

efficace que le nombre de modes excités par la source est grand. Quant à la dimension de la tache focale, elle est de l'ordre de la plus petite distance qui sépare un nœud d'un ventre des différents modes, c'est-à-dire de la demi-longueur d'onde des fréquences les plus élevées du spectre.

Une application de cette expérience touche la domotique : elle permet de transformer un objet solide quelconque (une table, une porte, un vase, un mur, etc.) en un clavier intelligent. Imaginons l'impact d'un doigt sur la surface d'un objet, qui, s'il n'est pas trop grand, se comporte comme une cavité. Il produit une onde élastique qui pénètre dans l'objet et s'y réverbère. L'enregistrement de cette signature sonore, sur un temps long, par un unique transducteur, contient toute l'information pour localiser la source de l'impact. Comme on l'a évoqué, un retournement temporel refocaliserait ce signal sur sa source. Pour réaliser un clavier tactile, on divise la surface de l'objet en points d'impact élémentaires dont on enregistre, dans une phase d'apprentissage, les signatures temporelles acoustiques. Puis, quand on tape à un endroit de l'objet, on compare la signature de cet impact à la banque des signatures mémorisées.

Cela revient à réaliser mathématiquement, dans l'ordinateur, l'opération de retournement temporel, et permet d'obtenir des objets tactiles très pratiques. Non seulement on peut réaliser des claviers à touches virtuelles, mais la technique est aussi applicable quand un doigt se déplace sur une surface. Le doigt crée, en glissant, un bruit de frottement qui permet de

suivre sa trajectoire : le doigt devient ainsi une souris d'ordinateur. Une jeune entreprise, *Sensitive Object*, créée par Ros Kiri Ing, un des chercheurs de notre laboratoire, a connu un grand succès et a été récemment rachetée par une grande société américaine, *Tyco-Electronics*, et développe de telles tablettes tactiles.

Des résonateurs couplés pour la super-résolution

Les exemples précédents montrent qu'un milieu diffusant ou des parois réfléchissantes permettent à une petite antenne de se transformer en une lentille spatio-temporelle capable de focaliser pendant un temps bref des signaux sur une dimension de l'ordre de la longueur d'onde. Est-il possible d'utiliser le même principe pour descendre au-dessous de la longueur d'onde ? On peut effectivement y parvenir, mais, pour ce faire, il ne faut pas que la source sur laquelle on veut focaliser le faisceau soit située dans un milieu homogène : c'est la source elle-même qui est placée dans un milieu hétérogène.

Ce milieu qui entoure la source doit créer un spectre de modes dont les échelles d'oscillations spatiales sont bien inférieures aux longueurs d'onde utilisées. Pour obtenir un tel résultat, il faut un milieu formé d'une collection de petits résonateurs fortement couplés entre eux. Ces résonateurs doivent avoir des dimensions beaucoup plus petites que la longueur des ondes qui les mettent en résonance. On

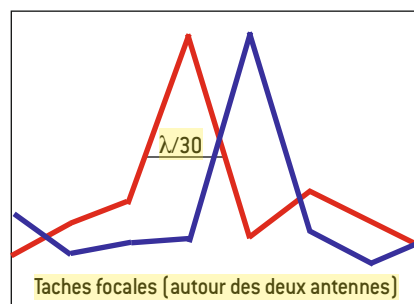
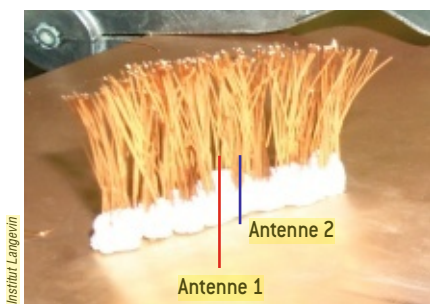
parle de résonateurs sublongueur d'onde qui, du fait de leur petite dimension, peuvent être disposés en nombre dans une zone petite comparée à la longueur d'onde. Ils sont répartis soit de façon désordonnée soit de façon périodique.

On réalise alors une structure (une sorte de métamatériau) qui ressemble à une grosse molécule formée d'atomes identiques couplés entre eux ou à un petit morceau de cristal. On sait qu'un atome se comporte comme un résonateur qu'excitent des photons de fréquences données. La longueur d'onde de ces photons excitateurs est bien supérieure à la taille de l'atome. Lorsqu'on étudie une molécule formée de plusieurs atomes couplés, on observe un spectre de modes de résonance plus riche que celui d'un atome particulier et, à chaque fréquence, correspond une structure spatiale spécifique d'oscillation des atomes (un mode de vibration des atomes).

L'échelle spatiale des oscillations de ces modes peut être aussi petite que la distance entre deux atomes voisins, qui, ici, est bien inférieure à la longueur d'onde. Dès lors, on comprend qu'une antenne à large bande (utilisée pour le retournement temporel) capable d'exciter de nombreux modes sublongueur puisse créer des concentrations de lumière ou d'énergie mécanique sur des taches focales dont la taille sera inférieure à la longueur d'onde. Plus le nombre de résonateurs couplés est grand, plus l'effet est spectaculaire.

Nous avons réalisé les premières démonstrations de ce principe dans le domaine des micro-ondes et des ondes acoustiques, avec Geoffroy Lerosey, Julien de Rosny, Fabrice Lemoult et Arnaud Tourin, à l'Institut Langevin. Dans la première expérience, nous nous sommes intéressés à la focalisation d'ondes électromagnétiques du type micro-ondes utilisées en télécommunication dans la bande Wi-Fi. La fréquence centrale d'utilisation est égale 2,4 gigahertz correspondant à une longueur d'onde de 12 centimètres.

La source de rayonnement utilisée est un petit fil de cuivre que l'on insère au sein d'une structure faite de centaines de petits fils de cuivre répartis latéralement de façon aléatoire, mais très proches les uns des autres. Ces fils ont tous la même longueur choisie pour résonner à 2,4 gigahertz. En se couplant entre eux, ils créent un spectre de modes collectifs très riches qui contient de nombreuses fréquences



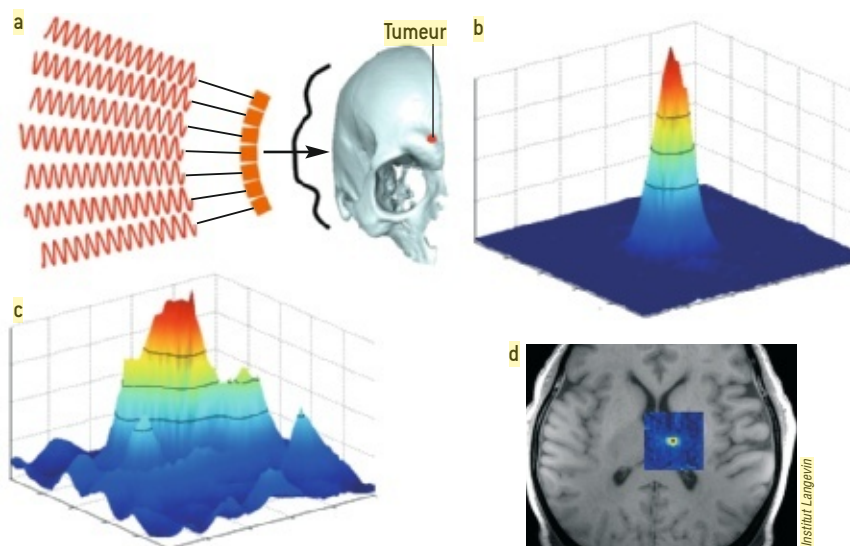
4. DE NOMBREUX PETITS FILS DE CUIVRE (résonateurs électromagnétiques), de même taille, sont répartis de façon aléatoire sur un support. Leur couplage crée un ensemble très riche de modes collectifs d'oscillations. Ces modes sont excités par une impulsion électromagnétique émise par une petite antenne (rouge ou bleue) insérée au cœur de la structure. Une antenne située à grande distance reçoit un signal complexe, la superposition de tous les modes excités. Une opération de retournement temporel et de réémission permet de refocaliser l'onde sur sa source, mais avec une tache focale de taille millimétrique ($\lambda/30$, figure de droite), soit quatre millimètres. Cela signifie qu'une antenne éloignée peut envoyer des messages distincts focalisés sur chacune des deux antennes proches.

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. ■