

Weiss, de l'Université d'État de Pennsylvanie, et John Moore, de l'Université de Floride, nous avons étudié les échantillons d'ADN d'Amérindiens Muskokes, qui vivent aujourd'hui dans l'Oklahoma. L'haplotype le plus fréquent est encore l'haplotype IIA, mais il n'est présent que chez 38 pour cent des individus étudiés. Cette faible fréquence s'explique par l'histoire de la tribu Muskoke : elle est entrée pour la première fois en contact avec les Européens en 1541 et s'est ensuite croisée largement avec des populations européennes et avec des esclaves noirs.

Au total, la prédominance de l'haplotype IIA confirme que les Amérindiens des trois Amériques proviennent d'une même onde migratoire, d'origine asiatique.

À Stanford, Peter Underhill et Luca Cavalli-Sforza ont corroboré nos résultats en étudiant également l'haplotype *DYS19* et aussi un SNP nommé *DYS199* : en ce site de l'ADN, les individus ont soit une base C, soit une base T.

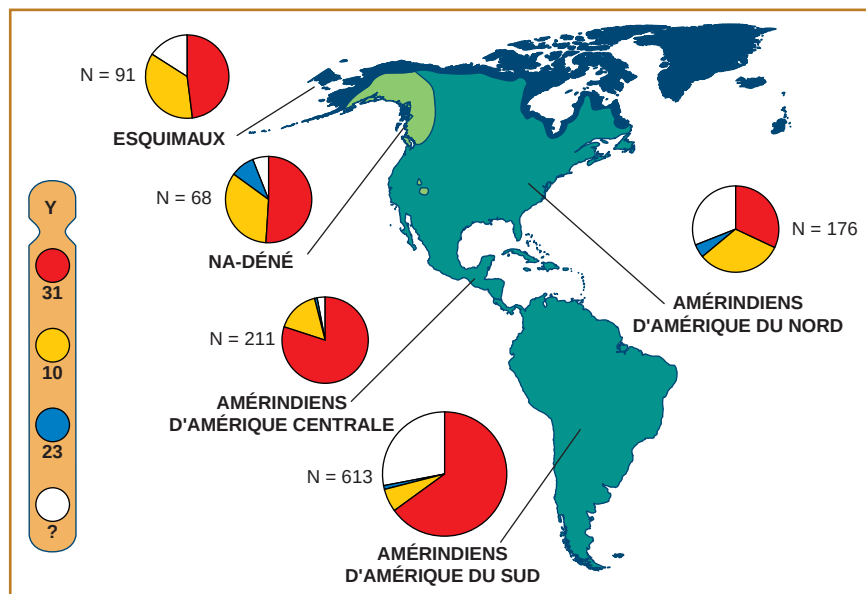
On trouve l'allèle C de *DYS199* chez tous les Européens, les Asiatiques, les Africains et les primates supérieurs étudiés. En revanche, l'allèle T apparaît chez 91 pour cent des 54 individus d'Amérique du Nord étudiés, soit 15 Cartianos, 17 Suruís, 8 Mayas, 2 Colombiens, 6 Esquimaux et 6 Navajos. De plus, une trentaine des 46 individus qui avaient l'allèle T de l'haplotype *DYS199* étaient porteurs de l'allèle A de l'haplotype *DYS19*.

Puis nous avons confirmé que tous les Amérindiens IIA que nous avons étudiés portaient également l'allèle T de l'haplotype *DYS199*. Toutefois, cet allèle était absent des échantillons provenant de Mongolie ou de Sibérie : la mutation de C en T a probablement eu lieu au cours de la migration des peuples asiatiques qui ont peuplé l'Amérique, ou immédiatement après celle-ci.

P. Underhill a mis en évidence les allèles A de l'haplotype *DYS19* et T de l'haplotype *DYS199* chez 66 pour cent des Esquimaux et chez 33 pour cent des Navajos. Or, les trois groupes linguistiques proviendraient de trois vagues migratoires différentes.

D'autres études ont confirmé la présence de l'allèle T chez les Na-Déné et chez les Esquimaux Nord-américains : cette présence est-elle due au croisement de ces peuples avec des Amérindiens ? L'hypothèse précédente est-elle fautive ?

Par ailleurs, la faible fréquence de l'allèle T dans les populations sibé-



4. LES PRINCIPAUX GROUPES D'INDIGÈNES AMÉRICAINS ont été identifiés par des analyses génétiques. Pour chaque groupe, les principaux types de chromosomes Y sont indiqués (haplotypes 31, 10 et 23). L'haplotype 31 est l'haplotype fondateur le plus important. L'haplotype 10 est l'haplotype fondateur secondaire, ancêtre de l'haplotype 31, duquel il diffère par une base C sur le site *DSY199*. L'haplotype 23 diffère des haplotypes 10 et 31 par une mutation sur le site *RPS4Y*. Quelques individus représentent des chromosomes qui n'ont pas encore été caractérisés (en blanc) ou qui proviennent d'autres groupes ethniques (Européens, Africains, etc.).

riennes (Esquimaux de Sibérie, Chukchis et Evens) est surprenante : y a-t-il eu des migrations inverses, de l'Amérique vers l'Asie ?

Environ 90 pour cent des Amérindiens d'Amérique du Sud et 50 à 70 pour cent des Amérindiens d'Amérique du Nord ont un même haplotype principal de chromosome Y. Peut-on alors identifier la population asiatique à l'origine de la majorité des Amérindiens ?

Pour répondre à cette question, nous avons étudié 306 hommes de diverses populations du monde entier, en mettant l'accent sur celles originaires de Mongolie et de Sibérie. Nous avons enquêté sur cinq groupes linguistiques différents parmi les Sibériens : les Bouriates, les Yakoutes, les Evenkis, les Altaïens et les Kètes. Nous avons employé sept types de polymorphismes et identifié 30 polymorphismes sur le chromosome Y humain.

Les populations asiatiques les plus proches génétiquement des Amérindiens sont les groupes originaires de Sibérie, les Kètes (de la vallée de l'Ienisseï) et les Altaïens (des monts Altaï). Les trois autres groupes sibériens sont regroupés avec les Mongols.

Un haplotype du chromosome Y observé chez les Altaïens et les Kètes conserve une proche parenté avec le principal chromosome Y des Amérindiens. Les haplotypes similaires à celui-ci sont rares dans la plus grande partie

de l'Asie (Chine, Japon, Indonésie), mais ils sont abondants dans toute l'Europe. Ainsi un type de chromosome Y ancestral, vieux de plus de 30 000 ans en Eurasie, serait à l'origine de la majorité des chromosomes Y européens, des chromosomes Y des Kètes et des Altaïens de Sibérie et des chromosomes Y des indigènes américains. Autrement dit, des peuples auraient migré vers l'Amérique en passant par le Nord de l'Asie, à travers la Sibérie et la Béringie.

Sergio PENA et Fabrício SANTOS sont professeurs à l'Université fédérale de Minas Gerais.

S.D. PENA, F.R. SANTOS, N.O. BIANCHI, C.M. BRAVI, F.R. CARNESE, F. ROTH-HAMMER, T. GERELSAIKHAN et al., *A Major Founder Y-Chromosome Haplotype in Amerindians*, in *Nature Genetics*, n° 11, pp. 15-16, 1995.

P.A. UNDERHILL, L. JIN, R. ZEMANS, P.J. OEFNER et L.L. CAVALLI-SFORZA, *A Pre-Columbian Y Chromosome-Specific Transition and Its Implications for Human Evolutionary History*, in *Proceedings of the National Academy of Sciences, U.S.A.*, n° 93, pp. 196-200, 1996.

F.R. SANTOS, A. PANDYA, C. TYLER-SMITH, S.D. PENA, M. SCHANFIELD, W.R. LEONARD, L. OSIPOVA et al., *The Central Siberian Origin for Native American Y Chromosome*, in *American Journal of Human Genetics*, n° 64, pp. 619-628, 1999.

Lasers à impulsions ultracourtes

JOHN-MARK HOPKINS • WILSON SIBBETT

Les lasers dont les impulsions ne durent que quelques millièmes de nanoseconde se sont imposés dans plusieurs sciences et techniques : les chirurgiens les utilisent pour de délicates opérations des yeux, les ingénieurs des télécommunications pour transmettre rapidement des données, les chimistes pour observer le comportement des molécules qui réagissent.

En combien de temps avez-vous lu cette phrase ? Reconnaître la première lettre n'a pris que quelques millisecondes (10^{-3} seconde). Des molécules de neuromédiateur ont transporté les signaux d'un neurone à un autre, dans le cerveau, en 0,05 milliseconde, soit 50 microsecondes (10^{-6} seconde). Teniez-vous votre revue à la bonne distance ? La lumière a mis une ou deux nanosecondes (10^{-9} seconde) de la page à vos yeux, et environ 20 picosecondes (10^{-12} seconde) pour traverser le cristallin de l'œil. Ces événements très brefs sont toutefois des éternités par rapport aux impulsions laser les plus courtes que l'homme sait aujourd'hui produire : ces impulsions laser durent seulement quelques femtosecondes (ou millièmes de milliardième de seconde).

On conçoit difficilement la brièveté d'une femtoseconde (10^{-15} seconde). Une femtoseconde est à une seconde ce qu'une seconde est à 32 millions d'années, et il y a dix fois plus de femtosecondes dans une seconde qu'il n'y a d'heures écoulées depuis le Big Bang. De nombreux mécanismes fondamentaux de l'Univers, tels le mouvement des électrons entre les atomes ou la formation de liaisons entre deux molécules, se produisent en des temps inférieurs à quelques centaines de femtosecondes. Les physiciens utilisent des impulsions femtosecondes pour enregistrer

et étudier en détail ces événements. À la fin du XIX^e siècle, Jules Étienne Marey utilisait des flashes de lumière qui duraient quelques microsecondes pour produire de superbes photographies de chevaux au galop. À l'Institut de technologie de Californie, Ahmed Zewail a observé le déroulement de réactions chimiques de quelques centaines de femtosecondes (ce travail a été récompensé par le prix Nobel de chimie en 1999). Plus récemment, les physiciens ont «figé» le mouvement des électrons dans des matériaux semi-conducteurs, de sorte que, comprenant mieux le fonctionnement des dispositifs optoélectroniques, ils ont mis au point des systèmes rapides de traitement du signal.

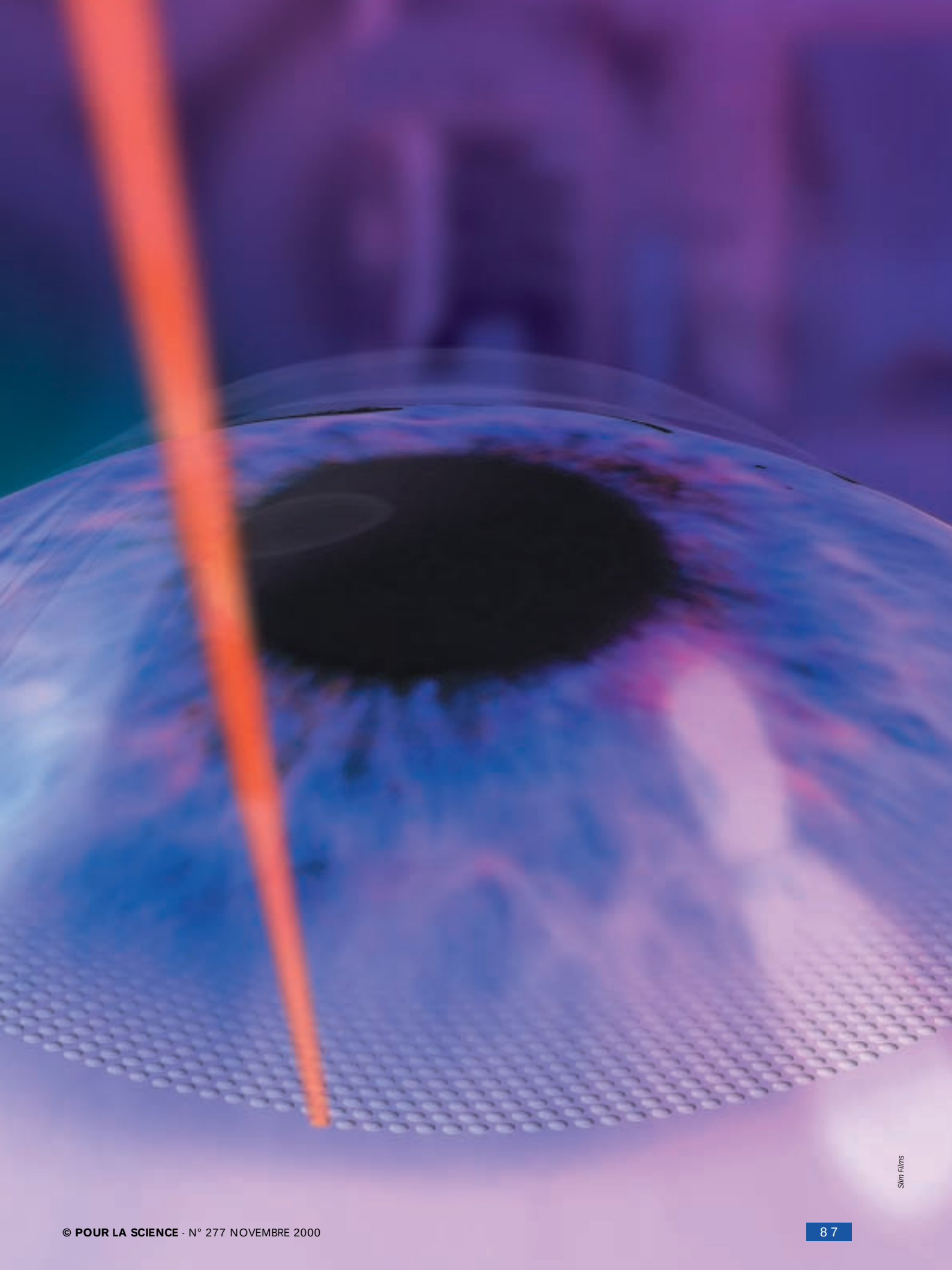
Au milieu des années 1960, les premiers lasers étaient volumineux, fragiles et gros consommateurs d'énergie. Aujourd'hui les lasers émettant des impulsions ultracourtes (moins de dix femtosecondes) sont compacts, polyvalents et fiables. L'intensité et la diversité de ces lasers ne cessent d'augmenter : les faisceaux obtenus aujourd'hui couvrent tout le spectre électromagnétique, des rayons X aux rayons T (rayonnement térahertz, situé au-delà de l'infrarouge), et les puissances maximales atteignent plusieurs pétawatts (plusieurs milliards de mégawatts). Ces systèmes ont de nombreuses applications en physique, chimie, biologie, médecine, optique...

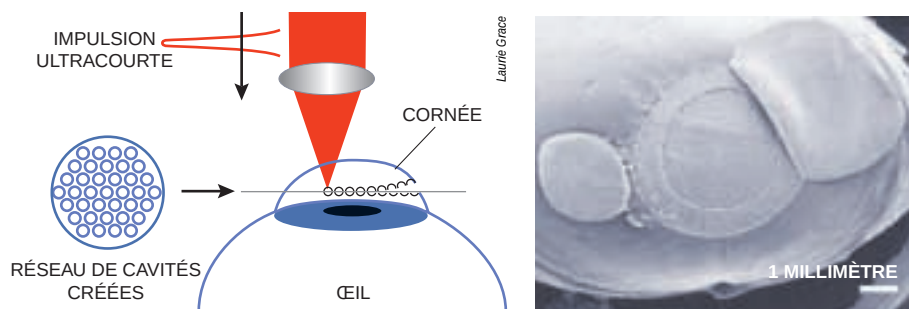
Le plus pointu des scalpels

Les impulsions ultracourtes des lasers sont très intenses. Bien que la puissance moyenne du laser soit modérée et que l'énergie totale d'une impulsion soit faible, la puissance instantanée est considérable, parce que les impulsions sont brèves (la puissance est égale à l'énergie divisée par le temps pendant lequel cette énergie est transmise). Dans les lasers à impulsions ultracourtes les plus courants, l'intervalle entre chaque impulsion est 100 000 fois plus long que la durée de l'impulsion elle-même, de sorte que la puissance maximale est 100 000 fois supérieure à la puissance moyenne. Par exemple, une impulsion de 100 femtosecondes avec une énergie de trois microjoules (insuffisante pour élever la température d'une goutte d'eau de un milliardième de degré) délivre une puissance maximale de 30 mégawatts.

Focalisées sur une minuscule surface, de telles puissances subliment de nombreux matériaux (elles les font passer de l'état solide à l'état gazeux sans qu'ils aient le temps de fondre), transformant les impulsions ultracourtes en d'excellents outils de micro-usinage, de perçage, de découpe et de soudure.

1. LES IMPULSIONS LASER ULTRACOURTES peuvent, en chirurgie des yeux, découper la cornée en provoquant une série de perforations à profondeur constante.





2. UN TRAITEMENT EXPÉRIMENTAL DE L'ŒIL PAR LASER détache une épaisseur de la cornée par la création de minuscules trous au point focal du laser (à gauche). D'autres découpes du même type détachent un disque de cornée intermédiaire (à droite). Quand on rabat la première épaisseur, la cornée est aplatie et la myopie corrigée. En chirurgie classique, la cornée est coupée avec une lame : la procédure est plus risquée, et la découpe moins fine.

On obtient une résolution plus fine que la largeur du faisceau laser en réglant le laser de sorte que seule l'intensité de la partie centrale, la plus brillante, soit supérieure au seuil d'ablation du matériau. L'impulsion communique alors l'énergie au point focal si rapidement que la chaleur ne diffuse pas dans le matériau environnant : les contours découpés sont lisses et précis (voir la figure 3). Par cette méthode, des physiciens ont usiné avec précision du diamant, du carbure de titane et de l'émail dentaire. Les lasers découpent sans danger des explosifs, sublimant le matériau qui se trouve au point de découpe sans faire détonner le matériau adjacent : ils semblent utiles pour des opérations de désarmement.

Les applications chirurgicales sont légion. En chirurgie microvasculaire, un laser à impulsions ultracourtes perce de petits trous dans la paroi du cœur pour fournir du sang oxygéné aux muscles cardiaques dont les vaisseaux sanguins sont irrémédiablement bouchés. En médecine, la faible puissance moyenne des impulsions ultracourtes est utile, parce que les modifications sont limitées et les tissus avoisinants épargnés. Des médecins du Laboratoire Lawrence Livermore, en Californie, ont utilisé des impulsions ultracourtes assorties d'un système de commande astucieux pour enlever des excroissances osseuses dans la colonne vertébrale d'un patient, sans endommager les tissus nerveux adjacents. De même, des ophtalmologues de l'Université d'Heidelberg et de l'Université du Michigan ont mis au point un procédé de chirurgie oculaire qui focalise un faisceau d'impulsions ultracourtes au niveau de la cornée, créant un fin réseau de bulles interconnectées à une profondeur précise ; ces bulles sont formées par cavitation, c'est-à-dire par évaporation de l'eau présente

au point focal (voir la figure 2). Ils parviennent alors à décoller la surface externe de la cornée, découvrant le disque de tissu profond à enlever ; puis ils replacent la couche supérieure, restée intacte. Le changement de courbure de la cornée obtenu par l'enlèvement du disque de tissu corrige la myopie ou l'hypermétropie. Cette technique préserve la surface externe lisse de la cornée. Les impulsions femtosecondes produisent une incision plus régulière et plus précise que les impulsions de lasers classiques.

L'imagerie

Une source de lumière forme des images caractéristiques parce qu'elle excite des marqueurs spécifiques : des colorants spéciaux ou des molécules naturelles, qui absorbent la lumière, puis la réémettent. En imagerie, l'utilisation de lumière de grande longueur d'onde est avantageuse, car les photons (ou grains de lumière) sont moins énergétiques, de sorte qu'une molécule n'est excitée que si plusieurs photons la heurtent simultanément. Cette excitation «multiphotonique» n'apparaît donc qu'aux fortes densités.

Les lasers à impulsions ultracourtes procurent les intensités requises, tout en délivrant une puissance moyenne suffisamment faible pour éviter d'endommager les tissus. De surcroît, les grandes longueurs d'onde pénètrent plus dans les tissus et abiment moins les cellules que les longueurs d'onde plus courtes. Comme pour le micro-usinage de haute précision, on obtient une meilleure résolution en ajustant l'intensité de telle sorte que la fluorescence n'ait principalement lieu qu'au point focal du faisceau. Cette technique produit des images tridimensionnelles de tissus vivants avec une clarté et une définition inégalées. Une

méthode similaire procure des images de circuits intégrés en silicium dans leur emballage plastique : on détecte alors les courants électriques provoqués par l'excitation multiphotonique.

L'imagerie à rayons T, d'autre part, utilise le rayonnement térahertz, dont la longueur d'onde est comprise entre 15 micromètres et un millimètre. Les rayons T pénètrent profondément dans de nombreux matériaux qui sont opaques aux longueurs d'onde plus courtes, comme celles de la lumière visible : ces matériaux opaques deviennent ainsi «transparents». Les images ont une meilleure résolution que celles qui sont obtenues avec les micro-ondes, dont les longueurs d'onde sont pourtant supérieures (plus d'un centimètre). Les micro-ondes induisent une agitation des molécules et, notamment, des molécules d'eau, provoquant un accroissement de la température. On connaît l'exemple du four à micro-ondes.

Dans les années 1980, David Auston et ses collègues de l'Université de Columbia ont créé des rayons T en envoyant des impulsions ultracourtes sur des structures semi-conductrices : les impulsions provoquent alors des courants d'électrons qui engendrent les rayons T. Les rayons T produits par des impulsions laser sont nettement distincts de ceux qui proviennent de la radioactivité naturelle des corps et du bruit de fond, de sorte que les systèmes d'imagerie à rayons T différencient des couches de matériaux très semblables, tels que différents types de tissus mous. Par exemple, l'imagerie à rayons T distingue le tissu brûlé et le tissu sain.

L'imagerie par impulsions térahertz a été présentée pour la première fois en 1995 par Martin Nuss et ses collègues des laboratoires AT&T Bell (devenus depuis *Lucent Technologies*). Cependant, des physiciens l'ont utilisée pour inspecter des composants électroniques, pour détecter des caries dentaires ou d'autres dégénérescences des tissus. Dans les aéroports, les rayons T identifieraient les armes fabriquées en céramique, aujourd'hui difficilement repérables avec les équipements standards à rayons X.

Dans l'industrie micro-électronique, les lasers à impulsions ultracourtes facilitent la fabrication de circuits intégrés complexes : ils contrôlent l'épaisseur du métal et des couches de semi-conducteurs, sans interrompre la production, permettant d'obtenir une fabrication de meilleure qualité

et un rendement supérieur. Dans l'industrie des télécommunications, des impulsions femtosecondes transmettent simultanément plus de 200 canaux de données dans une seule fibre optique.

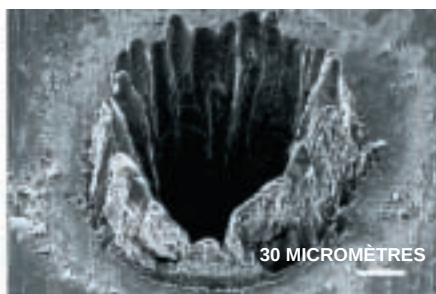
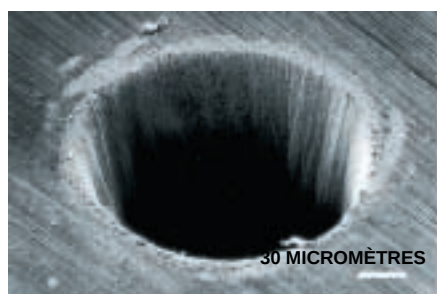
De telles applications étaient inenvisageables il y a seulement dix ans, parce que les lasers à impulsions femtosecondes étaient trop encombrants, inefficaces et peu fiables. Aujourd'hui, ils sont fiables, compacts, de sorte qu'ils peuvent être intégrés dans des équipements d'imagerie ou de diagnostic portables.

La production d'impulsions ultracourtes

Les principes de base du fonctionnement d'un laser sont l'amplification et la rétroaction. À la fin des années 1960, Jimi Hendrix subjuguait les foules en plaçant sa guitare *Stratocaster* devant un amplificateur pour obtenir une longue rétroaction plaintive. Au début de la même décennie, au Laboratoire de recherche Hughes, Theodore Maiman obtenait un phénomène similaire avec de la lumière : il avait montré qu'un bâtonnet de rubis excité et placé

dans une cavité pour produire une rétroaction optique produisait un faisceau intense de lumière laser.

La cavité, également nommée cavité résonante, est l'espace entre les deux miroirs ; le bâtonnet joue le rôle de milieu amplificateur (voir la figure 4). Dans la cavité, la lumière rebondit sur les miroirs et gagne en intensité à chaque traversée de l'amplificateur optique. Un des miroirs, partiellement transparent, laisse échapper une partie de la lumière sous la forme d'un faisceau laser. Seules les longueurs d'onde, ou modes, correspondant à des



Herbert Weiling, Laser Zentrum Hannover

3. LE MICRO-USINAGE LASER met à profit les propriétés des impulsions les plus courtes. Une impulsion de 200 femtosecondes produite par ablation a produit un trou parfaitement lisse dans l'acier (à gauche). Sans techniques particulières, des impulsions d'une puissance

deux fois moindre et d'une durée seize fois supérieure, font fondre la zone environnante (au centre). Le micro-usinage laser peut produire des endoprothèses coronaires de tantale lisses (à droite) servant à traiter des maladies cardiovasculaires.

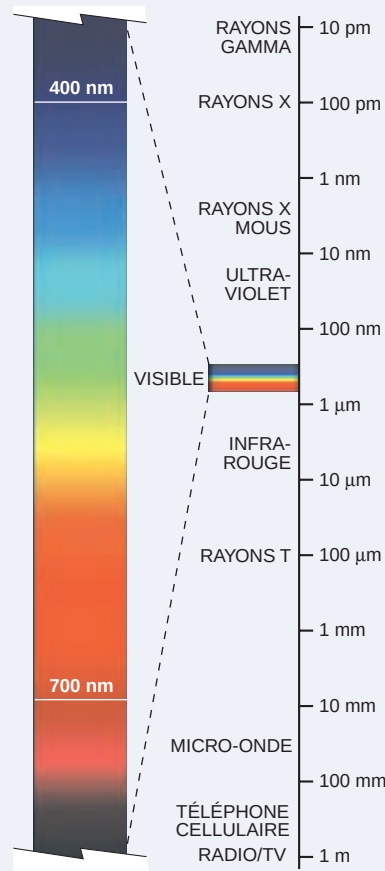
Principes de base

Le rayonnement électromagnétique présente de nombreuses facettes, dont la plus familière est la lumière visible. Toutes les couleurs de l'arc-en-ciel sont caractérisées par un paramètre : la longueur d'onde, allant de 380 nanomètres environ, en ce qui concerne le violet le plus profond, jusqu'à 750 nanomètres environ pour le plus rouge des rouges. La plupart des couleurs que nous voyons autour de nous, en particulier les bruns, les gris et les couleurs pastel ne figurent pas dans l'arc-en-ciel ; elles sont le résultat de la combinaison de nombreuses longueurs d'onde. De part et d'autre du domaine visible, le spectre électromagnétique s'étend jusqu'aux rayons gamma à une extrémité (les fréquences les plus hautes et les longueurs d'onde les plus courtes), et jusqu'aux ondes radio à l'autre. Les ondes de faible énergie émises par le réseau électrique à 60 hertz des maisons particulières se situent environ sept graduations au-dessous du trait le plus en bas de l'échelle de droite.

Les différences de longueurs d'onde ne sont qu'un des aspects du «conditionnement» de la lumière. En général, la lumière est incohérente, comparable à la foule d'un stade criant en tous sens. Les lasers produisent de la lumière cohérente : la foule chante à l'unisson. La lumière peut se présenter sous forme d'ondes continues, comme les vagues de l'océan qui arrivent sans cesse sur la plage, ou bien sous forme d'impulsions, comme un tsunami. La compression de la lumière en impulsions cohérentes les plus courtes possible (le record est d'environ quatre femtosecondes) crée un outil alliant puissance et délicatesse.

Infiniment petit, infiniment grand

Préfixe	Facteur	Préfixe	Facteur
milli (m)	10^{-3}	kilo (k)	10^3
micro (μ)	10^{-6}	mega (M)	10^6
nano (n)	10^{-9}	giga (G)	10^9
pico (p)	10^{-12}	tera (T)	10^{12}
femto (f)	10^{-15}	peta (P)	10^{15}
atto (a)	10^{-18}	exa (E)	10^{18}
zepto (z)	10^{-21}	zetta (Z)	10^{21}
yoto (y)	10^{-24}	yotta (Y)	10^{24}



Laurie Grace

multiples de la distance entre les miroirs restent dans la cavité. Ces modes sont les équivalents optiques des harmoniques musicaux produits par les cordes de guitare.

Les lasers continus émettent un faisceau constant de lumière dont la couleur correspond à la fréquence de l'un de ces modes. En revanche, une impulsion laser courte contient une large gamme de fréquences, comme un accord constitué de plusieurs notes. Cette caractéristique est décrite par le principe d'incertitude d'Heisenberg : plus une impulsion est courte, plus elle a une large gamme de fréquences. Une impulsion lumineuse de 10 femtosecondes, par exemple, a un spectre qui s'étale sur environ 100 nanomètres. Cet étalement est considérable : décalé dans le visible, il correspondrait au spectre de toutes les couleurs, du violet au cyan, soit un tiers de la lumière visible (le faisceau rouge d'un laser à diode classique a une gamme de fréquences inférieure au nanomètre).

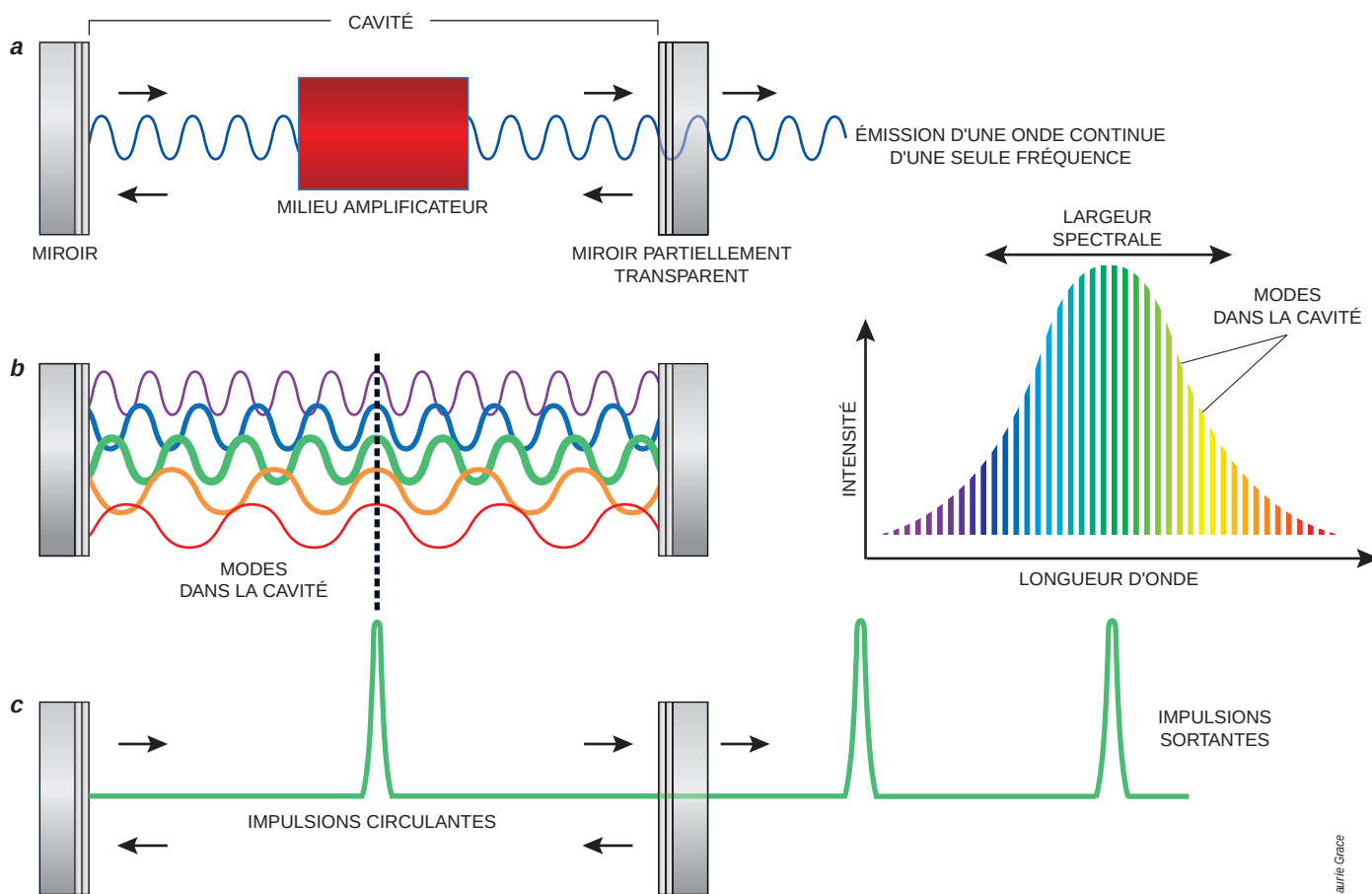
Dans les impulsions ultracourtes, ces milliers de modes sont en phase. Imaginons une rangée de cloches, chacune avec un son différent, qui se balancent en haut d'un clocher. Si les cloches battent au hasard, une longue et terrible cacophonie retentit. Au contraire, si les cloches se balancent de façon synchrone, à intervalles réguliers, elles produisent des accords très puissants, régulièrement espacés. De la même manière, dans le cadre du fonctionnement dit «en verrouillage de mode», toute la lumière de la cavité optique d'un laser est confinée dans une impulsion ultracourte qui circule entre les miroirs (voir la figure 4). Le laser émet une séquence périodique d'impulsions lumineuses à travers le miroir semi-transparent.

L'amplification d'une large gamme de fréquences nécessite évidemment des amplificateurs optiques à large bande. La première génération de lasers à impulsions ultracourtes réglables utilisait, pour l'amplification, des jets de colorants organiques dissous dans des

solvants visqueux. Ces lasers à colorants étaient volumineux, difficiles à utiliser et à entretenir. Consommant beaucoup d'énergie électrique, ils ne produisaient qu'un faisceau de quelques milliwatts. De surcroît, les systèmes produisant les impulsions les plus courtes (20 à 30 femtosecondes) n'étaient pas assez fiables pour que l'on envisage des applications. Les dosages de colorant et de solvant étaient délicats, d'autant qu'ils devaient circuler sous pression dans des tuyaux très fins et que leur rapide dégradation imposait leur renouvellement régulier. Les pionniers de ces lasers se rappellent avec émotion leurs débuts... qui ont parfois taché les murs et le plafond de leur laboratoire.

Les cristaux amplificateurs

La découverte de cristaux à large bande, capables d'émettre et d'amplifier des longueurs d'onde comprises entre le visible et l'infrarouge représenta une avancée décisive. Le plus célèbre de ces matériaux est le saphir

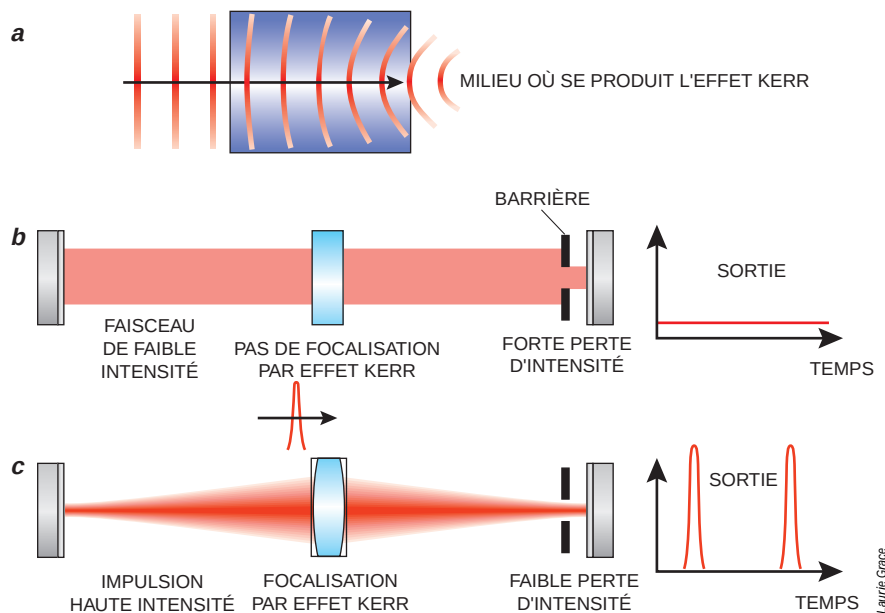


4. LA BOUCLE DE RÉTROACTION ET L'AMPLIFICATION sont les deux principes de base du laser. La lumière se réfléchit, faisant des allers et retours entre les deux miroirs (a) ; elle est amplifiée à chaque passage dans le milieu amplificateur, qui est continuellement excité. Un faisceau continu émerge d'un miroir partiellement trans-

parent situé à une extrémité. Quand de nombreuses longueurs d'onde (ou modes) de lumière se propagent dans la cavité en parfait synchronisme (b), elles s'additionnent pour permettre la création d'une impulsion intense (c). Un peigne d'impulsions émerge alors du miroir partiellement transparent.

dopé au titane, mis au point par Peter Moulton, à l'Institut de technologie du Massachusetts. Ce cristal amplifie des longueurs d'onde comprises entre 700 et 1 100 nanomètres, et il émet des impulsions qui durent moins de quatre femtosecondes.

Avec ces nouveaux matériaux, la difficulté était la production d'impulsions périodiques où des millions de modes sont synchronisés. Un des premiers systèmes de production d'impulsions laser ultracourtes à l'aide de saphirs dopés au titane comprenait deux cavités optiques couplées dont on ajustait la longueur. Alors qu'ils mettaient au point cette technique, en 1989, les physiciens de l'Université de Saint Andrews, en Écosse, ont eu la surprise de constater que des impulsions étaient produites avec une seule cavité. Avec d'autres équipes de recherche, ils ont montré que cet «auto-blocage du mode» était lié à un effet optique, à l'intérieur du cristal de saphir dopé au titane. Ce phénomène, nommé effet Kerr, se produit dans un matériau transparent comme le verre ou le saphir dopé. Le champ électrique du faisceau focalisé sur le matériau produit un changement de son indice de réfraction, phénomène appelé biréfringence. De par ses changements de propriétés, la lumière de haute intensité se propage plus lentement que celle de faible intensité. L'intensité lumineuse du faisceau, maximale en son centre, décroît au fur et à mesure que l'on s'en éloigne, ainsi la lumière à la périphérie du faisceau se déplace plus vite que celle située en son centre. Ce phénomène, équivalent à celui du passage d'un faisceau dans une lentille convexe, s'appelle autofocalisation, ou focalisation résonante de Kerr (voir la figure 5). La focalisation résonante de Kerr favorise la formation de l'impulsion au détriment de l'impulsion lumineuse continue. Les modes s'ajoutent et l'impulsion devient de plus en plus importante. La focalisation résonante de Kerr a produit des impulsions ultracourtes réglables sur une large gamme de fréquences, à des niveaux de puissance encore jamais atteints (voir la figure 6). Cette technique est aujourd'hui le moyen le plus simple et le plus élégant de produire des impulsions de quelques femtosecondes. Les lasers à impulsions ultracourtes actuels ne sont que des perfectionnements du système initial.



5. L'EFFET KERR OPTIQUE entraîne une propagation plus lente de la lumière de forte intensité que de la lumière de faible intensité. Un milieu où se produit l'effet de Kerr agit comme une lentille convergente sur un faisceau de forte intensité (a). Une barrière munie d'un petit trou (b) élimine la partie laser continue, qui ne peut pas gagner suffisamment en intensité pour déclencher l'effet Kerr. Le milieu focalise une impulsion de forte intensité (c), de telle sorte qu'elle traverse le trou et que son amplification est alors maximale.

Nouveaux miroirs et nouvelles pompes

Une des innovations les plus importantes est l'utilisation de miroirs absorbants à base de semi-conducteurs : l'absorption supprime la réflectivité aux faibles intensités lumineuses ; en revanche, quand l'intensité est suffisante, l'absorbeur sature et la réflectivité du miroir augmente. En réfléchissant alors les fortes intensités plus efficacement, les miroirs favorisent la production d'impulsions dans la cavité plutôt que la sortie d'ondes continues. Parmi les nombreux modes formés dans la cavité, seuls ceux qui vibrent en phase, c'est-à-dire ceux dont l'intensité est maximale au même instant, ont ensemble une intensité suffisante pour saturer l'absorbant et le traverser (leurs amplitudes s'ajoutent). Les autres modes peuvent être partiellement ou complètement en opposition de phase et se détruire, conduisant à une intensité insuffisante pour traverser l'absorbant. L'avantage d'un tel mécanisme est que de faibles intensités qui vont s'additionner peuvent être à l'origine des impulsions. Ces lasers ont été mis au point, en 1991, par les chercheurs des Laboratoires AT&T Bell.

La découverte de ces mécanismes a simplifié l'utilisation des lasers à impulsions ultracourtes et a assuré un succès immédiat aux lasers femtose-

condes. Toutefois, les sources d'excitation, ou pompes, de ces lasers restaient insatisfaisantes. Tout comme un amplificateur de guitare a besoin de puissance électrique, un laser a besoin d'énergie électrique pour amplifier la lumière de son faisceau. Les cristaux de saphir dopés au titane étaient excités par un laser de pompage à onde continue : le faisceau de pompage excite des atomes du cristal, qui se dés excitent ensuite en émettant des photons qui s'ajoutent au faisceau pulsé. Les premiers lasers à saphir dopé étaient pompés par des lasers à argon, volumineux, qui consommaient une puissance électrique de plusieurs dizaines de kilowatts pour produire 10 à 20 watts d'une lumière bleu-vert. Les coûts étaient rédhibitoires.

Aujourd'hui, le pompage du saphir dopé au titane et des matériaux apparentés s'effectue à l'aide de lasers à semi-conducteurs, eux-mêmes pompés par des lasers à diode compacts de forte puissance. Ce système de pompage «en cascade» donne un rendement bien supérieur à celui des lasers à argon : on obtient jusqu'à dix watts de lumière verte dans un faisceau de meilleure qualité, à l'aide d'un système dix fois plus petit. En outre, le coût de fonctionnement est bien inférieur, et le système peut être branché sur une simple prise de courant.

Le temps, l'espace et l'énergie

Que de chemin parcouru, de l'énoncé par Einstein en 1917 du principe de l'émission stimulée à la mise en évidence expérimentale de l'effet laser, en 1960, et enfin à la génération des lasers à impulsions femtosecondes. En Europe, les premières impulsions optiques d'une centaine de femtosecondes ont été obtenues à la fin des années 1970 par une équipe de physiciens du Laboratoire d'optique appliquée de l'École nationale supérieure des techniques avancées et de l'École polytechnique. Aujourd'hui, les efforts se concentrent sur la caractérisation d'impulsions de plus en plus courtes, entre 10 et 30 femtosecondes, et sur l'optimisation des phénomènes d'amplification. Les techniques de plus en plus perfectionnées fournissent une densité d'énergie par impulsion considérable, ciblée sur un échantillon solide, gazeux ou liquide. La matière est ainsi sondée ou manipulée dans tous ses états.

Les effets engendrés par les impulsions femtosecondes dépendent de la façon dont l'énergie des photons est déposée dans le milieu. Une impulsion femtoseconde de dix gigawatts émise dans le rouge contient jusqu'à trois millions de milliards (3×10^{15}) de grains de lumière. Dès lors, pourquoi une impulsion femtoseconde focalisée sur un millimètre carré de peau et dont la puissance instantanée serait de quelques gigawatts (un surgénérateur nucléaire délivre une puissance moyenne 1 000 fois inférieure) ne provoque-t-elle rien de plus qu'un petit picotement ? Pourquoi un matériau inerte soumis à une impulsion de quelques terawatts (10^{12} watts) se transforme-t-il en plasma (gaz dense constitué d'électrons et d'ions très localisé dans l'espace) avant d'émettre des rayons X ?

A la vitesse de la lumière, un photon traverse une molécule de 0,3 nanomètre de diamètre en un centième de femtoseconde. Si la molécule vibre à la fréquence de 10^{14} cycles par seconde, le photon n'explore qu'un millième de la vibration. En revanche, les innombrables photons d'une impulsion d'une centaine de femtosecondes peuvent entrer en résonance avec cette molécule et en modifier le comportement. Les physiciens de l'École polytechnique et de l'Université Paris 6 ont ainsi étudié, dans l'eau, l'excitation des liaisons hydrogène par des impulsions infrarouge femtosecondes. Ils ont suivi, en temps réel, le mouvement de ces liaisons, qui confèrent à l'eau ses propriétés physiques étonnantes.

La durée de l'impulsion est un paramètre essentiel, au même titre que l'énergie ou la densité de photons. Des rayons X mous aux rayons T, l'énergie s'étend du milliélectronvolt au kiloelectronvolt, gamme d'énergie qui autorise de nombreuses expériences : une fraction de milliélectronvolt modifie la rotation d'une molécule, quelques électronvolts arrachent un électron périphérique d'un atome, ou cassent une liaison interatomique dans une molécule ; quelques kiloelectronvolts perturbent l'arrangement des électrons des couches profondes d'un atome. En dépouillant progressivement les atomes de leur cortège électronique, les physiciens découvrent de nouveaux comportements de la matière. Ainsi, grâce à une impulsion laser de 120 femtosecondes focalisée sur du

silicium et dont l'intensité était de l'ordre de 10^{16} watts par centimètres carrés, des chercheurs du laboratoire pour l'utilisation des lasers intenses de l'École polytechnique ont réalisé une spectroscopie détaillée d'un plasma de silicium. Ils ont observé de nouveaux comportements électroniques du plasma dont la dynamique est comparable à celle de l'impulsion laser. Ils ont également produit par l'interaction d'impulsions femtosecondes sur un gaz, des bouffées ultrabrèves d'électrons relativistes et très énergétiques. Avec d'autre méthode, par exemple la source européenne synchrotron de Grenoble, on obtient des paquets d'électrons, également très énergétiques, mais d'une durée supérieure (de 150 à 190 picosecondes).

Un siècle après la découverte des rayons X et de la radioactivité, on maîtrise les énergies considérables libérées par le noyau atomique pour des applications médicales ou industrielles. Une des applications les plus intéressantes de l'interaction des lasers femtosecondes intenses avec la matière, est la génération d'impulsions femtosecondes dans le spectre X. Des chercheurs du Laboratoire d'optique appliquée ont ainsi obtenu des images résolues en temps montrant des mouvements d'atomes ou de molécules. Les impulsions femtosecondes de plus en plus courtes et de plus en plus énergétiques complètent la panoplie des outils disponibles. Ces impulsions laser sont des micro-outils dont les caractéristiques sont conditionnées par l'énergie des photons et par leur densité spatio-temporelle. Chaque type d'impulsion femtoseconde contenant un paquet d'ondes est adapté à l'étude ou à la manipulation d'objets tels que des atomes, des molécules, des puces de semi-conducteurs ou encore des cellules vivantes.

Des impulsions femtosecondes infrarouges sont utilisées pour le développement d'un microscope à balayage laser par des physiciens du Centre de physique moléculaire de Bordeaux. Dans le microscope à balayage classique, un faisceau d'électrons « balaie » la surface de l'échantillon ; ici, le faisceau d'électrons est remplacé par un faisceau laser ultracourt. Le faisceau est focalisé, à différentes profondeurs, selon des « plans de coupe » différents de l'objet observé. Grâce à des logiciels de reconstruction, on obtient des images tridimensionnelles de l'objet. L'équipe de Bordeaux a ainsi reconstitué, à partir de plans de coupe séparés de 0,2 micromètre, des images tridimensionnelles, de bonne qualité, d'organismes unicellulaires ou de cellules nerveuses embryonnaires. Cette méthode a l'intérêt notable de préserver l'échantillon : c'est une méthode intéressante pour procéder à des analyses non destructives.

La femtochimie et la femtobiologie suivent, en temps réel, les transformations des atomes et des molécules lors de réactions. Les sources femtosecondes offrent un accès à une visualisation temporelle des électrons, des atomes et des molécules. Dans une relation espace-temps-énergie, les lasers femtosecondes « visualisent » la transformation de la matière en temps réel et à l'échelle de l'infiniment petit.

Yann GAUDUEL, INSERM, Laboratoire d'optique appliquée ENSTA-École polytechnique

Pompage direct

Aujourd'hui, les physiciens cherchent encore des perfectionnements. Notamment, ils voudraient éviter l'emploi du laser à semi-conducteurs intermédiaire et pomper directement le laser à impulsions ultracourtes avec un laser à diode. Les systèmes seraient alors plus petits et plus efficaces. Toutefois, des difficultés subsistent : les lasers à diode, initialement utilisés pour le pompage d'autres cristaux, produisent des longueurs d'onde et des puissances inadaptées au pompage direct du saphir dopé au titane. Pourrait-on remplacer le saphir dopé par d'autres cristaux ? On étudie aujourd'hui les «colquirites», qui doivent leur nom aux mines d'étain de Colquiri, en Bolivie, où elles ont été découvertes. Les colquirites dopées au chrome oscillent sur une gamme de longueurs d'onde comparable à celle du saphir dopé et elles peuvent être pompées directement par les classiques lasers à diode rouges. Des colquirites d'excellente qualité optique, synthétisées à Livermore, ont permis la mise au point de cavités à impulsions ultracourtes plus efficaces.

Dans notre laboratoire, nous avons notablement amélioré l'efficacité des lasers à impulsions ultracourtes pompés directement par diode en réduisant la puissance de pompage nécessaire pour le fonctionnement du laser en verrouillage de mode et en pompant les cristaux à l'aide de diodes de faible puissance, semblables à celles des lecteurs de DVD. En optimisant les optiques de la cavité laser, nous avons minimisé les pertes. Nous avons ainsi fait fonctionner des systèmes de moins de 20 centimètres de longueur à l'aide de piles LR6 standards (*voir la figure 6*). Nos lasers produisent des impulsions de 100 femtosecondes avec des puissances moyennes de 10 milliwatts. Leur consommation électrique (un watt) est 100 fois inférieure à celle des lasers à colorants et à verrouillage de mode de puissance équivalente.

De petits lasers à fibres optiques émettent également des impulsions de quelques femtosecondes non ajustables ; leur milieu amplificateur est une courte fibre optique dopée. Les lasers de ce type sont de bonnes sources compactes d'impulsions femtosecondes et sont adaptés à certaines applications industrielles émergentes. Au début de l'an 2000, des ingénieurs de la Société *IMRA America* ont annoncé

des puissances moyennes de sortie supérieures à dix watts, pour des lasers à fibres à impulsions femtosecondes.

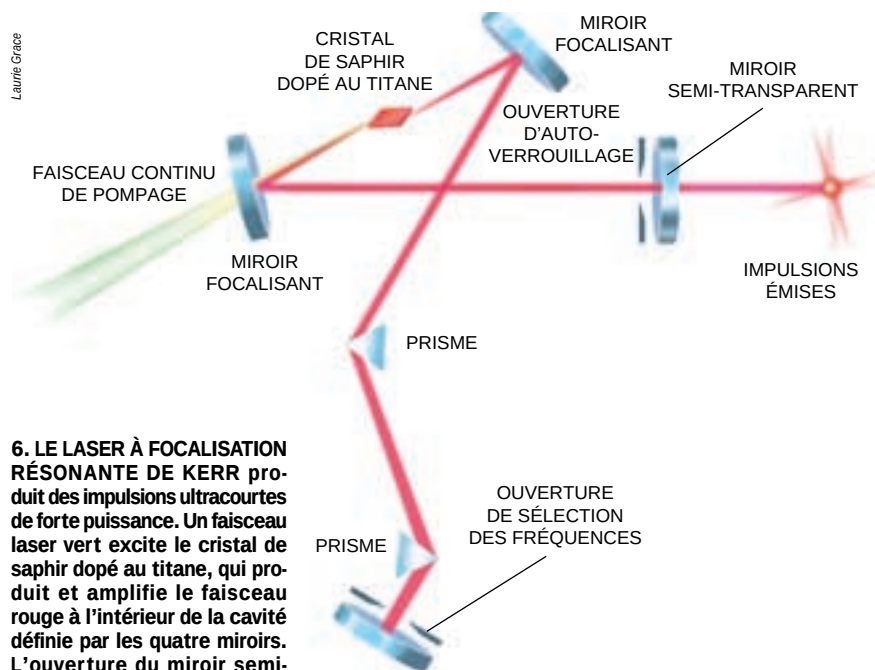
Le *nec plus ultra* en matière de compacité sera l'arrivée de lasers à diodes qui produiront directement des impulsions de quelques femtosecondes. Cependant, la génération actuelle de lasers à impulsions ultracourtes à semi-conducteurs a déjà permis à cette catégorie de lasers de sortir des laboratoires spécialisés pour devenir des outils aux applications concrètes.

La puissance suprême

Aux hautes énergies, l'intensité maximale des impulsions ultracourtes endommage l'optique classique des lasers en modifiant les propriétés du milieu ou, même, en le cassant par émission de décharges électriques dans la cavité optique (de ce fait, on espère utiliser des impulsions ultracourtes de forte puissance pour provoquer la décharge de nuages d'orage par ionisation d'un

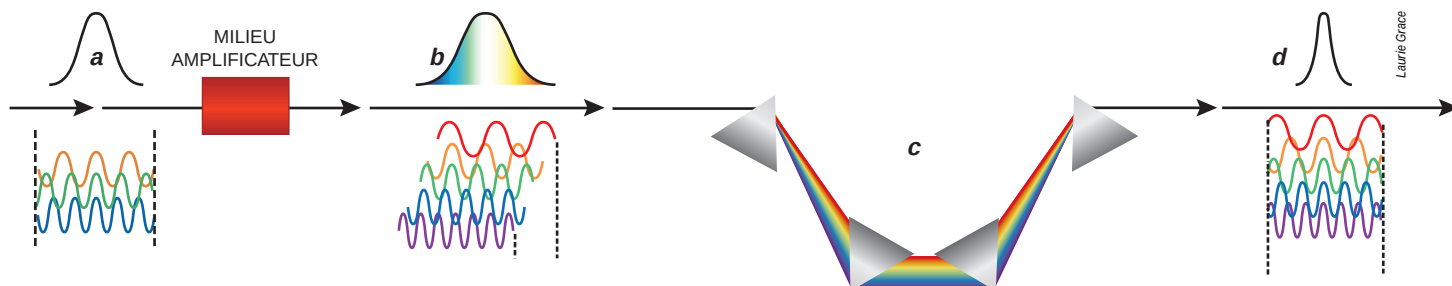
chemin conducteur dans l'air). Aussi les intensités des lasers focalisés sont-elles longtemps restées limitées à environ 10^{15} watts par centimètre carré. En 1985, à l'Université de Rochester, Gérard Mourou et Donna Strickland ont mis au point une technique d'étirement de l'impulsion par dérive de fréquence (ou CPA en anglais pour *Chirped-Pulse Amplification*), qui évite les intensités excessives par allongement des impulsions. Ainsi allongées, les impulsions sont amplifiées sans risque pour le milieu amplificateur et pour les autres éléments d'optique ; puis les impulsions étirées et amplifiées sont recompressées grâce à des systèmes nommés grilles de diffraction dans le vide.

Les premiers modèles comportaient plusieurs étapes d'étirement temporel, d'amplification, puis de compression temporelle ; les systèmes étaient encombrants. Aujourd'hui, nous disposons de lasers plus petits, de quelques térawatts (10^{12} watts) avec des faisceaux de sortie dont l'intensité



6. LE LASER À FOCALISATION RÉSONANTE DE KERR produit des impulsions ultracourtes de forte puissance. Un faisceau laser vert excite le cristal de saphir dopé au titane, qui produit et amplifie le faisceau rouge à l'intérieur de la cavité définie par les quatre miroirs. L'ouverture du miroir semi-transparent supprime la partie continue du laser et le faisceau traverse des prismes qui corrigent la dispersion. La position de l'ouverture sur l'un des miroirs règle la fréquence de la lumière en ne laissant passer que la portion souhaitée du spectre de la lumière rouge. Les impulsions sortent par le miroir semi-transparent. Des appareils compacts ont révolutionné les applications potentielles des lasers à impulsions ultracourtes. Le dispositif représenté ici (*photographie à droite*) tiendrait sur une page de cette revue. Il est alimenté par de simples piles LR6, et délivre des impulsions lumineuses d'un demi-kilowatt (une balle de golf (*la sphère blanche à gauche du dispositif*) est représentée pour visualiser l'échelle).





7. LES IMPULSIONS INTENSES ÉVOLUENT à chaque passage dans la cavité d'un laser à impulsions ultracourtes sous l'influence de plusieurs effets. Quand une impulsion (a) traverse un milieu amplificateur, des effets non linéaires ajoutent des ondes de fré-

quence supérieure aussi bien qu'inférieure, et la dispersion étale les différentes longueurs d'onde de lumière (b). Un système de prismes (c) peut réaligner tous les modes, produisant une impulsion plus courte.

est considérable (10^{18} watts par centimètre carré). À l'aide de ces lasers, on obtient des plasmas qui peuvent à leur tour produire des impulsions ultracourtes de rayons X mous et cohérents, utiles pour la microscopie et la lithographie. À l'intérieur de ces plasmas, les champs électriques sont très élevés et les électrons ont un comportement relativiste : des explorations de physique fondamentale sont envisageables.

De gros appareillages ont délivré des faisceaux qui ont déposé une puissance lumineuse de 2×10^{21} watts par centimètre carré sur des cibles, avec une puissance de quelques pétawatts (10^{15} watts), 1 000 fois supérieure à la puissance dissipée par un éclair. Par des effets de pression de radiation, notamment, ces lasers accélèrent la matière 10^{22} fois plus que la gravitation terrestre, ce qui correspond à une accélération bien supérieure à celle que des corps subiraient à proximité d'un trou noir de la masse du Soleil ! Ils procurent des températures et des pressions comparables à celles de l'intérieur d'une étoile, laissant envisager des études de dynamique stellaire. En travaillant avec des intensités focalisées de 10^{30} watts par centimètre carré, les physiciens espèrent créer des paires de particules et d'antiparticules, et ils prévoient d'étudier le domaine de l'électrodynamique quantique, qui décrit le comportement quantique de particules chargées et du champ électromagnétique quantifié.

D'autre part, les physiciens tirent parti de la brièveté des impulsions. Certains ont utilisé la large bande spectrale des impulsions de moins de dix femtosecondes pour la mesure précise des fréquences optiques. Les modes d'un laser en verrouillage de mode sont espacés uniformément, comme les dents d'un peigne (voir la figure 4). Ce

«peigne» peut servir de référence pour la mesure de fréquences difficiles à évaluer directement. L'utilisation de cette technique permet de mesurer des énergies de transition atomique optique avec une précision mille fois meilleure que tout ce qui se faisait jusqu'à maintenant. Certaines constantes de la physique peuvent ainsi être déterminées : une de ces expériences a déterminé la «constante de structure fine» qui caractérise l'intensité de la force électromagnétique avec une précision de 120 pour un milliard.

Le record de brièveté des impulsions est aujourd'hui inférieur à cinq femtosecondes : il est détenu par des lasers à saphir dopé au titane, à l'École polytechnique de Zurich et à l'Institut de technologie du Massachusetts. Jusqu'à présent, les impulsions ultracourtes étaient décrites par une théorie où l'enveloppe des impulsions variait lentement comparée aux oscillations de la lumière, mais l'enveloppe des impulsions de cinq femtosecondes ne contient que deux périodes : on atteint donc les limites de la théorie. Bientôt, la durée de l'impulsion sera inférieure à celle d'une période.

Les lasers à impulsions ultracourtes, avec une gamme de puissance qui s'étale sur plus de 17 ordres de magnitude, sont présents dans de nombreuses disciplines scientifiques et techniques, de l'imagerie en profondeur des tissus vivants à l'élucidation de questions fondamentales sur l'Univers. Il y a quelques années, les impulsions femtosecondes ont permis l'observation de mécanismes moléculaires et de mouvements d'atomes ; de même, les impulsions de quelques attosecondes (une attoseconde vaut un millième de femtoseconde) montreront les mouvements des électrons, des protons et des neutrons.

Les nouveaux lasers gagneront progressivement tous les domaines. Après la médecine avec l'imagerie biologique et la chirurgie, ils devraient conduire à des découvertes pharmaceutiques importantes, révélant par exemple les mécanismes de certains médicaments. En micro-électronique, ils assureront la commande cohérente du courant électrique dans les composants à semi-conducteurs et dans les réseaux de communications optiques numériques.

Quand le laser fut inventé, certains l'ont qualifié de «solution à la recherche d'un problème». Aujourd'hui, les lasers sont omniprésents dans les lecteurs de codes à barres des supermarchés, dans les lecteurs de disques compacts, etc. Depuis leur apparition au milieu des années 1960, les lasers à impulsions ultracourtes s'imposent également, du laboratoire à la vie courante. Ils sont aujourd'hui la meilleure solution à nombre de problèmes concrets et participeront demain à l'amélioration de la qualité de vie.

John-Mark HOPKINS est physicien à l'Université de Saint Andrews, en Écosse. Wilson SIBBETT est professeur dans la même université et membre du Conseil d'ingénierie et de sciences physiques du Royaume-Uni.

Gérard A. MOUROU, Christopher P.J. BARTY et Michael D. PERRY, *Ultra-high-Intensity Lasers : Physics of the Extreme on a Tabletop*, in *Physics Today*, vol. 51, n° 1, pp. 22-28, janvier 1998.

Henry KAPTEYN et Margaret MURNANE, *Ultrashort Light Pulses : Life in the Fast Lane*, in *Physics World*, vol. 12, n° 1, pp. 31-35, janvier 1999.

Don ARNONE, Craig CIESLA et Michael PEPPER, *Terahertz Imaging Comes into View*, in *Physics World*, vol. 13, n° 4, pp. 35-40, avril 2000.
