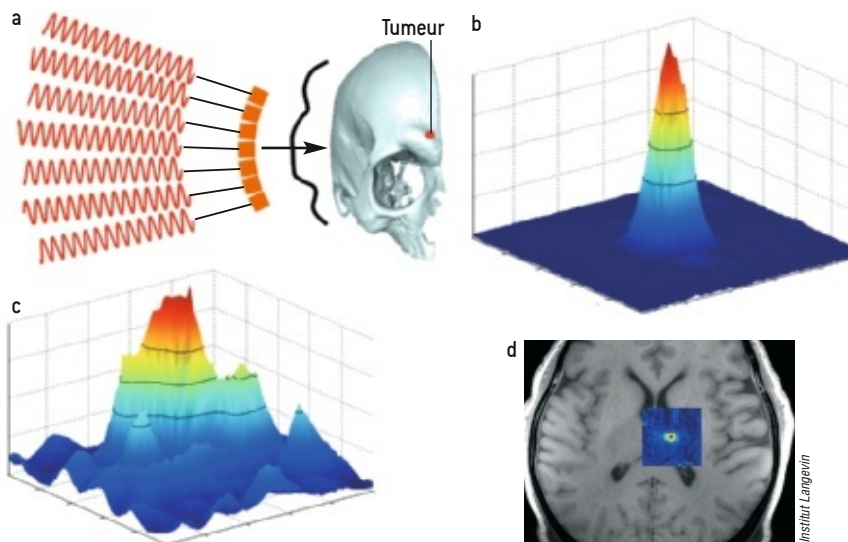


s'étalant de quelques centaines de mégahertz à 2,4 gigahertz. Après émission par la source au sein de cette structure d'une impulsion à large spectre durant dix nanosecondes, une antenne située en champ lointain reçoit un signal très long qui résulte de la superposition de tous les modes excités. Un 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.