

pourrait-on rediriger toute l'information concernant une source vers un unique transducteur de retournement temporel? Nous avons enfermé la source et le transducteur dans une cavité «ergodique», aux parois parfaitement réfléchissantes. Une table de

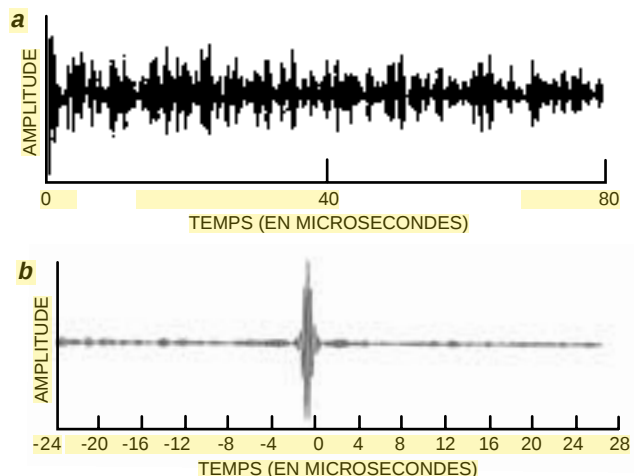
billard serait ergodique si ses bords étaient incurvés comme dans un stade: quelle que soit la direction initiale du tir, une boule finirait par passer en tout point de la table. De la même manière, dans une cavité ergodique, à condition d'attendre suffisamment longtemps,

toutes les ondes sonores émises par la source arrivent au transducteur.

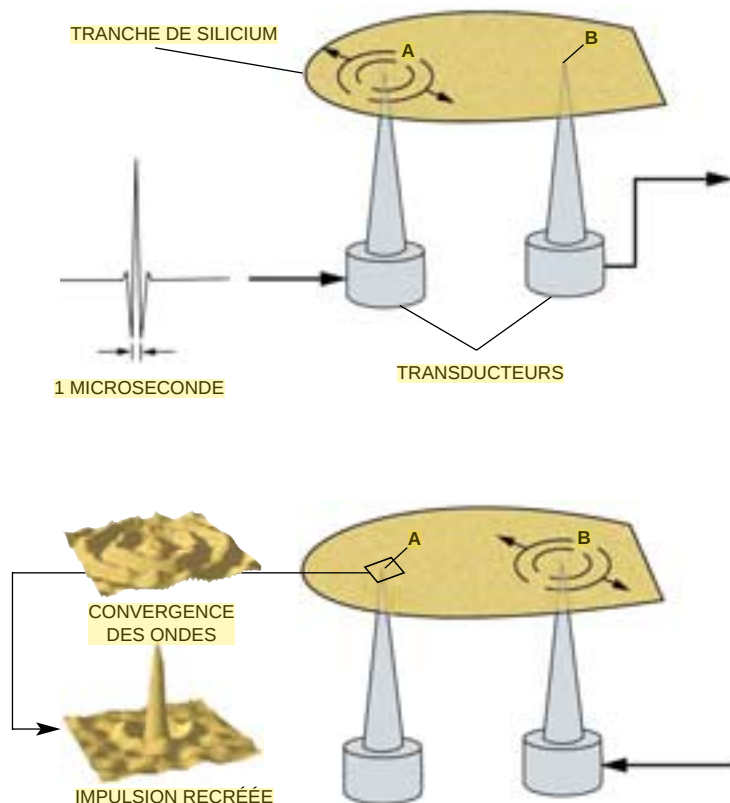
Voici trois ans, avec Carsten Draeger, nous avons mis en évidence un retournement temporel sur des ondes élastiques qui se propageaient à la surface d'un disque de silicium tronqué



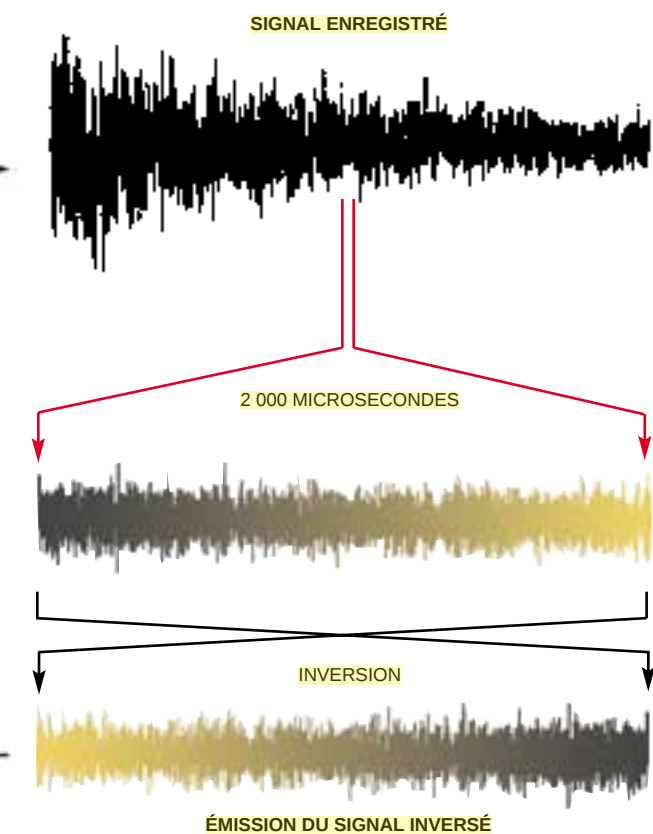
2. UNE PARTIE DE FLIPPER CHAOTIQUE à ondes acoustiques se joue lorsqu'une impulsion ultrasonore d'une durée d'une microseconde est émise dans l'eau par un transducteur (à gauche sur la photographie): les ondes ricochent en tous sens au milieu de 2 000 tiges de métal réparties au hasard, avant d'atteindre un miroir à retournement temporel constitué de 96 transducteurs (à droite sur la photo-



graphie). Chaque élément du miroir reçoit un signal ultrasonore apparemment chaotique (on en voit une partie en (a)), d'une durée très supérieure à celle de l'impulsion initiale. Lorsque le miroir renvoie les signaux chaotiques, inversés et synchrones, ils ricochent en marche arrière à travers le labyrinthe de tiges et se combinent pour redonner une impulsion bien nette (b) sur le transducteur de gauche.



3. UN UNIQUE TRANSDUCTEUR suffit à retourner temporellement une onde dans une «cavité» fermée. Un transducteur source émet une impulsion en un point A d'une petite tranche de silicium (en haut). Un transducteur situé en B enregistre les réverbérations chaotiques de l'impulsion, qui subit des centaines de



réflexions successives sur les bords de la tranche de silicium. Le transducteur placé en B réémet ensuite une petite partie de ce signal inversé (en bas). Après de nombreuses réflexions, les différentes composantes de ce signal se recombient pour recréer la brève impulsion initiale en A.

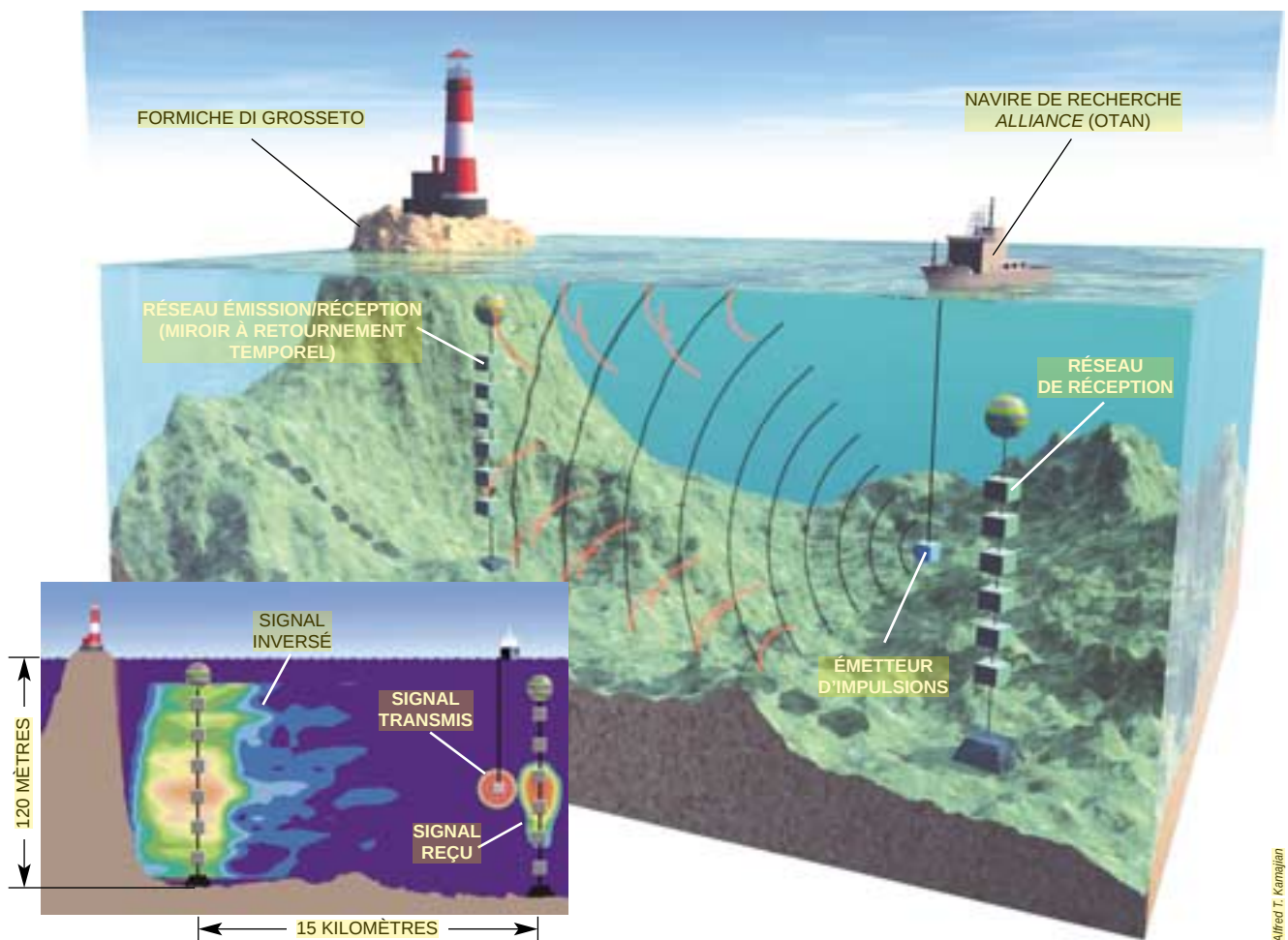
en utilisant un transducteur unique (voir la figure 3). Le transducteur source placé en un point A émettait une onde de surface circulaire, d'une microseconde de durée. Le transducteur de retournement temporel, situé au point B, enregistrait alors un signal chaotique pendant plus de 50 millisecondes (soit 50 000 fois la durée de l'impulsion initiale), correspondant à une centaine de réflexions successives de l'impulsion initiale sur le bord du disque. Nous avons ensuite retourné temporellement deux millisecondes du signal enregistré et avons réémis ce signal au moyen du transducteur situé en B. À l'aide d'un interféromètre optique, nous observions les déplacements verticaux que les ondes élastiques engendraient à la surface du silicium, autour du point A.

Nous avons alors assisté, au point A, à une remarquable restitution de l'impulsion originale, focalisée dans l'espace

sur un rayon d'environ une demi-longueur d'onde et dans le temps sur une durée de l'ordre d'une microseconde. En utilisant les réflexions sur les bords, le champ d'onde retourné temporellement a convergé en provenance de toutes les directions vers l'origine, et a produit une tache circulaire. La forme de l'onde retournée enregistrée en B, d'une durée de deux millisecondes (correspondant à la superposition de près de 2 000 oscillations), est le code permettant de focaliser exactement sur le point A à partir du point B. Ce principe pourrait servir de base à un système cryptographique où l'on engendrerait des impulsions en différents points de la cavité à partir de différents codes provenant de B.

Les miroirs à retournement temporel peuvent également être utiles dans les communications acoustiques sous-marines. Les performances des

systèmes classiques sont médiocres, en eau peu profonde, car le son s'y réfléchit entre le fond et la surface, de sorte qu'une seule impulsion donne de multiples échos sur le récepteur, comme dans la cavité ergodique. Cependant, les «parois» d'un chenal sous-marin ne sont pas ergodiques, et un miroir à retournement temporel doit comporter plusieurs transducteurs. Des chercheurs de l'Institut Scripps, de l'Université de San Diego, et du Centre de recherche sous-marine SACLANT, en Italie, ont récemment construit un miroir à retournement temporel de 20 éléments qu'ils ont testé, au large des côtes italiennes (voir la figure 4) : ce miroir focalisait des ondes sonores jusqu'à une distance de 30 kilomètres, dans 120 mètres d'eau. Comme dans l'expérience avec des tiges de fer, la tache focale du faisceau retourné était bien inférieure à celle que l'on



4. LES COMMUNICATIONS SOUS-MARINES seraient améliorées par l'utilisation du retournement temporel. L'efficacité de cette technique a été testée dans des eaux d'une profondeur de 120 mètres, près de l'île d'Elbe, au large de l'Italie. Une impulsion sonore a été émise à partir de l'emplacement de la cible. Déformé par la réfraction et par les multiples réflexions (en rouge) sur la surface et sur le fond, le signal a été enregistré jus-

qu'à 30 kilomètres de la source par un réseau de transducteurs. Le signal retourné et renvoyé par le réseau était bien focalisé sur la cible. Sur le cartouche (en bas à gauche), les contours de couleur indiquent l'intensité du signal sonore. L'impulsion de départ (disque rouge) arrive très déformée sur le miroir à retournement temporel, mais quand celui-ci renvoie le signal retourné, on obtient une impulsion bien focalisée sur le réseau récepteur (à droite).

Alfred T. Kamajian



Vo Trung Dung

5. LA POROSITÉ DE LA BOÎTE CRÂNIENNE engendre une forte dissipation de l'énergie ultrasonore, d'où la grande difficulté de la focalisation des ultrasons sur les tumeurs du cerveau. Néanmoins, un miroir à retournement temporel muni d'un algorithme de correction de dissipation permet d'obtenir des taches focales très fines à l'intérieur du crâne.

obtient avec les sonars classiques (une amélioration de la résolution d'un facteur 50 a été observée). Philippe Roux et moi-même avons réalisé des expériences similaires en utilisant des guides d'ondes ultrasonores, où se produisent de multiples réflexions. La focalisation de l'onde retournée dans l'espace et dans le temps engendre une impulsion acoustique très puissante, avec laquelle on peut créer une onde de choc.

Parmi les nombreuses applications envisageables des miroirs à retournement temporel, l'une des plus intéressantes est l'échographie : après l'émission d'une brève impulsion, on détecte les échos renvoyés par des cibles. Ainsi on explore le corps humain, on obtient des images des fonds marins (pour la détection de mines, de sous-marins ou d'objets enfouis), on teste des pièces mécaniques (contrôles non destructifs, à la recherche de fissures ou de défauts). Dans tous ces cas, une détection de bonne qualité requiert un faisceau acoustique très fin. Or, beaucoup de milieux de propagation distordent les faisceaux et dégradent la focalisation. En imagerie médicale, par exemple, les ultrasons traversent de la graisse, des os et des muscles avant d'atteindre des cibles comme des tumeurs ou des calculs rénaux. Comment corriger la déformation des faisceaux ultrasonores sans connaître la manière dont ils sont distordus ? Le miroir à retournement temporel pallie ces difficultés.

L'échographie ultrasonore

Dans un premier temps, une partie du réseau de transducteurs envoie une brève impulsion à travers le milieu afin d'«illuminer» la région à étudier. Si une cible est présente dans le milieu, elle réfléchit l'onde, et le réseau enregistre, retourne temporellement et réémet cette onde réfléchie. Le retournement temporel garantit que cette onde retournée se focalisera sur la cible, malgré les distorsions engendrées par le milieu traversé.

Lorsque la région à étudier ne contient qu'une cible, cette technique d'auto-focalisation est très efficace. En revanche, avec plusieurs cibles réfléchissantes, le problème est plus délicat. On sélectionne alors une cible en répétant la procédure plusieurs fois. Imaginons le cas simple où le milieu comporte deux cibles de réflectivités différentes. L'écho de l'impulsion initiale engendré par la cible la plus brillante a une amplitude supérieure à celle de l'écho provenant de la cible la moins réfléchissante. Par conséquent, le premier signal retourné temporellement focalise une onde de plus forte amplitude sur la plus réfléchissante des deux cibles. L'écho de ces ondes fait ressortir encore davantage la cible la plus brillante, et, après quelques itérations, on obtient un signal qui se focalise préférentiellement sur cette cible. Des techniques plus complexes, mises au point par

Claire Prada-Julia, permettent de sélectionner la cible la moins réfléchissante.

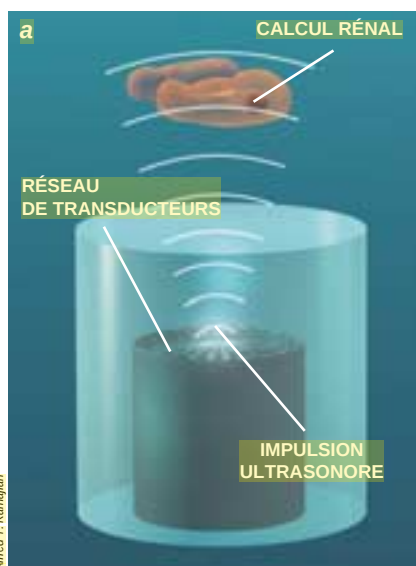
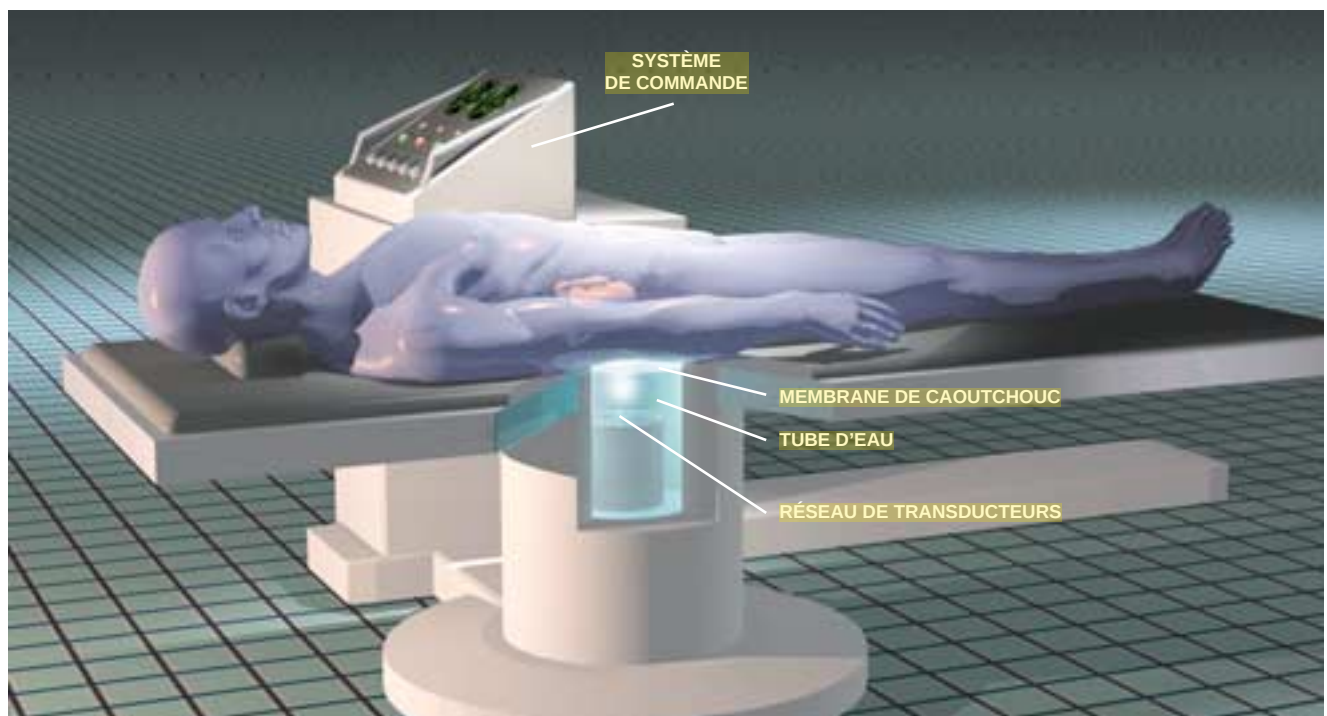
De toutes les applications médicales du retournement temporel, la destruction des calculs rénaux et biliaires est la plus avancée (voir la figure 6). Par des techniques classiques d'imagerie par ultrasons ou par rayons X, on localise avec précision de tels calculs, mais les tissus environnants empêchent une focalisation suffisante des ondes ultrasonores pour pulvériser efficacement les calculs. De

surcroît, les calculs bougent avec la respiration, et sont donc difficiles à suivre. Seuls 30 pour cent des tirs atteignent le calcul, qui n'est détruit que par plusieurs milliers de tirs.

Les techniques de retournement temporel des ultrasons optimisent les tirs : après plusieurs itérations de l'opération de retournement temporel, le faisceau ultrasonore se focalise sur la zone la plus réfléchissante du calcul. On peut alors renvoyer vers la cible une onde retournée de forte puissance, qui se focalise sur le cal-

cul et le détruit. Ce processus peut être répété pour suivre en temps réel les mouvements du calcul. Jean-Louis Thomas, François Wu et moi-même avons mis au point un miroir à retournement temporel de 20 centimètres de diamètre destiné à cette application. La procédure de focalisation et de poursuite sur des calculs a été testée avec succès dans deux hôpitaux.

L'hyperthermie par ultrasons est une autre application médicale prometteuse. Dans cette technique, on chauffe des tissus malades à l'aide d'ul-



6. LES CALCULS RÉNAUX peuvent être pulvérisés par des ultrasons, grâce à la propriété de focalisation automatique des miroirs à retournement temporel. Une impulsion ultrasonore émise par une partie d'un réseau d'émetteurs (a) est réfléchi et déformée par le calcul (b).

Cet écho, retourné temporellement et fortement amplifié, traverse les tissus et organes intermédiaires, se focalise sur le calcul (c) et le détruit. En itérant l'opération, on améliore la focalisation sur le calcul malgré ses mouvements, dus à la respiration du patient.

trasons de forte intensité : les températures supérieures à 65 °C détruisent des tissus biologiques en quelques secondes. Des appareils faisant appel aux techniques classiques pour focaliser les ultrasons existent déjà sur le marché, mais leur application est restreinte aux tissus statiques, comme les tumeurs cancéreuses de la prostate. Les mouvements du cœur et de la respiration limitent les applications abdominales et cardiaques. Emad Ebbini et ses collègues de l'Université du Michigan mettent au point des réseaux à focalisation automatique pour surmonter le problème. Avec Mikael Tanter et Jean-Louis Thomas, nous étudions l'hyperthermie du cerveau. Nous voulons focaliser les ondes au travers de la boîte crânienne, qui réfracte et disperse considérablement le faisceau d'ultrasons. De surcroît, le crâne est un matériau poreux : il dissipe une partie de l'énergie de l'onde en chaleur et brise la symétrie par retournement temporel des équations de propagation de l'onde. Nous avons mis au point une technique de focalisation qui corrige ces effets de dissipation avant l'opération de retournement temporel. Grâce à cette technique, nous envoyons un faisceau d'ultrasons au travers du crâne, qui se focalise sur une tache de 1,5 millimètre (voir la figure 5).

Nous avons également utilisé des miroirs à retournement temporel pour la détection de défauts dans des pièces. Lorsque les défauts sont petits, que la forme de la pièce est complexe ou que le matériau est hétérogène, la détection des défauts est délicate. Habituellement, on immerge la pièce à tester et les transducteurs dans une piscine, mais les faisceaux sont déviés par réfraction au passage de l'interface entre l'eau et le solide, ce qui complique la détection de petits défauts. De surcroît, dans les solides, les ondes ultrasonores engendrent des ondes variées, de types et de polarisation différentes. Nous avons montré que les techniques de focalisation à l'aide de miroirs à retournement temporel compensent automatiquement tous ces effets. Dans le cadre d'une collaboration avec la SNECMA (Société nationale d'étude et de construction de moteurs d'aviation), nous avons mis au point, avec F. Wu, un miroir à retournement temporel formé de 128 transducteurs capable de détecter des défauts de faible contraste dans des alliages de

titane utilisés dans les moteurs d'avion. Le titane possède une microstructure hétérogène, qui engendre un bruit échographique gênant, parce qu'il masque l'écho résultant des défauts. Par l'itération du retournement temporel, nous avons détecté des défauts de 0,4 millimètre dans des billettes de titane de 250 millimètres de diamètre, avec un rapport signal sur bruit bien meilleur que classiquement.

Maintenant que la technique de retournement temporel des ondes acoustiques est bien maîtrisée en laboratoire, un travail d'application s'impose. Le retournement d'un «allô» est amusant, mais le principe de la focalisation du «olla» au niveau de la bouche du locuteur peut également servir à engendrer des hologrammes acoustiques : le réseau de transducteurs peut, par exemple, être programmé pour focaliser simultanément le son «bonjour» près d'une personne, et «hello» près d'une autre.

D'autres ondes que les ondes sonores peuvent également être retournées temporellement. Des ingénieurs explorent les applications de ces techniques au radar pulsé, en utilisant les ondes électromagnétiques. Un autre type d'onde intervient en mécanique quantique : les fonctions d'onde quantiques qui décrivent la matière. Lorsque la fonction d'onde d'un électron heurte la frontière entre un conducteur et un supraconducteur, on assiste à une réflexion qui s'apparente au retournement temporel. À quels tours de magie assisterions-nous si l'on parvenait à retourner des ondes quantiques!

Mathias FINK est directeur du Laboratoire ondes et acoustique à l'École supérieure de physique et de chimie industrielles de la ville de Paris (ESPCI) et professeur à l'Université Paris VII (Denis Diderot).

D. ROYER et E. DIEULESAINT, *Ondes élastiques dans les solides*, tome 1, Masson, 1996.

M. FINK et C. PRADA, *Ultrasonic Focusing with Time-Reversal Mirrors*, *Advances in Acoustic Microscopy Serie*, sous la direction de A. Briggs et W. Arnold, Plenum Press, 1996.

M. FINK, *Time-Reversed Acoustics*, in *Physics Today*, vol. 50, n° 3, pp. 34-40, mars 1997.

M. FINK, *Ultrasound Puts Materials of the Test*, in *Physics World*, vol. 11, n° 2, pp. 41-45, février 1998.
