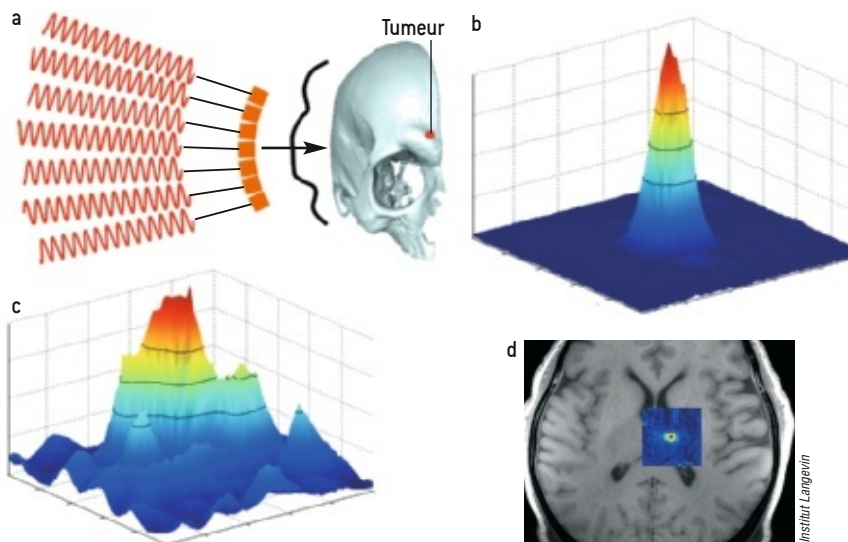


s'étalant de quelques centaines de mégahertz à 2,4 gigahertz. Après émission par la source au sein de cette structure d'une impulsion à large spectre durant dix nanosecondes, une antenne située en champ lointain reçoit un signal très long qui résulte de la superposition de tous les modes excités. Un retournement temporel de ce signal électromagnétique suffit à refocaliser à la source, mais la tache focale mesurée a alors une dimension égale à un trentième de la longueur d'onde ($\lambda/30$). Elle résulte de la superposition cohérente de tous les modes sublongueur d'onde régénérés par le retournement temporel et qui oscillent sur des dimensions de l'ordre de la distance entre deux fils, de l'ordre du millimètre.

Disposer de taches focales de dimension millimétrique dans le domaine des télécommunications est intéressant, car, en plaçant plusieurs antennes séparées de quelques millimètres au sein du milieu de résonateurs, on peut envoyer des messages différents focalisés sur chacune des antennes du milieu à partir d'une ou de plusieurs antennes situées en champ lointain. On peut ainsi exploiter la complexité du milieu pour augmenter la quantité d'information reçue dans un volume donné. La Société *Time-Reversal Communications* a été créée pour exploiter ces idées dans le domaine des télécommunications discrètes et sécurisées à très haut débit.

Ce même principe de focalisation sublongueur d'onde s'applique aussi en acoustique. G. Lerosey et F. Lemoult ont choisi de l'illustrer en fabriquant un petit « cristal » constitué de 49 canettes de soda vides (voir la figure 3)! On sait qu'en acoustique on peut fabriquer des résonateurs sublongueur d'onde, dits de Helmholtz. Ces canettes cylindriques trouées sont des résonateurs dont le diamètre est égal à 6,6 centimètres et qui résonnent à 420 hertz, ce qui correspond à une longueur d'onde dans l'air de 80 centimètres.

En fabriquant une « structure cristalline » de sept canettes sur sept, on réalise un milieu qui peut vibrer selon 49 modes d'oscillation différents, dont les fréquences s'étalent de 340 à 420 hertz. En utilisant une émission acoustique brève de dix millisecondes centrée sur 400 hertz et localisée juste au-dessus d'une canette, on observe en champ lointain une onde sonore résultant de la superposition de tous les modes. La refocalisation par retournement temporel est, comme avec



5. POUR « BRÛLER » UNE TUMEUR CÉRÉBRALE, on y focalise des ultrasons intenses. Pour ce faire, on pourrait utiliser un retournement temporel (a), mais cela imposerait d'implanter un émetteur situé à l'endroit de la tumeur. Pour éviter cela, on utilise une méthode virtuelle de retournement temporel. Connaissant l'image tridimensionnelle du crâne, on construit un modèle de propagation d'une onde ultrasonore dans le cerveau et l'on simule une multitude de retournements à partir de n'importe quel point du cerveau. La méthode permet de focaliser les ondes de façon précise (b). Sans corrections des aberrations dues au crâne, l'onde ne focalise pas (c). La méthode, testée sur l'animal, permet d'élever la température des cellules tumorales jusqu'à 65 °C (le point rouge), ce qui les détruit.

des micro-ondes, très efficace et on refocalise l'onde sonore sur une tache focale dont la dimension est de l'ordre de $\lambda/25$.

Les applications des miroirs à retournement temporel se multiplient, entre autres dans le domaine médical, dans le traitement de certaines tumeurs cérébrales par ultrasons focalisés. Avec cette méthode, il s'agit de focaliser des ultrasons de grande intensité pendant plusieurs secondes à travers la boîte crânienne en corrigeant les aberrations de la propagation dues à l'os.

Retournement temporel dans le cerveau

Avec Mickael Tanter et Jean-François Aubry, nous avons vérifié que la technique du retournement temporel permet de compenser avec précision les effets de la boîte crânienne. Avec un premier prototype de 300 transducteurs et un émetteur implanté dans le cerveau d'une brebis, nous avons montré que l'on pouvait concentrer sur des zones millimétriques des puissances acoustiques suffisantes pour élever la température des tissus à 65 °C. Puis pour éviter l'utilisation d'un émetteur implanté, nous avons développé une approche utilisant une source

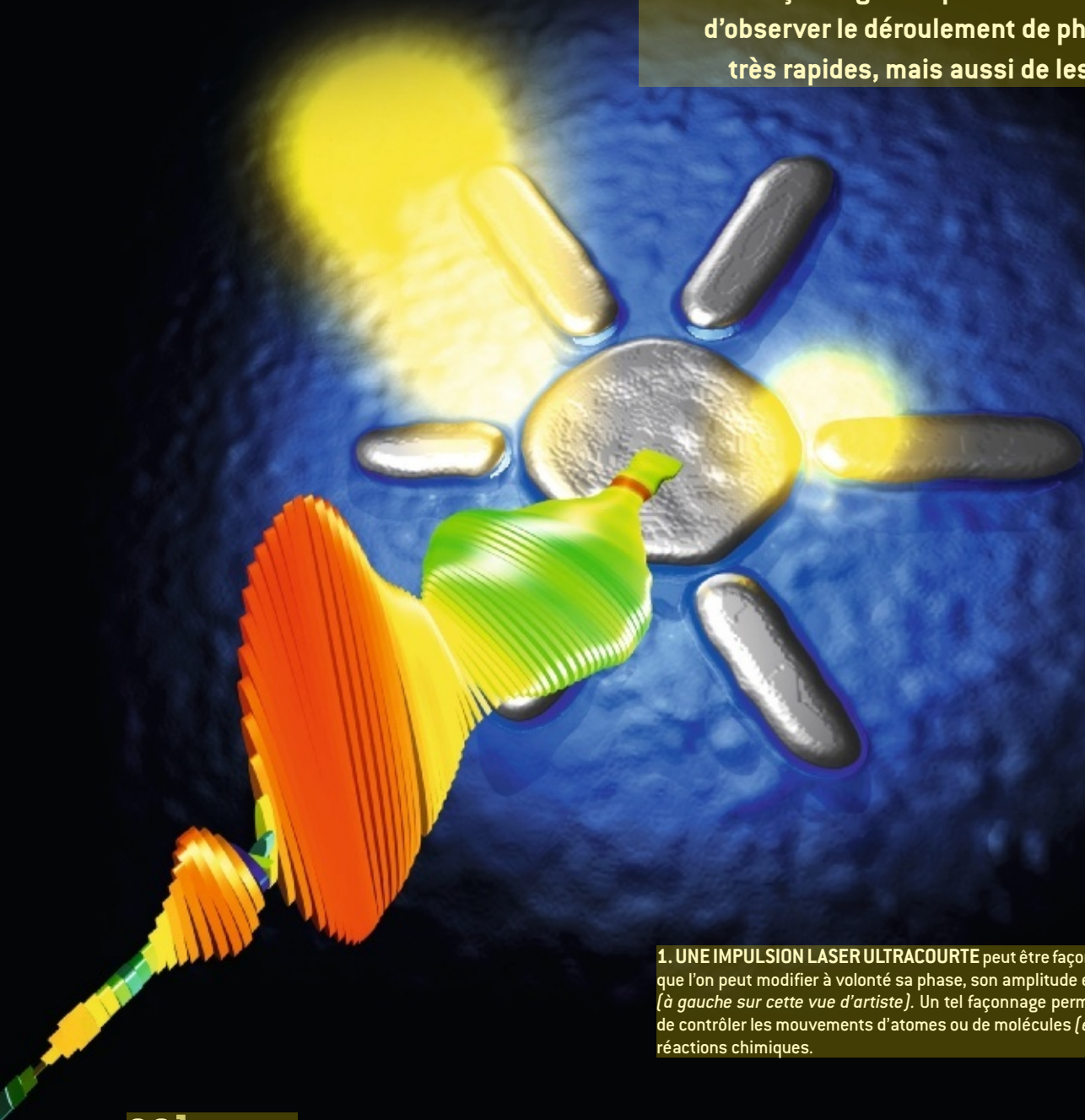
virtuelle. Elle consiste, après avoir obtenu l'image tridimensionnelle du crâne par scanner à rayons X, à bâtir un modèle informatique de la propagation ultrasonore à l'intérieur du crâne et à simuler l'opération de retournement temporel de signaux provenant de n'importe quel point du cerveau. La Société *Supersonic Image* a fabriqué un dispositif à 512 transducteurs, compatible avec un dispositif d'imagerie par IRM. La méthode a été validée sur des cadavres, et elle sera prochainement testée dans le cadre du projet *Ultrabrain*, à l'Institut du cerveau et de la moelle.

Enfin, un mot des sonars et radars à retournement temporel. Ils sont également en plein développement. Ils peuvent être utilisés en imagerie sous-marine des petits fonds où il est pratiquement impossible de repérer par les méthodes sonar classiques des cibles, telles des mines, à cause de la réverbération. De même, des radars à retournement temporel permettent d'observer des personnes se déplaçant derrière un mur. Les applications du retournement temporel dans les milieux complexes sont légion que ce soit pour les ondes acoustiques ou électromagnétiques. Qui plus est, les applications de ces techniques aux ondes lumineuses, aux ondes sismiques et même aux vagues à la surface de la mer sont plus que prometteuses. ■

Façonner la lumière pour contrôler la matière

Béatrice Chatel

Les physiciens savent aujourd'hui sculpter le profil des impulsions lumineuses ultrabrèves. Ce façonnage leur permet non seulement d'observer le déroulement de phénomènes très rapides, mais aussi de les contrôler.



1. UNE IMPULSION LASER ULTRACOURTE peut être façonnée, c'est-à-dire que l'on peut modifier à volonté sa phase, son amplitude et sa polarisation (à gauche sur cette vue d'artiste). Un tel façonnage permet d'observer ou de contrôler les mouvements d'atomes ou de molécules (en gris) dans des réactions chimiques.

En 1878, à l'Université Stanford, en Californie, dans une carrière blanche à la chaux, Charles Murvin s'élance sur son cheval Occident. Sur le bord de la piste, le photographe anglais Eadweard Muybridge aligne 12 appareils photographiques afin de fixer 12 images au millième de seconde, qui décomposent le mouvement du cheval au galop. Grâce à ce dispositif, il est pour la première fois possible de saisir un mouvement trop rapide pour l'œil.

Par la suite, l'homme observera des phénomènes de plus en plus brefs. Dans les années 1930, Harold Edgerton, de l'Institut de technologie du Massachusetts, aux États-Unis, développe la stroboscopie avec une lampe au xénon émettant des flashes de l'ordre de la microseconde. Cette technique permet de décomposer le mouvement et saisir des événements aussi brefs qu'une balle de pistolet traversant une pomme. Mais comment observer les mouvements d'atomes ou d'électrons dans une molécule ? Ces phénomènes se déroulent en quelques femtosecondes ou attosecondes (la femtoseconde équivaut à 10^{-15} seconde, soit un millionième de milliardième de seconde, et l'attoseconde correspond à 10^{-18} seconde). Pour ce faire, il faut disposer d'un outil capable de produire des stimulations de l'ordre de quelques femtosecondes.

Le développement du laser, à partir des années 1960, permet d'atteindre de telles résolutions. Le premier laser capable d'émettre une impulsion lumineuse d'une durée de 100 femtosecondes a été mis au point en 1981 dans les Laboratoires américains Bell par l'équipe de Charles Shank. Ce laser, dit à impulsion ultracourte ou femtoseconde, a ensuite été répliqué dans de nombreux laboratoires. Les chercheurs disposent depuis d'un outil pour étudier le déroulement de phénomènes ultracourts, telles les réactions chimiques.

En outre, les physiciens se sont aperçus qu'en manipulant les caractéristiques de ces impulsions ultrabrèves, ils étaient capables d'orienter des réactions chimiques. Il s'agit du façonnage des ondes ultracourtes. Cette technique repose sur des principes optiques et utilise des dispositifs que nous examinerons. Nous verrons ensuite comment le façonnage permet d'optimiser et de contrôler des réactions chimiques. Enfin, nous évoquerons quelques applications du façonnage des ondes laser dans l'étude des interactions lumière-matière.

Utilisés pour étudier le déroulement de phénomènes ultrabrefs, les lasers femtosecondes produisent des impulsions lumineuses dont les propriétés sont bien maîtrisées.

Toute impulsion lumineuse peut être considérée comme la somme d'un grand nombre d'ondes électromagnétiques sinusoïdales (ou « monochromatiques »), caractérisées chacune par une fréquence ν ou une période temporelle T (on a $T = 1/\nu$), correspondant à une longueur d'onde λ (telle que $\lambda = cT$, où c est la vitesse de la lumière dans le vide). L'ensemble de ces

spectre, soit en termes de durée. Ainsi, la largeur spectrale d'une impulsion définit sa durée. L'impulsion la plus courte est obtenue lorsque toutes les composantes spectrales sont en phase. On dit qu'elle est limitée par transformée de Fourier. En outre, plus une impulsion a une largeur spectrale importante, plus elle est brève. Une forme de façonnage (sur laquelle nous reviendrons) consiste à modifier la durée d'une impulsion, à spectre fixé, en changeant les relations de phase dans le spectre.

Dans le vide, les différentes ondes monochromatiques qui constituent une impulsion lumineuse se déplacent à la même vitesse. La lumière parcourt ainsi 0,03 millimètre en 100 femtosecondes. En revanche, dans l'air ou un autre milieu matériel, la vitesse de propagation v dépend de la fréquence ; l'indice de réfraction, qui est égal au rapport des vitesses c/v , en dépend donc aussi.

Plus une impulsion est brève, plus son spectre est large

Cette dépendance vis-à-vis de la fréquence (ou de la longueur d'onde) constitue le phénomène de dispersion, mis en évidence par la décomposition de la lumière blanche à travers un prisme. Ainsi, lorsqu'une impulsion se propage, elle s'allonge, car chacune de ses composantes a une vitesse différente : la partie rouge de l'impulsion (les basses fréquences) traverse le milieu plus vite que sa partie bleue (les hautes fréquences).

En outre, plus l'impulsion est brève, plus elle se déforme en se propageant. Ainsi, une impulsion laser de longueur d'onde centrale de 800 nanomètres et d'une durée de 10 femtosecondes, qui se propage dans un centimètre de verre, s'étire d'environ une picoseconde (1 000 femtosecondes). Une impulsion de 100 femtosecondes (dont le spectre est moins large) s'allonge beaucoup moins, puisqu'elle atteint environ 160 femtosecondes après propagation.

Pour compenser cet effet d'allongement et conserver les propriétés temporelles des impulsions après propagation, les physiciens ont développé des dispositifs dits compresseurs, à base de prismes ou de réseaux de diffraction. Ces montages optiques permettent d'allonger le chemin optique des composantes de basses fréquences

L'ESSENTIEL

- ✓ Pour observer des mouvements très rapides de la matière, les physiciens utilisent des impulsions laser qui durent quelques femtosecondes.
- ✓ À l'aide de dispositifs optiques, on peut modifier la phase, l'amplitude ou la polarisation de ces impulsions : elles sont façonnées.
- ✓ De nombreux domaines de recherche se sont développés grâce au façonnage d'ondes laser, en chimie, biologie (microscopie multiphotonique) et physique des hautes intensités.

composantes spectrales (ou fréquentielles) constitue le spectre de l'impulsion.

En effet, lorsque plusieurs ondes se superposent dans une région de l'espace, leurs amplitudes s'additionnent algébriquement en chaque point ; on dit qu'elles interfèrent. L'interférence est constructive si les ondes sont en phase, destructive si elles sont en opposition de phase.

Il existe une transformation mathématique qui permet de passer du domaine des fréquences au domaine temporel : la transformation de Fourier. Les physiciens des impulsions courtes l'utilisent pour décrire l'impulsion lumineuse soit en termes de