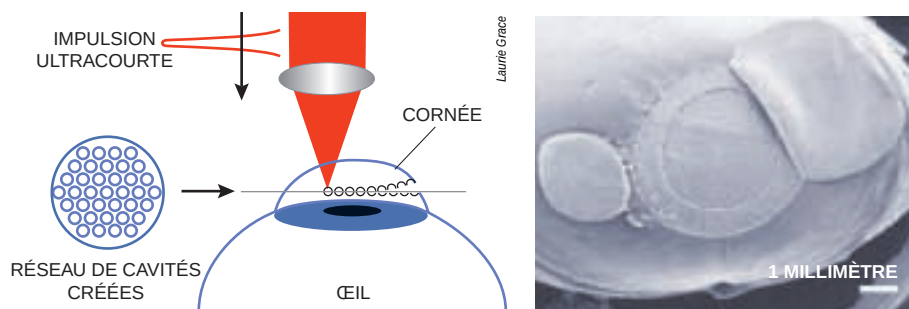




2. UN TRAITEMENT EXPÉRIMENTAL DE L'ŒIL PAR LASER détache une épaisseur de la cornée par la création de minuscules trous au point focal du laser (à gauche). D'autres découpes du même type détachent un disque de cornée intermédiaire (à droite). Quand on rabat la première épaisseur, la cornée est aplatie 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 abîment 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.

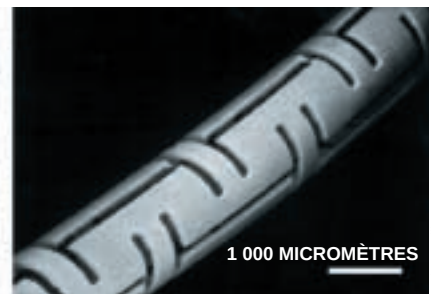
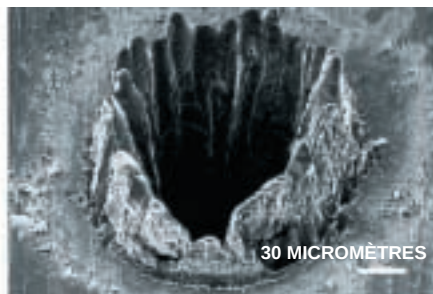
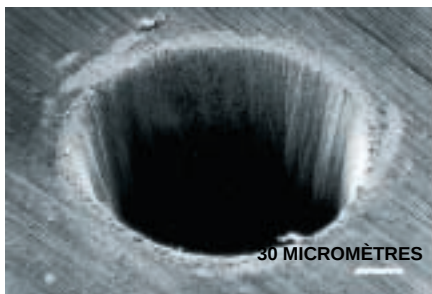
De telles applications étaient inenvisageables il y a seulement dix ans, parce que les lasers à impulsions femtosecondes étaient trop encombrants, inefficaces et peu fiables. Aujourd'hui, ils sont fiables, compacts, de sorte qu'ils peuvent être intégrés dans des équipements d'imagerie ou de diagnostic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

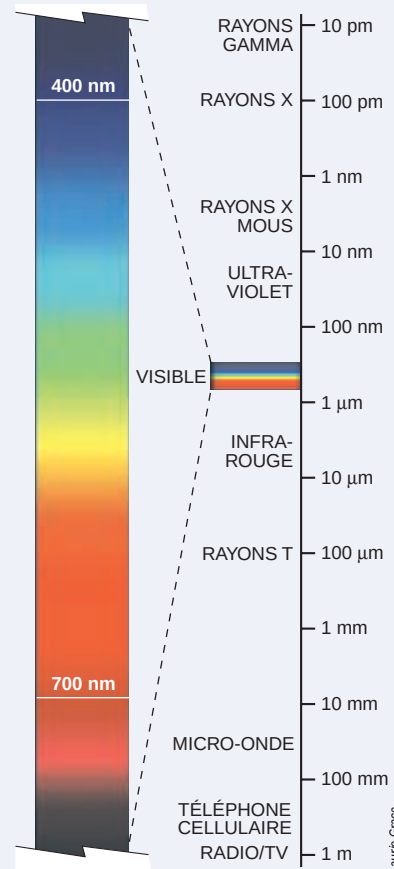
Principes de base

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