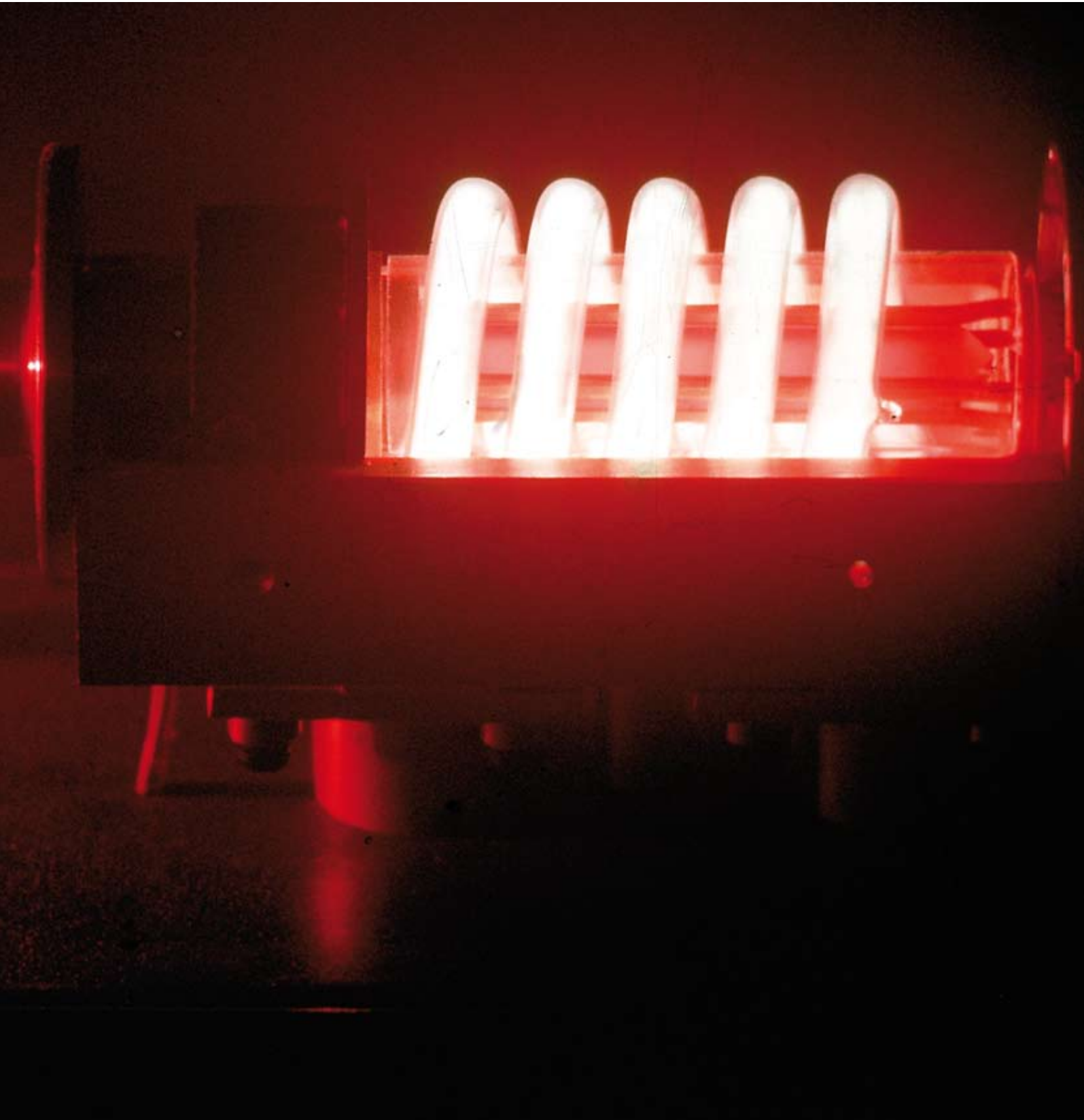
Bien avant l'invention du laser, on a prêté à la lumière de terrifiants pouvoirs destructeurs. Entre science et fiction, retour sur l'histoire du «rayon de la mort»

Les lasers d'aujourd'hui sont capables de produire des impulsions d'une brièveté inégalée et d'une puissance spectaculaire. Petit voyage dans le monde des superlatifs

Dossier réalisé
par Anton Vos et Vincent Monnet



S D'ILLUMINATION



ET LE LASER FUT

Le premier laser a été fabriqué en 1960. Son invention met fin à une course entre plusieurs équipes de recherche. La bataille des brevets, elle, a duré jusque dans les années 1980

Le 16 mai 1960, le physicien américain Théodore Maiman fait fonctionner le premier laser de l'histoire au Hughes Research Laboratory (HRL) à Malibu, en Californie. L'engin, bricolé dans un atelier, consiste en un cristal de rubis cylindrique d'un centimètre de diamètre. Les deux extrémités sont couvertes d'un film d'argent et il est entouré par un tube de lampe flash hélicoïdal. Présenté à la presse le 7 juillet, l'appareil fait d'emblée sensation. Certaines «unes» du lendemain évoquent même l'avènement tant attendu – et redouté – du «rayon de la mort». Mais c'est surtout le milieu scientifique qui est pris au dépourvu. Plusieurs chercheurs tentent en effet depuis des années de mettre au point le premier laser. En vain. Au point de commencer à douter qu'une telle prouesse soit possible. Et les voilà coiffés au poteau par un outsider particulièrement habile de ses mains.

«Pour être honnête, il faut faire remonter l'histoire du laser à Albert Einstein, rappelle Jean-Pierre Wolf, professeur au Groupe de physique appliquée. C'est – encore – lui qui est le premier à évoquer, dans les années 1910, l'existence théorique du phénomène physique à l'origine de cette technologie: l'émission stimulée (lire en page 19). L'illustre savant, père de la relativité générale, suggère, sur la base de relations mathématiques qui portent son nom, qu'une radiation venant frapper une molécule ou un atome peut, dans certaines conditions, stimuler l'émission d'une autre radiation venant s'ajouter à la première. En d'autres termes, pour un grain de lumière (un photon) qui entre dans le système, il y en a deux identiques qui en sortent.»

SEUL SUR UN BANC

De prime abord, la proposition d'Albert Einstein ne semble intéresser qu'un petit nombre de théoriciens. Quelques physiciens versés dans la mécanique quantique poursuivent

JEAN-PIERRE WOLF, professeur au Groupe de physique appliquée, Faculté des sciences

le travail théorique jusqu'à un point relativement avancé. Mais il faut attendre les années 1950 pour voir les premières avancées expérimentales. Comme il le raconte lui-même, c'est un matin, assis seul sur un banc public du Franklin Park à Washington, que Charles Townes, de la Columbia University de New York, a l'idée de fabriquer ce qu'il baptisera le maser (acronyme anglais pour *Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*).

Contredisant les prédictions de ses collègues qui affirment – voire parient – qu'il n'y arrivera jamais, Charles Townes met au point son premier prototype en 1954. L'appareil est constitué d'une cavité traversée par un flux de gaz d'ammoniac. Deux côtés de la boîte se faisant face sont couverts avec des miroirs. Cette stratégie permet aux micro-ondes d'effectuer de nombreux allers-retours dans la cavité et d'amplifier ainsi le phénomène de l'émission stimulée jusqu'à pouvoir fabriquer un faisceau d'une pureté inégalée du point de vue de la longueur d'onde.

TRAVAUX RUSSES

«Les micro-ondes ne sont pas de la lumière visible, précise toutefois Jean-Pierre Wolf. Elles ont une longueur d'onde au moins 1000 fois plus grande. Et il est beaucoup plus facile de créer de l'émission stimulée avec des micro-ondes qu'avec des ondes du visible. Charles Townes est donc l'inventeur du maser, mais pas encore du laser.»

La même année, de manière totalement indépendante, une équipe de l'Institut de physique Lebedev de Moscou achève de calculer l'ensemble des conditions nécessaires pour produire un rayon maser. Les travaux d'Alexander Prokhorov et de Nikolai Basov, étrangement semblables à ceux de Charles Townes dans leur conception générale, sont publiés juste après l'article du chercheur américain. Leur contribution sera néan-

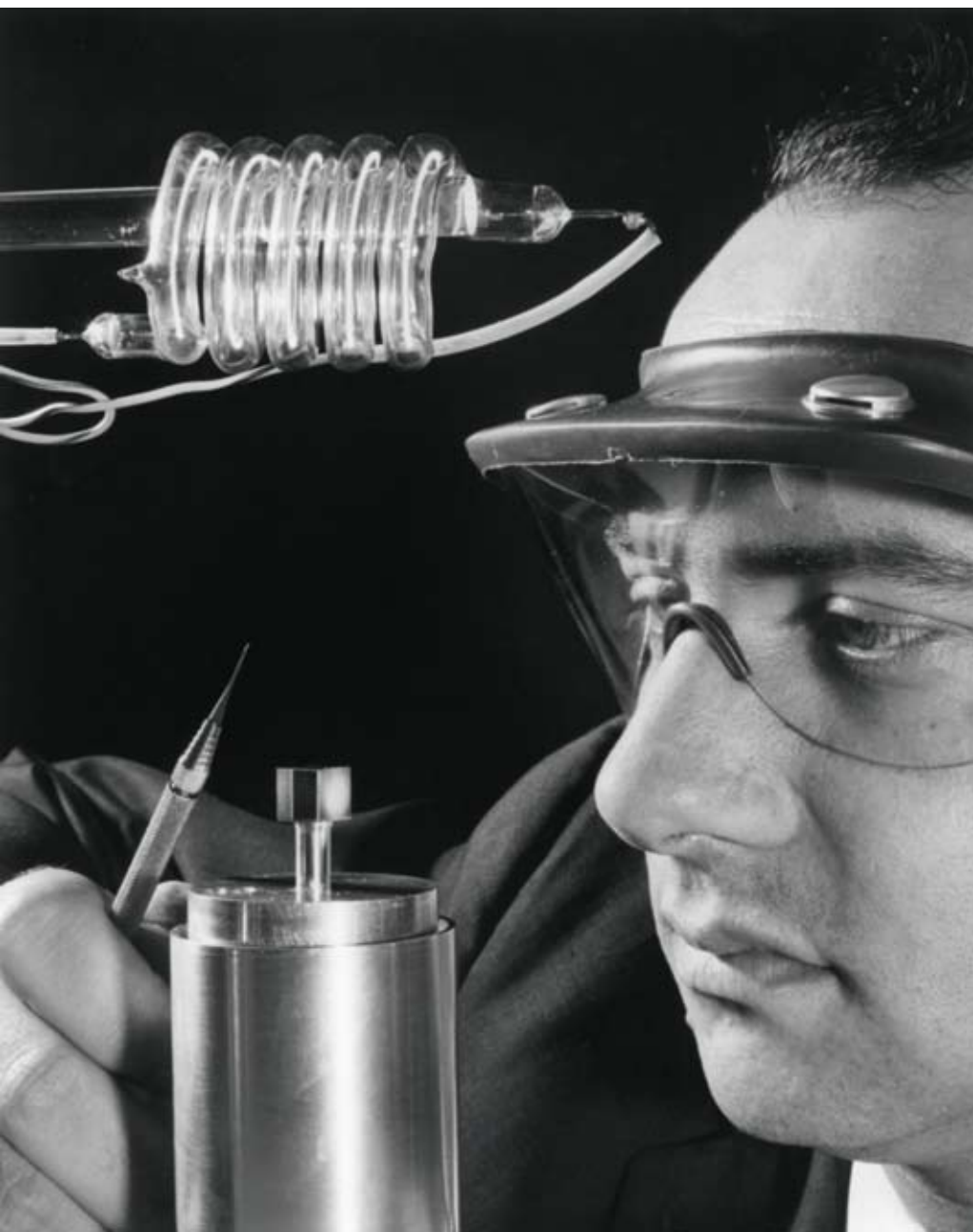
moins reconnue puisque les trois physiciens partageront le Prix Nobel de physique de 1964.

COURSE AU LASER

Les applications potentielles du maser s'avèrent d'emblée nombreuses, bien que confinées à des domaines assez spécialisés: amplification d'émissions de micro-ondes venues de l'espace ou de signaux utilisés dans la communication avec les satellites, fabrication d'horloges atomiques ultra-précises, etc.

Charles Townes, après ce premier succès, se penche rapidement sur la conception d'un «maser optique», qui fonctionnerait dans le domaine du rayonnement visible. En colla-

«Il est plus facile de créer de l'émission stimulée avec des micro-ondes qu'avec des ondes du visible. Townes est donc l'inventeur du maser, mais pas du laser.»



HUGUES RESEARCH LABORATORY

Théodore Maiman, inventeur du laser, expose le cristal de rubis en juillet 1960.

boration avec Arthur Schawlow, des Bell Laboratories, il rédige un papier dans la revue *Physical Review* en décembre 1958 qui décrit le principe de réalisation d'un tel engin. Les deux chercheurs y précisent notamment les différences technologiques et physiques importantes dont il faut tenir compte dans la conception d'un maser optique par rapport au maser classique. Il ne reste plus qu'à construire l'appareil. La course au laser est officiellement lancée. Elle se déroulera pourtant sur fond d'intrigue scientifico-judiciaire.

Dès 1957, Gordon Gould, un doctorant très motivé installé à quelques bureaux de Charles Townes à la Columbia University, est en effet secrètement obsédé par l'idée d'être le premier à fabriquer un maser émettant dans le domaine visible. Dans son journal de notes, il développe ses propres idées et utilise, pour la première fois, semble-t-il, le mot laser,

acronyme logique pour *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*.

FONDRE DU MÉTAL

Il y décrit également quelques prévisions perspicaces. Selon lui, le laser pourra produire des densités d'énergie telles que son faisceau serait à même de faire fondre du métal, voire de déclencher une réaction de fusion thermonucléaire. Il parle aussi de l'utilisation du laser pour établir une communication avec la Lune.

Malheureusement pour lui, il est mal conseillé au moment de déposer un brevet basé sur ses notes et se fait dépasser par Charles Townes et ses collègues.

Par la suite, loin de baisser les bras, Gordon Gould se lancera dans d'interminables et ruineuses démarches judiciaires afin de récupérer la paternité d'une invention dont il sera

toujours persuadé d'être l'auteur – alors même qu'il n'a construit aucun laser. Il perdra de nombreuses manches, en gagnera quelques-unes et finira tout de même, dans les années 1980, par récupérer certains brevets fondamentaux – au grand dam de l'industrie – et à se faire un bon paquet d'argent après avoir frôlé la faillite personnelle.

Cependant, en 1959, probablement dépité de s'être fait doubler, Gordon Gould quitte l'Université de Columbia sans terminer son doctorat et part avec son concept de laser dans une entreprise privée. Cette dernière se tourne vers l'armée pour obtenir un financement pour ses recherches. Sans surprise, les perspectives du laser selon Gould allèchent les caciques du Pentagone qui offre un million de dollars à l'entreprise pour qu'elle poursuive ses efforts dans la construction d'un laser ultimement capable de servir sous les drapeaux.

Malheureusement encore pour Gordon Gould, les militaires découvrent dans son passé qu'il a brièvement «flirté» avec le marxisme dans les années 1940. Même si l'ère du maccarthysme a pris fin cinq ans auparavant, cette information suffit largement pour l'écartier de son propre projet, classé secret défense.

A ce moment, toutes les équipes engagées dans la course à la fabrication du premier laser utilisent du gaz, estimant qu'il s'agit là du meilleur candidat susceptible de produire une émission stimulée. Toutes, sauf une. Celle de Théodore Maiman, qui décroche le Graal grâce à un cristal de rubis.

«QUELQUE CHOSE D'UTILE»

Né en 1927 à Los Angeles, le physicien de Malilbu est le fils d'un ingénieur lui-même auteur de plusieurs inventions. Son père voulait qu'il devienne médecin. Lui aspirait à être comédien. Doué en mathématiques, il devient finalement ingénieur physicien. En 1955, il est engagé au HRL où il travaille sur les masers. Quand il informe ses supérieurs qu'il veut tenter de fabriquer un laser, ceux-ci refusent

au regard des tentatives infructueuses des autres équipes engagées dans la course, préférant qu'il se consacre à «quelque chose d'utile». Têtu, Théodore Maiman menace de quitter la boîte et de fabriquer son appareil dans son garage. Le HRL cède et lui donne neuf mois, 50 000 dollars et un assistant pour accoucher d'un laser. Ce qu'il fait. A la surprise générale, puisque le rubis avait été largement disqualifié par d'autres scientifiques comme matériau potentiellement capable d'émettre un quelconque rayonnement laser.

Se penchant sur les calculs trouvés dans la littérature scientifique, Théodore Maiman s'aperçoit toutefois qu'ils comportent des erreurs. C'est pourquoi il choisit le cristal rouge pour tenter sa chance.

«L'avantage du rubis, c'est que les atomes de chrome qu'il contient, lorsqu'ils sont excités par la lampe flash, restent relativement longtemps dans cet état,

Le laboratoire cède et lui donne neuf mois, 50 000 dollars et un assistant pour accoucher d'un laser

explique Jean-Pierre Wolf. *Cela permet d'en emmagasiner un grand nombre qui se décharge tous en même temps sous l'effet de l'émission stimulée et produit une impulsion lumineuse intense.*»

Dans un premier temps, les collègues de Théodore Maiman ne cachent pas un certain scepticisme. Il faut dire que l'annonce tonitruante de l'invention d'un laser à la conférence de presse

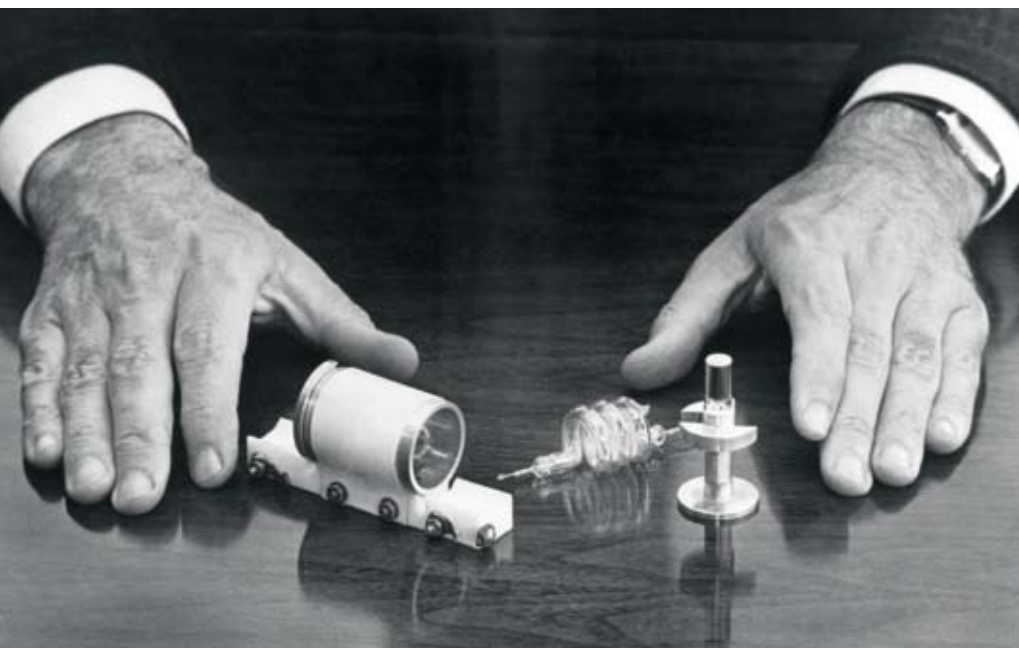
du 7 juillet 1960 a précédé toute publication officielle dans un journal scientifique de référence. Les concurrents malheureux n'ont donc aucun article à se mettre sous la dent pour vérifier les dires de l'inventeur. Ce dernier n'a pourtant pas traîné avant de soumettre ses résultats à la revue *Physical Review Letters*, un choix classique pour ce genre de découvertes. Seulement voilà, son papier est sèchement refusé. Motif: le chercheur du HRL vient à peine de publier un autre article sur l'excitation des atomes du rubis paru dans les pages de la même revue. Comme l'admettra plus tard Simon Pasternack, un des éditeurs du journal, le nouveau texte de Maiman semble à première vue n'être rien d'autre qu'une variation sur le même sujet. Le comité éditorial ne comprend pas qu'il rejette ainsi un article sur le point d'entrer dans l'histoire des sciences.

Pour ne rien arranger, la conférence de presse n'a donné lieu à aucune démonstration et, à aucun moment, l'inventeur affirme avoir «vu» de rayon lumineux. Comme il l'explique dans un livre paru en 2003*, Charles Townes demande même aux collègues du chercheur s'ils ont vu le moindre faisceau laser. A sa grande surprise, la réponse est négative.

En fait, le premier appareil de Théodore Maiman n'est pas conçu pour produire un tel rayon. Il émet une lumière trop tenue pour être observée à l'œil nu. L'intensité est tout de même suffisante pour en analyser le spectre et apporter ainsi la preuve expérimentale de l'existence du laser.

Les doutes sont cependant levés lorsque l'article est publié dans la revue *Nature* du 6 août 1960. D'une brièveté inhabituelle, il sera qualifié comme l'article probablement le plus important par mots que *Nature* ait jamais publié. ■

**A Century of Nature: Twenty-One Discoveries that Changed Science and the World*, par Laura Garwin et Tim Lincoln Ed. www.laserfest.org/ www.50ansdulaser.fr



Le premier laser, montré ici démonté, utilise comme milieu actif un cristal de rubis, illuminé par une lampe flash hélicoïdale et placé dans une cavité résonante cylindrique.

AU RAYON DE LA MORT

Les grandes avancées scientifiques suscitent de nombreux fantasmes. Bien avant l'invention du laser, on a ainsi prêté à la lumière de terrifiants pouvoirs destructeurs. De «La Guerre des mondes» à la «Guerre des étoiles», petit voyage entre science et fiction

L'idée d'une arme tirant de la lumière un pouvoir de destruction quasiment sans limites est sans doute à peu près aussi vieille que l'humanité. Dans la mythologie antique, nombreuses sont ainsi les divinités qui, à l'instar de Zeus, Thor ou Indra, exercent leur courroux en déchaînant la foudre.

Plus grand mathématicien de l'âge classique, c'est Archimède qui serait le premier homme à parvenir à domestiquer ce qui jusque-là restait l'apanage des Dieux. En 212 av. J.-C., au cours du siège de Syracuse, le savant grec met au point un système de miroirs permettant de concentrer les rayons du soleil au moyen duquel il incendie la flotte romaine.

Relatée huit cents ans après les faits par Anthémios de Tralles, un mathématicien et architecte byzantin, la vraisemblance de l'anecdote, probablement légendaire, a été amplement discutée jusqu'à la Renaissance. Depuis, de nombreuses expériences ont tenté de reconstituer le procédé. L'une des dernières en date remonte à janvier 2006, lorsque l'équipe du professeur David Wallace, du très sérieux Massachusetts Institute of Technology, s'est efforcée de bouter le feu à un navire devant des caméras de télévision à l'aide de miroirs polis. En vain, puisque malgré plusieurs tentatives, le meilleur résultat obtenu fut un peu de fumée sur la coque de navire.

WELLS ET LE «RAYON ARDENT»

D'une tout autre ampleur sont les ravages causés par le «*rayon ardent*» dont H.G. Wells dota les Martiens dans *La Guerre des mondes*. Dans ce roman, écrit en 1898 et qui est un des premiers ouvrages de science-fiction, l'invasisseur extraterrestre éradique l'humanité à l'aide d'un «*jet de lumière qui faisait s'affaïsser, inanimés, tous ceux qu'il atteignait, et de même, quand l'invisible trait ardent passait sur eux, les pins flambaient et tous les buissons de genêts secs s'enflammaient avec un bruit sourd.*»

Ces images frappent d'autant plus l'imaginaire populaire qu'à partir des années 1920 plusieurs



«La Guerre des mondes» vue par Steven Spielberg en 2005.

scientifiques prétendent avoir mis au point ce qu'on appelle désormais communément le «*rayon de la mort*».

En 1924, on peut ainsi lire dans le *New York Times* que l'inventeur américain Edwin R. Scott a développé un *appareil à éclair* capable d'abattre des avions à distance. Une dizaine d'années plus tard, Antonio Longoria, un scientifique espagnol émigré aux États-Unis, prétend avoir construit un engin permettant de tuer souris, pigeons, chats et chien à distance. A peu près à la même époque, Nikola Tesla, ingénieur qui figure parmi les pionniers du courant alternatif, annonce la conception d'une arme dont le rayon serait en mesure d'anéantir «*une flotte de 10 000 avions ennemis à une distance de 250 miles*».

Même si la presse évoque une nouvelle fois l'invention du «*rayon de la mort*» à son propos, le premier laser mis au point par Théodore Maiman est loin de pouvoir accomplir de tel-

les prouesses. Ce qui n'empêche pas les auteurs de science-fiction d'en faire presque immédiatement l'arme du futur.

«L'EMPIRE DU MAL»

Equipant superhéros et aventuriers interstellaires, le laser apparaît ainsi dans la série *Star Trek* dès 1964. Treize ans plus tard, il tiendra un rôle essentiel dans la lutte que se livrent les protagonistes de *Star Wars* à grand renfort de sabres lumineux. Manière de montrer que science-fiction et réalité sont parfois moins éloignées qu'il n'y paraît, la saga de George Lucas inspirera quelques années plus tard le fameux programme de défense spatiale américain voulu par le président Ronald Reagan pour lutter contre «*l'empire du mal*» qu'incarnerait alors l'URSS. Ruineuse, l'entreprise a été définitivement enterrée en 1993 par l'administration Clinton. A moins qu'un jour, dans une galaxie lointaine, très lointaine... ■

TOUJOURS PLUS BREF, TOUJOURS PLUS PUISSANT

Dès son invention, la technologie du laser a connu des progrès fulgurants. En cinquante ans, il a donné naissance à des appareils aux propriétés extrêmes et aux noms aussi exotiques que laser attoseconde, mégajoule ou encore exawatt. Entretien avec Jean-Pierre Wolf, professeur au Groupe de physique appliquée



Au moment de l'invention du laser, les chercheurs avaient déjà des applications en tête?

JEAN-PIERRE WOLF: Dans son édition du 8 juillet 1960, le lendemain de la présentation du premier

laser à la presse, le *New York Times* évoque déjà la possibilité d'illuminer la surface de la Lune, de vaporiser certains matériaux qui se trouvent sur son passage, d'étudier la structure intime de la matière grâce à sa couleur très pure ou encore de l'utiliser comme moyen de communication de très haute fidélité. C'est déjà beaucoup, mais reste très loin de ce qui a pu être réalisé depuis: disques compacts, télécommunication via les fibres optiques, spectroscopie, applications médicales et industrielles innombrables, etc. Cela dit, l'avenir le plus largement prédit dans la presse généraliste est celui de «rayon de la mort». Quel que soit le sens de cette expression pour les journalistes.

Théodore Maiman a créé la surprise en fabriquant le premier laser avec un cristal de rubis alors que tous ses concurrents pensaient qu'il était plus facile d'y parvenir avec du gaz. Peut-on produire de l'émission stimulée dans n'importe quel milieu?

Presque. Et d'ailleurs les progrès dans ce domaine ont été fulgurants. Dès que les chercheurs ont compris comment fabriquer un laser, il leur a fallu moins de dix ans pour en développer à partir de n'importe quel état de la matière: des cristaux, des gaz, des liquides (avec colorants), des semi-conducteurs... Au

point qu'aujourd'hui, pour s'amuser, les scientifiques ont fabriqué des lasers mangeables (une espèce de gelée contenant des colorants) ou potables (un mélange d'alcool). Il existe aussi des lasers naturels observés dans des nuages interstellaires ou dans les atmosphères de Vénus et Mars.

Chaque laser se caractérise par sa couleur très pure, qui se réduit quasiment à une seule longueur d'onde. Est-ce que cela signifie que l'on ne peut pas choisir n'importe quelle couleur?

Dans les premières années, en effet, les lasers n'émettaient qu'à une longueur d'onde fixe. Cette dernière se situait le plus souvent dans le rouge ou l'infrarouge, plus rarement dans le vert ou le bleu. Cette contrainte limitait alors beaucoup le champ d'application.

Pourquoi?

Disposer d'un laser à une seule longueur d'onde est très pratique si l'on veut percer des trous dans différents matériaux, opérer des yeux ou encore lire des disques compacts. Mais si l'on veut réaliser de la spectroscopie par exemple, ce pourquoi le laser est potentiellement un outil très performant, il est nécessaire de pouvoir balayer de manière continue une portion entière du spectre électromagnétique. Cela est devenu possible dans les années 1970, grâce à l'invention des lasers accordables. Les premiers d'entre eux ont été fabriqués avec des colorants organiques en solution dans un liquide. Certaines de ces molécules présentent des bandes d'émissions laser relativement larges. À l'aide d'un dispositif optique élémentaire (un prisme rotatif placé dans la cavité résonante), on peut sélectionner la longueur d'onde que

l'on souhaite. Puis, dans les années 1990 sont apparus les lasers accordables solides. Le principal d'entre eux est le Titane saphir, qui est encore très largement utilisé aujourd'hui. Ce cristal, dont la structure est très proche du rubis utilisé par Théodore Maiman, possède une bande d'émission laser qui s'étale, en termes de longueur d'onde, entre 1000 et 690 nanomètres, c'est-à-dire de l'infrarouge au rouge vif.

Pourquoi existe-t-il plus de lasers émettant dans le rouge et l'infrarouge que dans les autres couleurs?

La raison pour laquelle il y a tellement de lasers dans le rouge et infrarouge et si peu dans le bleu est la même que celle qui rend plus facile la construction d'un maser (qui émet des micro-ondes) que d'un laser (qui émet de la lumière visible). Physiquement, la probabilité de réaliser un laser chute très vite lorsqu'on cherche à obtenir des longueurs d'onde plus petites. Dans le cas des micro-ondes et de l'infrarouge, cette probabilité est encore suffisamment élevée pour ne pas poser trop de problèmes. Mais dès que l'on arrive dans le vert, le bleu, puis l'ultraviolet, cela commence à devenir très difficile.

Mais pas impossible puisque parmi les plus anciens lasers, on trouve celui à Argon, un gaz qui, une fois ionisé (Ar⁺), possède plusieurs raies d'émission, dont l'une dans le vert (à 514 nm) et l'autre dans le bleu (à 488 nm). Le problème est que le rendement d'un tel appareil est catastrophique. Il faut une véritable usine à gaz pour parvenir à émettre quelques malheureux photons. Cela l'éloigne des applications qui demandent un encombrement minimum et une alimentation électrique raisonnable.

Des progrès ont été réalisés puisqu'il existe maintenant des lecteurs de Blu-Ray Disc utilisant des lasers bleu-violet qui ne prennent pas beaucoup de place...

Il s'agit en l'occurrence de diodes laser (lire en page 23). Aujourd'hui, on arrive à fabriquer des lasers émettant dans toutes les longueurs d'onde. Les progrès technologiques ont permis de découvrir davantage de milieux actifs capables de rayonner dans les petites longueurs d'onde. On parvient même à concevoir des lasers qui émettent des rayons X, mais cela demande souvent de grandes infrastructures, comme un accélérateur de particules. Les physiciens maîtrisent cependant des méthodes plus élégantes et moins encombrantes pour arriver au même résultat.

C'est-à-dire?

L'idée est d'exploiter les propriétés d'optique non linéaire de certains milieux. Les scientifiques ont commencé par utiliser des cristaux spéciaux connus pour posséder la capacité de doubler la fréquence de la lumière (ce qui revient à diviser la longueur d'onde par deux). Un an à peine après l'invention du laser, on savait déjà doubler les fréquences des faisceaux laser de cette manière. En fait, si l'on dispose d'une puissance lumineuse assez élevée, on peut obtenir des effets non linéaires dans n'importe quel milieu. Même l'air possède de telles propriétés. Elles n'ont pas un rendement excellent, mais elles existent. Le grand défi des physiciens est alors de répéter cette opération de multiplication de fréquence le plus grand nombre de fois possible. En d'autres termes, ils cherchent à créer des harmoniques à partir d'une fréquence fondamentale, à l'image de ce que l'on connaît en musique. Les meilleurs parviennent aujourd'hui à la 30e, voire à la 40e

«Certains groupes parviennent à produire des impulsions laser dont la durée se mesure en attosecondes, soit un milliardième de milliardième de seconde»

harmonique d'une des fréquences fondamentales du Titane saphir. On entre ainsi dans le domaine des rayons X par la petite porte. Sans accélérateur de particules.

Une autre tendance très à la mode est la production d'impulsions laser extrêmement brèves...

En effet. Lorsqu'on parvient à produire un rayon laser qui ne soit plus monochromatique, mais dont la couleur s'étale sur une plage de longueurs d'onde, le résultat est une impulsion brève dans le temps. C'est une loi générale de la physique. Assez vite, les scientifiques ont obtenu des impulsions laser de l'ordre de la picoseconde (10^{-12} seconde, ou millième de milliardième de seconde). Dans les années 1980, grâce au Titane saphir et sa

large bande, le laser est entré dans le domaine de la femtoseconde (10^{-15} seconde). Cette dernière unité de temps permet de décomposer le mouvement d'atomes à l'intérieur des molécules. C'est avec un tel laser qu'Ahmed H. Zewail, chimiste américano-égyptien, a pu, le premier, étudier avec précision le déroulement d'une réaction chimique ultrarapide. Ce qui lui a valu le Prix Nobel de chimie en 1999. Avec le Titane saphir, il est possible d'émettre un rayonnement laser qui couvre une plage de longueurs d'onde large de 100 nm, ce qui produit des impulsions d'une dizaine de femtosecondes.

Mais on fait déjà mieux aujourd'hui. En tirant profit des harmoniques dont j'ai parlé plus haut, certains groupes parviennent depuis quelques années à produire des impulsions laser dont la durée se mesure en attosecondes (10^{-18} seconde, soit un milliardième de milliardième de seconde). Cet intervalle de temps, mille fois plus bref que la femtoseconde, permettrait de «filmer» le mouvement d'un électron autour de son noyau. Il existe encore peu de mesures avec de tels appareils. Mais ce domaine de recherche est très excitant et prometteur.

Quel type de laser utilisez-vous dans votre laboratoire?

Nous travaillons avec des lasers femtosecondes. Pour obtenir des impulsions plus brèves, il faut une installation spéciale que nous ne possédons pas. Mais nous collaborons avec un groupe dirigé par Ursula Keller, professeure à l'Ecole polytechnique fédérale de Zurich, qui a monté un laser «attoseconde».

A quelles recherches vous servent ces impulsions de quelques femtosecondes?

Entre autres à développer une méthode servant à discriminer des molécules que l'on ne peut pas distinguer de manière traditionnelle. Nous avons ainsi publié dans la revue *Physical Review Letters* du 26 juin une expérience dans laquelle nous avons réussi à différencier deux flavines (des molécules importantes pour le métabolisme cellulaire) très semblables. Les deux composés sont trop proches pour qu'aucune autre méthode d'analyse optique (fluorescence, par exemple) ne puisse les distinguer. Mais notre laser femtoseconde a permis de détecter et d'amplifier une légère différence dans la manière dont elles changent de forme. Potentiellement, une telle capacité de discrimination peut servir dans des applications médicales, comme le diagnostic plus précis et plus précoce de certaines infections ou maladies.

Vous possédez également un appareil, baptisé Teramobile, qui utilise un laser femtoseconde capable de dompter la foudre...

Cet appareil envoie en effet dans l'atmosphère des impulsions de lumière très courtes, mais très intenses (plusieurs centaines de millijoules durant quelques dizaines de femtosecondes). En traversant l'air, ils déclenchent une série d'effets très intéressants. Le faisceau laser, à l'origine situé dans l'infrarouge, devient blanc (il couvre tout le spectre visible). En plus, chaque impulsion acquiert une puissance de crête (plusieurs terawatts ou 10^{12} watts) qui équivaut à celle de toutes les centrales nucléaires de la terre réunies. Mais ces flashes ne durent que quelques femtosecondes et sont relativement espacés dans le temps. C'est pourquoi la puissance moyenne du faisceau du Teramobile est celle d'une bonne lampe de poche. Cela permet néanmoins d'io-

niser les molécules d'air sur son passage et de provoquer la condensation de la vapeur d'eau en gouttelettes. Toutes ces qualités ouvrent des perspectives alléchantes dans l'analyse des constituants (polluant, aérosols, etc.) de l'atmosphère, la maîtrise de la foudre et le contrôle de la météo (lire en page 20).

Le monde du laser est actuellement un vrai festival de préfixes obscurs. En plus du laser «attoseconde», on entend aussi parler de laser «mégajoule» et «exawatt». De quoi s'agit-il?

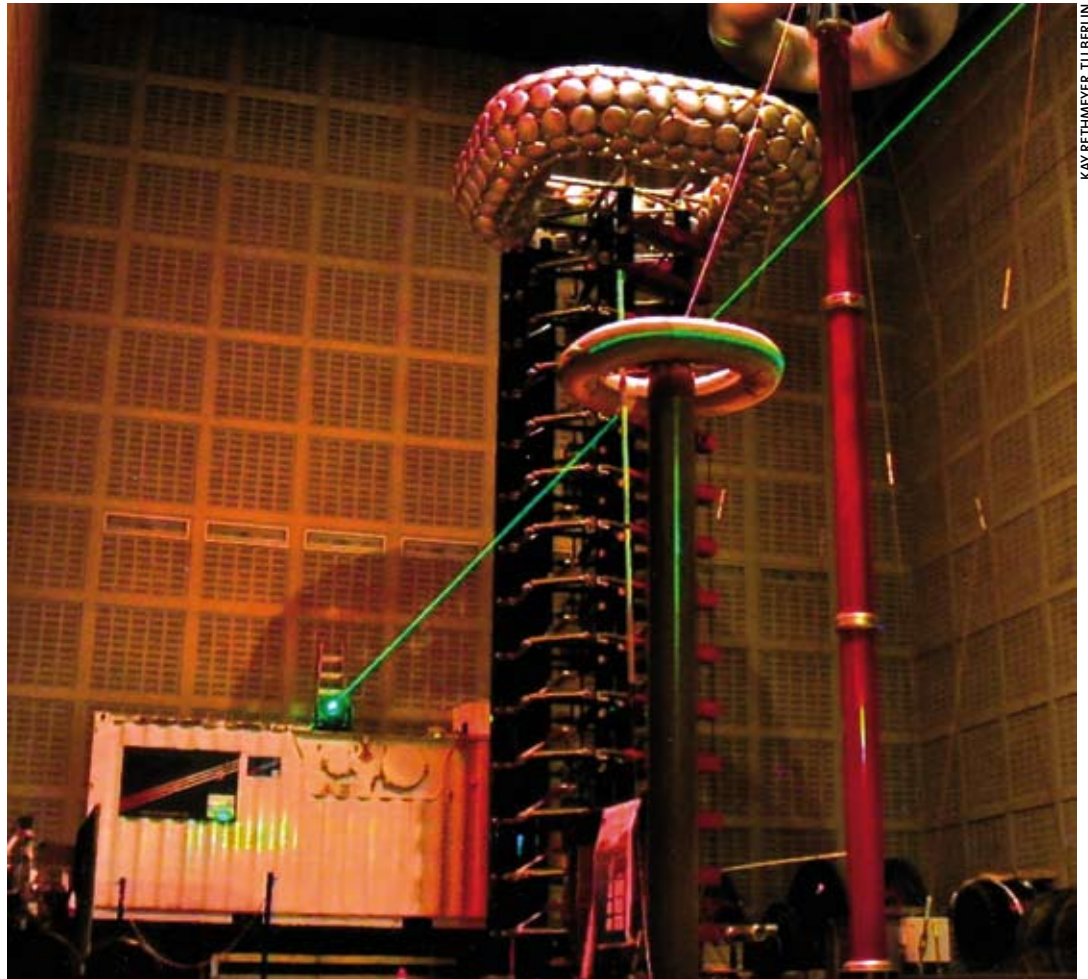
Ce sont deux machines très différentes. Le laser mégajoule est une machine gigantesque fabriquée en France (les Etats-Unis possèdent déjà une installation similaire) qui cherche à concentrer un maximum d'énergie dans un espace minimal. Il ne recherche pas la puissance (watts), mais l'énergie (joules) maximale. La première utilité d'un tel appareil est de recréer expérimentalement des conditions physiques de pression et de température extrêmes, semblables à celles présentes dans des explosions nucléaires. C'est pourquoi, en France, c'est la Direction des applications militaires du Commissariat à l'énergie atomique qui développe le laser mégajoule. Construit en Gironde, il de-

vrait être opérationnel dans le courant de cette décennie. Le but est de déposer 1,8 mégajoule (millions de joules) sur une cible minuscule de quelques millimètres. Au-delà de l'aspect militaire, cette machine présente un intérêt scientifique puisque des expériences de fusion inertielle sont notamment prévues.

Et le laser exawatt?

C'est aussi une machine gigantesque, mais largement plus passionnante pour le physicien que je suis. Le laser exawatt s'inscrit dans le projet européen ELI (*Extreme Light Infrastructure*). Cinquante laboratoires et 13 pays sont partie prenante. L'objectif affiché est de produire des impulsions laser très puissantes (un exawatt vaut 10^{18} watts) et très brèves (de l'ordre de l'attoseconde voire, pourquoi pas, la zeptoseconde, c'est-à-dire 10^{-21} seconde). Ce genre de faisceau dispose de la puissance nécessaire pour mettre en évidence, notamment, les propriétés optiques non linéaires du vide. La phase préparatoire doit durer jusqu'à la fin de l'année. La construction proprement dite devrait prendre cinq ans. ■

www.ulp.ethz.ch
www-lmj.cea.fr
www.extreme-light-infrastructure.eu/index.php



Le laser Teramobile (container blanc) et un générateur de haute tension (la tour à droite) sont prêts pour une expérience de guidage de la foudre

LE LASER, COMMENT ÇA MARCHE

Le laser tire profit d'un effet appelé «émission stimulée» dont l'existence à été théoriquement prédite par Albert Einstein au début du XX^e siècle. Explications

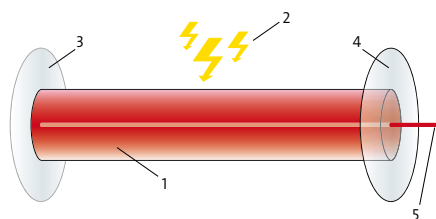
La première condition pour fabriquer un laser, c'est de disposer continuellement d'une population d'atomes excités plus importante que celle d'atomes au repos. En termes physiques, il s'agit de sortir de l'état d'équilibre thermodynamique. Et en termes techniques, il s'agit de «pomper» le milieu actif dans lequel on a envie de créer un rayon laser afin de créer une «inversion de population».

Théodore Maiman, l'inventeur du premier laser en 1960, a utilisé pour ce faire une lampe flash hélicoïdale dont une partie des photons est absorbée par les atomes de chrome contenu dans le cristal de rubis. L'idée vient en réalité de son assistant, Charles Asawa, qui cherchait une alternative au projecteur de cinéma dont les résultats n'étaient pas concluants.

Aujourd'hui, le pompage d'un laser se fait généralement à l'aide d'un autre laser dont la longueur d'onde correspond à un maximum dans la courbe d'absorption du milieu actif.

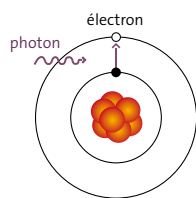
LA CAVITÉ RÉSONANTE

Ensuite, pour obtenir une émission stimulée, il faut des photons ayant exactement la bonne longueur d'onde. Les premiers d'entre eux sont naturellement fournis par l'émission spontanée. En traversant le milieu actif, correctement excité, ils déclenchent les premières émissions stimulées. Mais pour obtenir

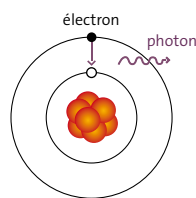


- 1) Milieu actif remplissant la cavité résonante.
- 2) lampe flash ou autre système de «pompage» destiné à créer une «inversion de population».
- 3) un des miroirs de la cavité résonante. 4) deuxième miroir, semi-transparent, de la cavité résonante.
- 5) faisceau laser sortant de la cavité.

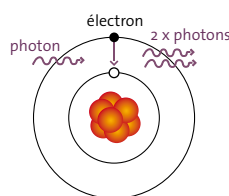
un faisceau suffisamment intense, il faut augmenter considérablement leur nombre. La solution, une idée qui vient de Charles Townes, chercheur à la Columbia University à New York, est de disposer deux miroirs placés face à face et espacés d'une distance déterminée pour obtenir la longueur d'onde recherchée. Du coup, tous les photons issus de l'émission stimulée parcourent plusieurs fois la cavité dans toute sa longueur tout en stimulant encore plus d'émission de photons. L'amplification devient considérable, tous les photons ont la même énergie et la même phase et, en plus, la géométrie du dispositif permet de sélectionner ceux dont la course est parfaitement perpendiculaire aux miroirs. Le rayon laser ainsi produit est monochromatique, cohérent et extrêmement directionnel.



Absorption: un photon de la bonne énergie arrive et est absorbé par l'électron. Ce dernier change d'orbite. L'atome est dit excité.



Emission spontanée: L'atome excité retombe spontanément dans son état fondamental. Il émet un photon d'une énergie précise



Emission stimulée: un photon d'une énergie précise arrive à proximité d'un atome excité. Son passage provoque la désexcitation de l'atome qui émet un deuxième photon de même longueur d'onde que le premier et en phase avec celui-ci

L'interaction du troisième type

L'absorption et l'émission spontanée de photons

En règle générale, les atomes interagissent avec la lumière de deux manières. La première est l'absorption. Un des électrons de l'atome absorbe un grain de lumière (photon) et l'énergie ainsi gagnée le fait grimper dans une orbitale plus énergétique. On dit alors que l'atome se trouve dans un état excité. La seconde manière est l'émission spontanée. Dans ce cas, un atome excité, au bout d'un moment, retombe dans son état fondamental. Autrement dit, l'électron qui était dans une orbitale d'énergie élevée, redescend dans un état inférieur et émet un photon, dont l'énergie correspond exactement à la différence d'énergie entre les deux orbitales. Ce phénomène d'émission spontanée (que l'on retrouve dans la fluorescence par exemple) est totalement incohérent. Ce qui se passe dans un atome n'influence pas ce qui se déroule chez son voisin. Contrairement à...

L'émission stimulée

En potassant les équations de la mécanique quantique, en 1916, Albert Einstein s'est rendu compte que la relation entre rayonnement et matière doit mettre en jeu une troisième forme d'interaction, les deux premières ne suffisant pas à rendre compte de la loi de Planck (celle qui introduit le concept de quantum d'énergie et explique le rayonnement dit de «corps noir»). Pour l'illustre savant, prix Nobel de physique en 1921, il doit exister, en plus de l'émission spontanée, un phénomène appelé l'émission stimulée. Albert Einstein montre ainsi que l'émission d'un photon par un atome qui se désexcite peut être induite par un autre photon qui a exactement la même énergie. L'arrivée du premier stimule l'émission du deuxième. Le plus fort, c'est que les deux grains de lumière possèdent non seulement la même longueur d'onde (énergie), mais aussi la même direction et la même phase. Cela signifie que les amplitudes s'additionnent. Résultat: si un photon entre dans le système et si deux identiques en sortent, cela veut dire qu'il y a amplification de la lumière. Il suffit ensuite de concevoir un dispositif ingénieux capable de reproduire ce phénomène un très grand nombre de fois afin de faire croître proportionnellement l'amplification. Le faisceau finalement obtenu est alors très pur du point de vue de la couleur, très directionnel – il ne diverge que très peu sur de grandes distances –, et très intense.

LE TÉRAMOBILE II: SUR LES PAS DE ZEUS

Le laser «Téramobile» analyse depuis plus de dix ans la composition de l'atmosphère et provoque des éclairs en laboratoire. Son successeur, le Téramobile II, pourrait faire pleuvoir, tomber la foudre et arrêter les tornades. S'il est construit

Déclencher la pluie, guider la foudre, calmer les tornades: ne s'agit-il pas là des pouvoirs dignes d'un puissant dieu antique? Jean-Pierre Wolf, professeur au Groupe de physique appliquée, n'en est pas un. Mais c'est bien en ces termes qu'il décrit les objectifs de son dernier projet de recherche, le *Center of Weather Modulation*, imaginé en collaboration avec Martin Beniston, directeur de l'Institut des sciences de l'environnement. Pour le concrétiser, il lui manque encore un laser mobile capable de générer et d'envoyer dans l'atmosphère des impulsions lumineuses très courtes et très puissantes

JEAN-PIERRE WOLF,
professeur
au Groupe
de physique
appliquée,
Faculté
des sciences

(de plusieurs dizaines de térawatts, ou milliers de milliards de watts). Un tel appareil n'existe pas encore. Il pourrait cependant prochainement voir le jour grâce à un partenariat que le physicien genevois entretient depuis longtemps avec des équipes allemandes de Berlin et de Dresde.

«L'appareil que nous aimerions construire serait le successeur du Téramobile qui est en fonction depuis 1999, explique Jean-Pierre Wolf. Ce gros laser, qui tient dans un conteneur de 6 mètres de long et qui peut être déplacé aisément sur le terrain, génère des *flashes* très courts (100 femtosecondes). La puissance de ces impulsions atteint 5 térawatts, ce qui correspond – durant un laps de temps extrêmement bref – à la puissance de toutes les centrales nucléaires du monde réunies.»

DÉTECTION DE POLLUANTS

Un rayon laser de cette puissance, lorsqu'il traverse un milieu transparent comme l'atmosphère, provoque une série d'effets non linéaires dont les physiciens tirent parti. L'un de ces effets est l'élargissement du spectre de l'impulsion. Possédant au départ une couleur quasi monochromatique, le spectre s'étale pro-

gressivement sur tout le domaine du visible. A la limite de l'infrarouge au départ, le rayon devient blanc. Cette particularité rend le Téramobile très intéressant pour la détection de composés polluants dans l'atmosphère (gaz nocifs, particules organiques, bactéries).

En envoyant dans l'air des impulsions lumineuses qui couvrent tout le spectre de l'ultraviolet à l'infrarouge, les chercheurs peuvent en effet détecter la présence de nombreux composés simultanément en analysant la lumière qui leur revient par diffusion et en identifiant les raies d'absorption.

«C'est un progrès notable par rapport à la technique plus ancienne du Lidar (télé-détection par laser), souligne Jean-Pierre Wolf. Le Lidar utilise des lasers monochromatiques dont la longueur d'onde est choisie en fonction du pouvoir d'absorption du polluant que l'on souhaite étudier. Cela fonctionne

très bien quand on sait à l'avance ce que l'on cherche. J'ai moi-même traqué de cette manière l'ozone dans le cercle arctique ou encore les importations de soufre entre Berlin-Est et Berlin-Ouest avant que le mur ne tombe. En revanche, si l'on veut analyser le contenu d'un panache produit par une explosion d'une usine chimique par exemple, un Lidar traditionnel n'est plus très utile. Le Téramobile si.»

PARATONNERRE LASER

Un autre effet non linéaire – et spectaculaire – dû à la puissance élevée du laser est la filamentation: les impulsions laser ionisent les molécules d'air sur leur passage. Résultat, le long de leur trajectoire, la conduction électrique augmente. En d'autres termes, en tirant avec le laser du Téramobile, les physiciens créent un fil électrique immatériel qu'ils peuvent pointer dans n'importe quelle direction.

Les cibles les plus intéressantes sont les nuages orageux, électriquement chargés. Le laser et son filament d'air ionisé pourraient théoriquement déclencher la foudre et guider l'éclair vers le sol. A défaut d'une épée laser, le monde pourrait bien se doter d'un paratonnerre laser.

«Nous nous sommes rapidement aperçus que les éclairs ne peuvent en aucun cas représenter une source d'énergie intéressante, note Jean-Pierre Wolf. Le nombre d'impacts sur un territoire est très dispersé dans le temps et dans l'espace. Et même si on parvenait à exploiter tous ceux qui tombent sur la France en une année par exemple, cela permettrait, au plus, de fournir de l'électricité pour une petite ville de 10 000 habitants. Comme le Téramobile, les éclairs sont puissants, mais ne véhiculent pas beaucoup d'énergie. Une application plus réaliste est plutôt celle de protection d'infrastructures sensibles comme les aéroports ou les centrales électriques contre les colères venues du ciel.»

Concrètement, en laboratoire, le Téramobile a démontré qu'il est capable de déclencher et de guider des décharges électriques de plusieurs

La Lune à portée de photon

Une des façons de se convaincre que les astronautes américains sont bel et bien allés sur la Lune est de réaliser une expérience à l'aide d'un laser. L'équipage de la mission Apollo 11 en 1969, puis ceux d'Apollo 14 et 15 suivis par la sonde automatique soviétique Lunokhod 2 en 1973 ont tous installé sur la surface de notre satellite des réflecteurs orientés vers la Terre. Aujourd'hui encore, il est possible de diriger un laser dans leur direction et de mesurer la lumière réfléchie sur Terre. Les photons ne sont pas nombreux à revenir à leur point de départ, mais ils sont suffisants pour mesurer la distance Genève-Lune au centimètre près.



Les physiciens genevois aimeraient construire un laser capable de déclencher la foudre et de faire pleuvoir.

millions de volts. En revanche, sur le terrain, les résultats sont plus nuancés. L'appareil a été capable de générer des décharges électriques dans des nuages, comme le rapporte un article paru dans la revue *Optics Express* du 14 avril 2008. Mais il n'a pas encore réussi à faire tomber la foudre sur le sol, malgré une campagne pleine d'espoir menée en été 2004 dans les Montagnes Rocheuses du Nouveau-Mexique, dans une région qui compte statistiquement le plus d'éclairs au monde.

ÉCLAIRS, PLUIE, TORNADES

«On doit pouvoir y arriver si l'on dispose d'un laser encore plus puissant, avance Jean-Pierre Wolf. C'est l'objectif du *Téramobile II* que nous avons en tête et qui devrait générer des impulsions d'au moins 50 térawatts.» Le projet doit encore recevoir l'aval des bailleurs de fonds publics suisses et allemands, les pays dont font partie les équipes de physiciens concernés.

L'objectif avoué des physiciens est d'exercer une influence macroscopique sur la météorologie. Faire tomber la foudre à volonté en est une. Mais faire pleuvoir ou freiner les tornades en sont deux autres, tout aussi réalistes aux yeux de Jean-Pierre Wolf.

«Le *Téramobile I* peut provoquer la condensation de gouttelettes d'eau dans un nuage sursaturé, explique-t-il. Nous sommes sur le point de publier un article sur ce phénomène dans la revue *Nature Photonics*. Si l'on parvient à déclencher la condensation en gouttelettes de l'humidité contenue dans un nuage, cela peut non seulement faire pleuvoir, mais aussi alourdir l'air et donc diminuer la vitesse du vent.»

Un appareil comme le *Téramobile II* pourrait être assez puissant pour réaliser cette prouesse dans des conditions naturelles. En pointant un laser vers un nuage ou une tornade en formation durant plusieurs heures, le nombre de gouttelettes formées devient tel

qu'un effet devrait se faire sentir. Pour obtenir les meilleurs résultats, il faut néanmoins maîtriser au mieux la physique de l'atmosphère. D'où la collaboration qui se dessine avec Martin Beniston, spécialisé dans ce domaine.

Les apprentis Zeus ne craignent-ils cependant pas d'être eux-mêmes arrosés par les effets de leur machine ou, pire, de recevoir la foudre sur leur propre tête? «Pour éviter que notre rayon laser ne guide l'éclair directement sur nous, nous disposons d'une botte secrète, rassure-t-il. Grâce à des astuces d'optique, nous pouvons générer la filamentation à partir d'une certaine altitude, par exemple à 1000 mètres, et sur des portions de longueur déterminée. Le dispositif peut donc déclencher le départ de la foudre dans le nuage, guider l'éclair sur une certaine distance, puis, à partir de l'altitude de 1000 mètres, lui laisser trouver son chemin tout seul vers le sol, comme d'habitude.»

Comme quoi, on peut jouer au Dieu antique sans pour autant être fou. ■

QUAND LA LUMIÈRE APPORTE LA PAROLE

L'invention du laser a contribué à l'explosion des télécommunications en permettant le développement des fibres optiques. Ces dernières véhiculent beaucoup plus d'informations que les traditionnels fils de cuivre

NICOLAS GISIN, professeur au Groupe de physique appliquée, Faculté des sciences

«Personne, bien sûr, ne pouvait prédire l'invention des disques compacts et des télécommunications par fibres optiques, les deux applications aujourd'hui les plus populaires du laser, estime Nicolas Gisin. Comme très souvent en science, on ne peut pas en même temps inventer une nouvelle technologie et imaginer l'usage qu'on en fera des décennies plus tard.»

Certes, dès le jour où le premier laser a été présenté à la presse, certains ont pensé à l'exploiter comme moyen de communication. Mais ils songeaient à l'utiliser de manière directe. Or, en traversant l'atmosphère (sans même parler des obstacles comme les montagnes, les édifices, les nuages, la pluie, la pollution...), le faisceau laser, aussi pur, cohérent et intense soit-il, subit des pertes considérables qui le rendent inutilisable à grande échelle.

TRANSPARENCE TRÈS PURE

C'est en 1966 qu'un ingénieur américano-britannique démontre qu'une fibre optique dans laquelle circulerait de la lumière peut être utilisée comme moyen de télécommunication. Pour ses travaux décisifs dans ce domaine, Charles Kao a d'ailleurs reçu le Prix Nobel de physique en 2009. Une de ses principales contributions est d'avoir mis en évidence que les pertes optiques importantes mesurées dans le verre dont sont fabriquées les fibres ne sont pas dues au matériau lui-même, mais aux impuretés qu'il contient. Cela a poussé l'industrie à perfectionner ses techniques de fabrication afin d'obtenir une transparence très pure.

Une fibre optique est constituée d'un cœur et d'une gaine, tous les deux en verre, mais

possédant un indice de réfraction différent. Cet agencement coaxial permet de conserver les photons à l'intérieur de la fibre, celle-ci jouant le rôle de guide d'ondes. Une configuration qui, alliée à l'utilisation d'un verre sans impuretés, réduit les pertes de manière importante et permet à la lumière de circuler sur de très grandes distances.

«Pour que la télécommunication optique soit réalisable, il ne faut pas seulement de bonnes fibres, mais aussi de bonnes sources de lumière, précise

peuvent émettre certaines longueurs d'onde, mais pas d'autres.

Au début, il y a donc eu un dialogue entre les développeurs de lasers et ceux de fibres optiques pour essayer d'accorder au mieux le choix du verre dans lequel seront usinées les fibres optiques et la ou les longueurs d'onde produites par les semi-conducteurs.

Un compromis a été trouvé (1,3 et 1,5 micromètre de longueur d'onde) et les premières fibres optiques commencent à être installées en masse dès les années 1980. Elles ont maintenant tissé leur toile sur toute la planète, sur terre comme sous les océans. La téléphonie et Internet ne pourraient d'ailleurs plus s'en passer.



ISTOCK

Les fibres optiques ont révolutionné les télécommunications

Nicolas Gisin. Les lasers sont les meilleurs candidats à ce poste puisqu'ils permettent de générer des impulsions rapides, monochromatiques et très intenses. Cela dit, le principe de base de la télécommunication implique de pouvoir allumer et éteindre la source de lumière un grand nombre de fois par seconde. Les premiers lasers, trop gros, n'étaient pas adaptés à cet usage.»

MINIATURISATION

Ce sont les lasers à semi-conducteurs qui ont fourni la solution de la miniaturisation. L'allumage ou l'extinction d'un dispositif de moins d'un millimètre (à l'aune de ce que fabrique l'industrie aujourd'hui) ne dure en effet pas plus d'un milliardième de seconde. La contrainte, toutefois, est que ces appareils

peuvent émettre certaines longueurs d'onde, mais pas d'autres.

Au début, il y a donc eu un dialogue entre les développeurs de lasers et ceux de fibres optiques pour essayer d'accorder au mieux le choix du verre dans lequel seront usinées les fibres optiques et la ou les longueurs d'onde produites par les semi-conducteurs.

Un compromis a été trouvé (1,3 et 1,5 micromètre de longueur d'onde) et les premières fibres optiques commencent à être installées en masse dès les années 1980. Elles ont maintenant tissé leur toile sur toute la planète, sur terre comme sous les océans. La téléphonie et Internet ne pourraient d'ailleurs plus s'en passer.

QUESTION DE COÛTS

«L'avantage des fibres optiques sur leur prédécesseur, les fils de cuivre, est énorme, mais il se résume essentiellement à une question de coût, souligne Nicolas Gisin. Le principal atout de la communication optique est la bande passante. On peut faire circuler beaucoup plus d'informations dans une fibre (sous forme de photons) que dans un fil métallique (sous forme d'électrons). Cela s'est encore amélioré dans les années 1990, lorsqu'a été développé le multiplexage.» Dans ce cas, on superpose dans la même fibre des signaux ayant des longueurs d'onde proches bien que différentes. Il suffit ensuite de les séparer à la sortie, ce qui se fait de manière courante aujourd'hui.

Résultat: si tous les habitants de Chine voulaient parler à tous les résidents d'Inde, ce milliard de communications pourrait passer simultanément dans un câble unique – constitué de nombreuses fibres optiques – dont le diamètre ne dépasserait pas une dizaine de centimètres. S'il était en cuivre, ce câble céderait sous son propre poids. ■

La musique et l'image sous laser

► Le disque compact est inventé en 1979, conjointement par les entreprises Philips (conception du disque et des lentilles de lecture) et Sony Corporation (définition du format et correction des erreurs de lecture). Il reprend et perfectionne une technologie développée pour le Laserdisc, un support conçu une année plus tôt et destiné à la vidéo.

► La surface du CD est parsemée de minuscules alvéoles qui réfléchissent le rayon laser émis par la tête de lecture. Un détecteur mesure les variations de la lumière réfléchiée et les transforme en un code binaire (une succession de 1 et de 0).

► La taille des alvéoles dépend de la longueur d'onde du laser (un semi-conducteur) utilisé pour la lecture. Les CD utilisent une longueur d'onde de 780 nanomètres (à la limite de l'infrarouge). Ces galettes peuvent stocker jusqu'à 700 mégabits (MB), soit près de 80 minutes de musique.

► Le succès commercial des CD a progressivement supplanté les disques en vinyle. La vente des premiers a dépassé celle des seconds à la fin des années 1980.

► En 1995 apparaît le DVD, développé par un consortium de dix firmes. Il sert principalement à l'enregistrement de données et de vidéo. Utilisant une longueur d'onde de 650 nm (rouge), plus petite que celle du CD, il permet un meilleur stockage de l'information. Un DVD (simple couche et simple face) peut contenir 4,7 gigabits (GB).

► Les cassettes magnétiques VHS sont supplantées par les DVD dès les années 2000.

► Les progrès technologiques permettent de développer au début des années 2000



des lasers à semi-conducteur émettant dans la couleur bleue violette, c'est-à-dire d'une longueur d'onde nettement plus petite que le rouge.

► En 2006, le Blu-Ray Disc, ou BD, est commercialisé. Développé par un consortium de dix firmes, il bat tous les records de stockage d'information. Utilisant une longueur d'onde de 405 nm, une galette (simple couche et simple face) peut contenir jusqu'à 50 GB.

UN RAYON À TOUT FAIRE

De la médecine à l'industrie, en passant par les technologies de l'information et le code-barres, les applications du laser sont aujourd'hui très nombreuses. Petit inventaire

Il affûte les yeux. L'usage du laser pour des opérations ophtalmologiques est courant. Il permet de corriger la myopie, l'hypermétropie ou l'astigmatisme, mais aussi de traiter des affections comme la dégénérescence maculaire.

Il nettoie la peau. En dermatologie, le laser permet d'enlever tatouage et tache de vin ou d'épiler de façon permanente.

Il détruit le cancer. Le laser peut générer une lumière tueuse de cellules malades qui absorbent préférentiellement un marqueur chimique. La thérapie photodynamique permet une détection précoce et des traitements sélectifs pour certains cancers.

Il révèle le corps. La tomographie optique cohérente permet d'imager des tissus biologiques en trois dimensions.

Il usine les matériaux. Le laser permet de souder, plaquer, marquer, percer, découper ou encore découper sans contact mécanique. Utilisé dans l'industrie automobile, aéronautique, manufacturière ou électronique, il s'attaque à des matériaux aussi divers que le bois, le papier, le textile, le plastique, l'acier, le cuivre, etc.

Il micro-usine les matériaux. La précision du laser permet de réaliser des pièces à l'échelle du micron, soit du milliardième de mètre, notamment pour l'horlogerie. Il permet également de marquer des objets à cette échelle par exemple pour lutter contre la contrefaçon.

Il dessine. Le laser permet de dessiner des motifs (photolithographie), dont la précision est de l'ordre de la longueur d'onde, c'est-à-dire moins d'un micron.

Il prend des mesures. Le laser est devenu un outil de mesure. Il peut remplacer le fil à plomb ou le mètre dans les travaux de bricolage, per-



met de cartographier une scène de fouille archéologique, un château médiéval...

Il guide les avions. Les avions peuvent connaître leur position à tout moment grâce à des gyromètres laser.

Il fait l'addition. Les codes-barres utilisés entre autres sur les produits vendus dans les supermarchés sont lus grâce à un laser.

Il rajoute une dimension. L'holographie couleur permet de réaliser de la photographie d'art en trois dimensions, tandis que les shows laser font depuis longtemps partie du monde du spectacle.

Il assure la sécurité. Le laser est un élément essentiel pour la sécurisation de site ou de lieux (détection d'intrus, protection de frontières...).

Il sonde l'atmosphère. Le LIDAR et le Tera-mobile sont devenus des outils indispensables pour détecter et analyser les polluants atmosphériques.

Il stocke de l'information. Les CD, DVD et autres Blu-Ray fonctionnent grâce au laser.

Il informe et communique. Les fibres optiques dans lesquelles circule de la lumière de lasers sont utilisées par la téléphonie fixe et mobile ainsi que par Internet. ■

L'APPAREIL PHOTO DES CHIMISTES

Les chimistes disposent de lasers capables d'envoyer des impulsions lumineuses extrêmement brèves qui leur permettent d'étudier dans le détail les transformations subies par des molécules lors d'une réaction chimique ultra-rapide

Au XIX^e siècle, dans le milieu hippique, une polémique fait rage: un cheval au galop décolle-t-il ses quatre sabots du sol en même temps ou non? L'œil humain ne possède pas une résolution temporelle suffisante pour trancher la question. C'est pourquoi, en cette époque

ÉRIC VAUTHEY, professeur au Département de chimie physique, Faculté des sciences

1877, il dispose de 24 appareils photographiques le long d'une piste équestre et les déclenche au passage de la plus noble conquête de l'homme. Il décompose et recrée ainsi le galop du cheval et montre que l'animal passe à chaque foulée par une phase sans contact aucun avec le sol.

«La femtochimie poursuit le même but que Muybridge – décomposer et recréer le mouvement –, mais avec des molécules à la place des chevaux, explique Eric Vauthey. Dans le cas du galop du cheval, il a fallu décomposer une séquence qui dure environ une seconde. Dans notre laboratoire, une réaction chimique ultrarapide dure entre quelques dizaines et quelques centaines de femtosecondes (10^{-15} secondes).»

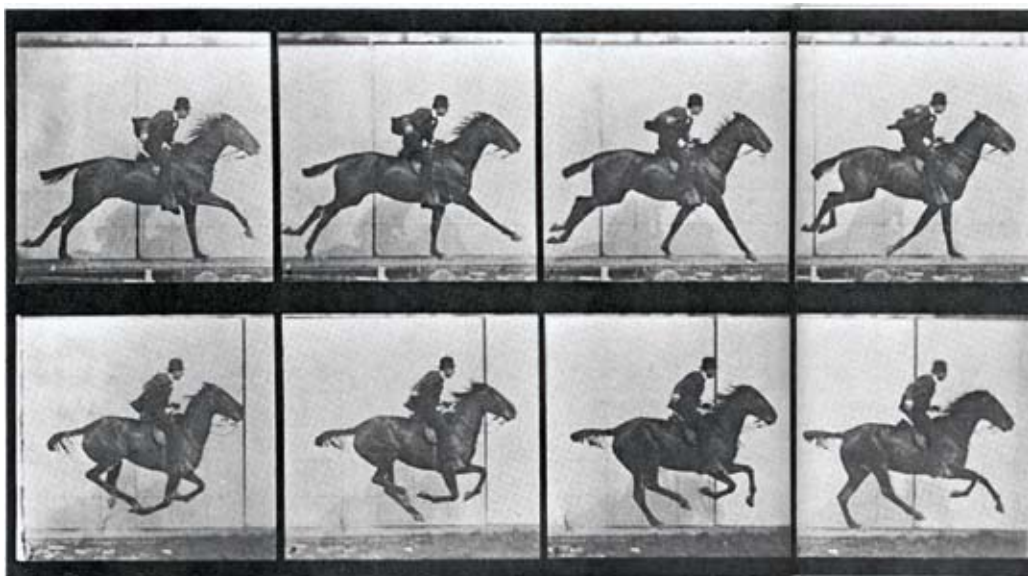
ETUDE DE LA PHOTOCHEMIE

Une femtoseconde est à la seconde ce que la seconde est à plus de 30 millions d'années. L'appareil photo des chimistes est donc forcément d'une autre facture que ceux du photographe du XIX^e siècle. Il s'agit en fait d'un laser capable de générer des impulsions lumineuses très courtes, de l'ordre de la centaine de femtosecondes.

«Notre domaine de recherche, ce sont les réactions photochimiques, précise Eric Vauthey. On les re-

d'avant cinéma, d'éminents spécialistes s'écharpent sur ce point important. Engagé par Leland Stanford, gouverneur de Californie et homme d'affaires passionné par le débat, le photographe américain W relève le défi et tente de résoudre l'énigme. En

par Leland Stanford, gouverneur de Californie et homme d'affaires passionné par le débat, le photographe américain W relève le défi et tente de résoudre l'énigme. En



Cette série de photos prises par le photographe américain Eadweard Muybridge aux alentours de 1887 permet de décomposer le mouvement du cheval au galop. Les chimistes utilisent le même principe pour étudier des réactions chimiques ultra-rapides à l'aide de lasers générant des impulsions lumineuses plus brèves qu'une nanoseconde (milliardième de seconde).

trouve dans la nature (dans les mécanismes de la vision et de la photosynthèse entre autres) ainsi que dans l'industrie et en médecine. Elles se déroulent lorsqu'une molécule est dans un état électronique excité, c'est-à-dire qu'elle vient d'absorber un grain de lumière (photon). Cette configuration permet à la molécule de subir des changements très rapides qui sont en général impossibles quand elle est «au repos».»

A titre d'exemple, l'un des processus photochimiques les plus rapides fait partie du tout premier rouage du mécanisme de la vision. Les bâtonnets et les cônes, les cellules de la rétine qui collectent la lumière, renferment des pigments (les rhodopsines) qui ressemblent à des pores, fermés par un «bouchon» (le rétinol). Quand ce dernier absorbe un photon, il change de forme et quitte sa position. Ouvertes, les rhodopsines laissent passer un flux d'ions dont le

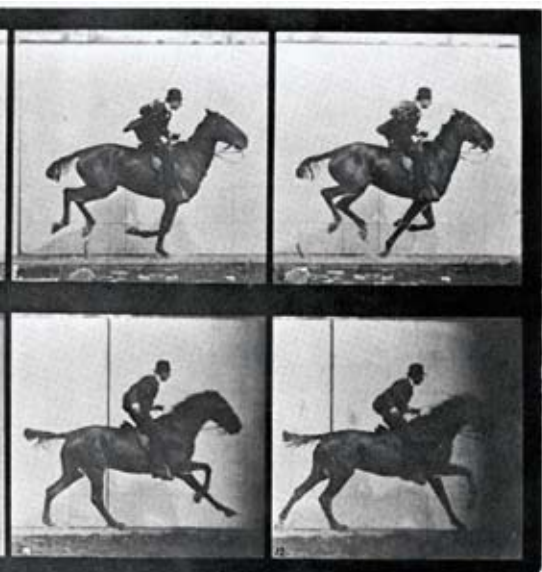
résultat est le déclenchement d'un signal nerveux en direction du cerveau. Le changement de forme du rétinol sous l'action de la lumière ne prend pas plus de 200 femtosecondes.

ETAPES INTERMÉDIAIRES

Les points de départ et d'arrivée des réactions photochimiques sont souvent connus, mais pas les étapes intermédiaires, trop éphémères. Ce sont pourtant elles qui déterminent la rapidité et la qualité de la réaction dans son entier.

Pour les étudier, les chercheurs soumettent un échantillon à un premier train d'impulsions extrêmement brèves envoyées par leur laser. «Elles durent typiquement de 10 à 100 femtosecondes et servent à placer les molécules que l'on veut étudier en état d'excitation», souligne Eric Vauthey.

Une portion du faisceau laser est déviée pour qu'elle prenne un chemin un peu plus long avant de frapper la même cible. Le dispositif est conçu de telle manière que chaque impulsion du faisceau primaire est suivie de près par une impulsion du faisceau secondaire. Cette dernière est le coup de sonde qui analyse les propriétés optiques de l'échantillon quelques «femto-instants» après son excitation.



Si les deux impulsions arrivent en même temps, on obtient la première «photo» de la réaction chimique, c'est-à-dire le moment de l'excitation. En rallongeant le chemin du faisceau secondaire d'un dixième de millimètre par exemple, on prend une photo de la situation 330 femtosecondes après le début de la réaction.

«Ce qui est formidable avec les lasers, c'est que l'on peut exploiter des effets d'optique non linéaire qui nous simplifient la tâche, explique le chimiste genevois. Ainsi, grâce à quelques aménagements sur la table optique, au lieu d'une impulsion monochromatique, c'est une lumière blanche, couvrant tout le spectre de la lumière visible, qui vient frapper l'échantillon. Nous pouvons donc à chaque coup de sonde obtenir le spectre d'absorption complet de la molécule, ce qui représente en quelque sorte son empreinte digitale. En suivant l'évolution de ce spectre pas à pas sur plusieurs milliers de femtosecondes,

nous pouvons déterminer par quelle transformation chimique passe notre échantillon tout au long de la réaction.»

Les travaux du chimiste genevois s'ouvrent sur de nombreuses applications, notamment du point de vue de la recherche fondamentale. Eric Vauthey collabore ainsi avec Stefan Matile, professeur au Département de chimie organique, qui développe des pigments capables de reproduire artificiellement la photosynthèse. Il étudie en détail le déroulement des réactions qui entrent en jeu dans ce processus, réactions qui ne dépassent pas les centaines de femtosecondes.

PEINTURE SUR CANETTES

L'industrie et la médecine sont elles aussi friandes de photochimie. Si la photographie argentique (qui fonctionne sur ce principe) est en train de passer de mode et ne mobilise plus de grands efforts de recherche, il en va autrement de la photopolymérisation. Cette technique est utilisée notamment dans le traitement des caries (en remplacement des plombages), ainsi que dans l'application de peinture sur les cannettes de limonade, de bière et autres. Une pâte est déposée en fine couche sur la boîte et se solidifie instantanément sous l'action de rayons ultraviolets. C'est une méthode rapide et propre, puisque les solvants ne sont plus nécessaires.

Un des soucis de l'industrie est de trouver les bons pigments qui absorbent les bonnes couleurs, ne fluoresçant pas et, surtout, ne déclenchant pas de réactions photochimiques indésirables. De plus, l'énergie de ces molécules excitées doit être dissipée de manière rapide et efficace sous forme de chaleur, sinon le pigment risque d'être détruit.

«L'ADN représente un exemple remarquable de la conversion ultra-rapide de cette énergie d'excitation en chaleur, note Eric Vauthey. Les bases de la double hélice, lorsqu'elles absorbent les rayons ultraviolets du Soleil, retombent dans leur état fondamental en quelques centaines de femtosecondes. Pendant ce bref instant, la température des bases monte cependant à un niveau très élevé. Mais, grâce à des processus dont le mécanisme exact, étudié entre autres à l'Université de Genève, n'est pas encore totalement compris, l'ADN parvient à dissiper cette énergie de manière très efficace et évite ainsi d'être détruit. La plupart du temps, du moins. Car l'apparition du mélanome est lui aussi un résultat, indésirable cette fois, de la photochimie.» ■

Neuf Nobel pour un rayon

► **1964:** Charles H. Townes, Alexander M. Prokhorov, et Nicolay G. Basov pour leur travail théorique ayant conduit au premier laser construit par Théodore Maiman.

► **1966:** Alfred Kastler pour la découverte et le développement du pompage optique, permettant en particulier l'inversion de population dans les lasers.

► **1981:** Nicolaas Bloembergen et Arthur L. Schawlow pour leurs contributions décisives à la spectroscopie laser et à l'optique non linéaire, dans le prolongement immédiat des travaux initiaux sur les lasers.

► **1989:** Norman F. Ramsey pour ses travaux sur le maser à hydrogène et la méthode de résonance ayant conduit à la réalisation d'horloges atomiques.

► **1997:** Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji, et William D. Phillips pour le refroidissement et le piégeage d'atomes à l'aide de lumière laser.

► **1999:** Ahmed Zewail (chimie) pour l'utilisation de lasers femtosecondes en spectroscopie, permettant d'observer le mouvement des atomes dans une molécule au cours d'une réaction chimique.

► **2001:** Eric A. Cornell, Wolfgang Ketterle, et Carl E. Wieman pour la réalisation des condensats de Bose-Einstein, un nouvel état de la matière, en utilisant les techniques de refroidissement d'atome par laser.

► **2005:** John L. Hall et Theodor W. Hänsch pour le développement de spectroscopie laser à haute précision, en particulier grâce aux peignes de fréquence optiques basés sur l'utilisation de lasers à impulsions ultra-brèves.

► **2009:** Charles K. Kao (Université de Hongkong, Chine) pour ses recherches sur la transmission de lumière dans les fibres optiques, et pour moitié à Willard S. Boyle et George E. Smith (Bell Labs, Etats-Unis) pour leur invention d'un dispositif opto-électronique de capture d'image, autrement dit le capteur CCD

source: www.5oansdulaser.fr