

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.

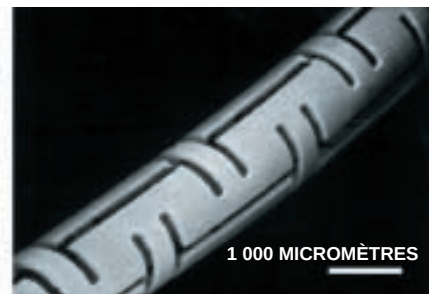
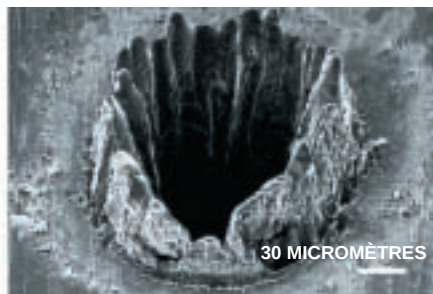
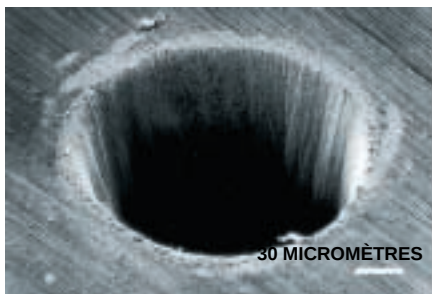
De telles applications étaient inenvisageables il y a seulement dix ans, parce que les lasers à impulsions femtosecondes étaient trop encombrants, inefficaces et peu fiables. Aujourd'hui, ils sont fiables, compacts, de sorte qu'ils peuvent être intégrés dans des équipements d'imagerie ou de diagnostic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



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.

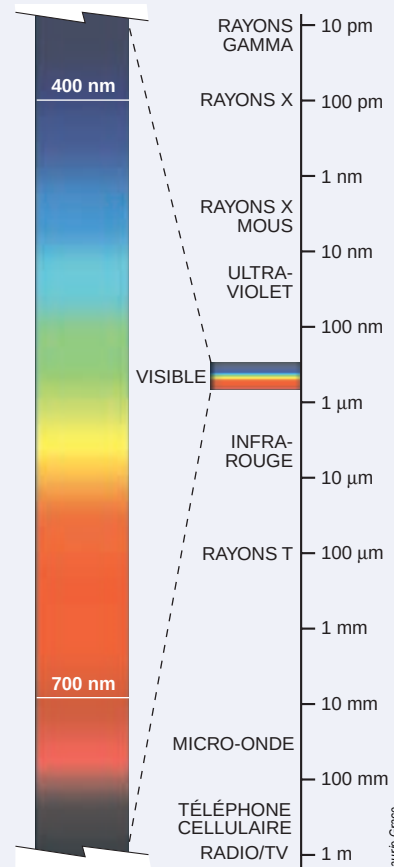
Principes de base

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}



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).

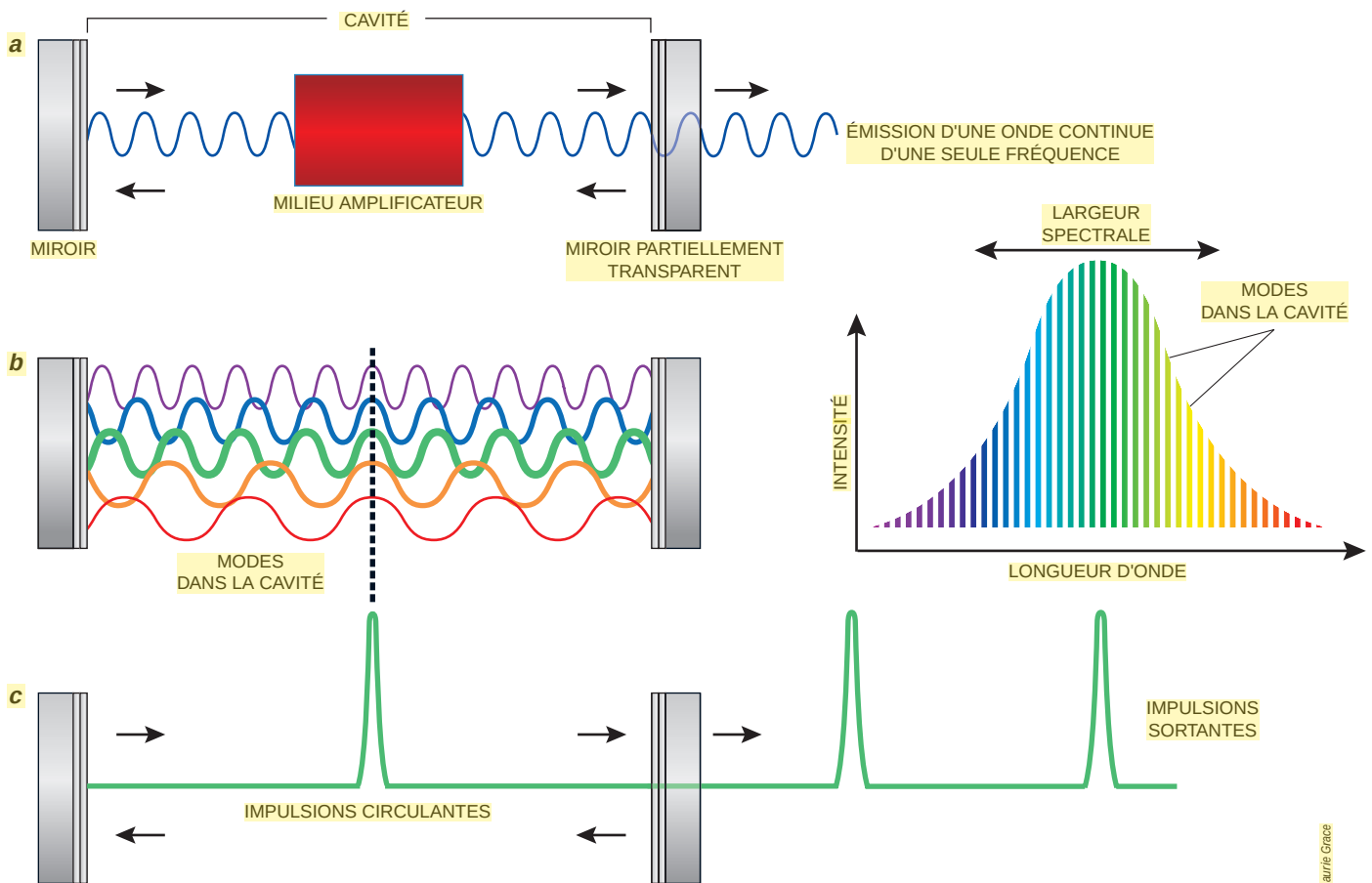
Dans les impulsions ultracourtes, ces milliers de modes sont en phase. Imaginons une rangée de cloches, chacune avec un son différent, qui se balancent en haut d'un clocher. Si les cloches battent au hasard, une longue et terrible cacophonie retentit. Au contraire, si les cloches se balancent de façon 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

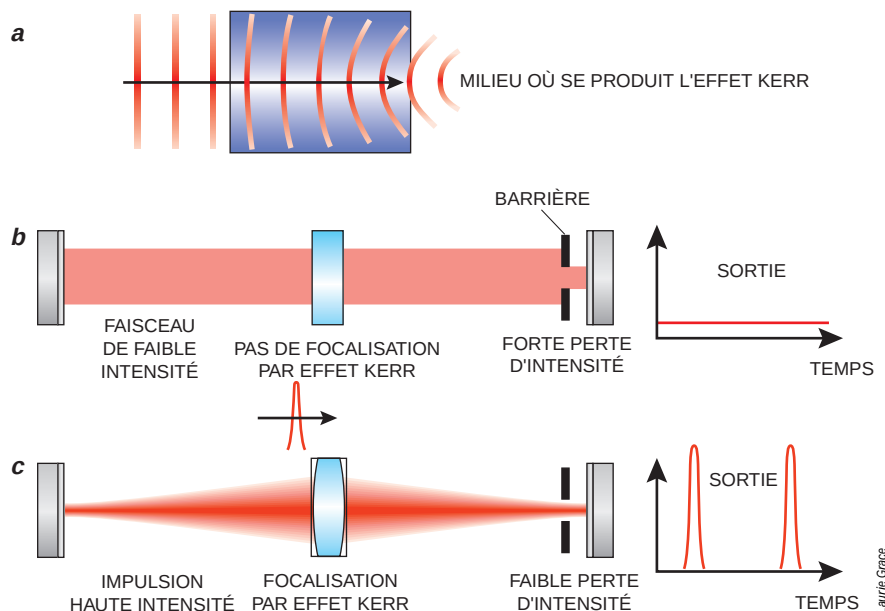


4. LA BOUCLE DE RÉTROACTION ET L'AMPLIFICATION sont les deux principes de base du laser. La lumière se réfléchit, faisant des allers et retours entre les deux miroirs (a) ; elle est amplifiée à chaque passage dans le milieu amplificateur, qui est continuellement excité. Un faisceau continu émerge d'un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