

que le «allô» original et qui termine dans la bouche du locuteur.

Afin de fabriquer simplement ces miroirs, on utilise des transducteurs piézo-électriques, qui rassemblent les deux fonctions, microphone et haut-parleur, sur le même composant.

Le retournement temporel requiert également que la quantité d'énergie dissipée sous forme de chaleur soit faible : la chaleur est un mouvement aléatoire des molécules de l'air, alors qu'un son correspond à un mouvement collectif ordonné à l'échelle de la longueur d'onde, qui, seul, peut être retourné temporellement dans nos expériences. Cette condition est de même nature que la nécessité d'une faible friction dans les expériences de mécanique. En pratique, des boules de billard n'auront jamais le mouvement inverse, car elles sont freinées à l'aller par les frottements contre le support et par la résistance de l'air ; or on ne peut réaccélérer ces boules sur une trajectoire «retournée» dans le temps.

Lorsque les pertes d'énergie par dissipation sont suffisamment faibles, les équations auxquelles obéissent les ondes garantissent que, pour chaque émission sonore à partir d'une source, il existe en théorie un ensemble d'ondes qui emprunteraient exactement la même trajectoire en sens inverse jusqu'à la source du son. Cette propriété est vérifiée même quand le milieu de propagation est compliqué par la présence d'objets et par des variations de densité qui réfléchissent, dispersent et réfractent le son. Les ondes inversées font alors les mêmes tours et détours qu'à l'aller, et convergent simultanément à la source, comme si le cours du temps s'inversait. En 1988, nous avons construit et testé un tel miroir acoustique à retournement temporel, pour des ultrasons se propageant dans un milieu modérément hétérogène comparable à des tissus biologiques.

Une remarque permet de simplifier la construction des miroirs à retournement temporel : le réseau de transducteurs n'a pas besoin d'être continu pour assurer un retournement temporel optimal. Les lois de la diffraction nous apprennent qu'il suffit que les transducteurs soient répartis sur un réseau dont le pas (la distance entre deux transducteurs) est égal à la moitié de la plus petite longueur d'onde utilisée. Pour les mêmes raisons, les ondes se focalisent sur une

tache qui ne peut être plus petite que la moitié de la plus petite longueur d'onde utilisée. Autrement dit, les informations sur la source plus petites que cette grandeur sont perdues.

Dans l'idéal, le réseau de transducteurs couvrirait tous les murs de la pièce, sol et plafond compris, de sorte que l'on puisse engendrer la totalité de l'onde finale (voir la figure 1). En pratique, il est rarement possible d'entourer complètement la source avec des transducteurs, et l'on se contente d'un réseau de transducteurs de surface limitée, le miroir à retournement temporel. Évidemment, de l'information est alors perdue, et plus la dimension du miroir est faible, plus la taille du point focal augmente. Ce phénomène est l'analogie de la perte de résolution entre une image obtenue avec un grand miroir et celle obtenue avec un miroir plus petit. De fait, les opticiens étudient depuis une vingtaine d'années l'équivalent optique des miroirs à retournement temporel : les miroirs à conjugaison de phase. Ces dispositifs permettent, pour des ondes dans le domaine visible qui vibrent de façon bien sinusoïdale, d'observer une rétro-réflexion du faisceau : la lumière est réfléchie vers sa source, quelle que soit sa position relativement à celle du miroir. Cependant, ces miroirs ne peuvent retourner tous les détails d'une onde de lumière visible dont la modulation d'amplitude serait ultrarapide, comme on sait le faire en acoustique.

Un flipper chaotique

En 1994, Arnaud Derode, Philippe Roux et moi avons réalisé une expérience de retournement temporel d'ultrasons au travers d'un milieu analogue au flipper chaotique mentionné précédemment. Les ondes se réfléchissaient entre 2 000 tiges de métal parallèles, réparties aléatoirement dans une cuve d'eau (voir la figure 2). Un petit transducteur émettait pendant une microseconde une impulsion qui se propageait au travers de cette «forêt» de tiges jusqu'à un réseau linéaire de 96 transducteurs. Ce réseau détectait d'abord un premier front d'onde, correspondant à la partie du signal sonore qui s'était propagée en ligne droite à travers la forêt, puis une deuxième onde d'allure chaotique, pendant près de 200 microsecondes. Cette onde chaotique résultait de l'interférence entre toutes les ondelettes qui ont été diffusées sur les obstacles et qui emprun-

tent les multiples trajectoires possibles entre les tiges.

Dans la deuxième partie de l'expérience, nous avons retourné temporellement ces signaux et utilisé un hydrophone pour mesurer l'onde reçue là où elle avait été initialement émise. Le réseau renvoya un signal étalé sur 200 microsecondes environ, à travers la forêt de tiges, mais le signal récupéré à la source fut une impulsion d'une durée voisine d'une microseconde, comme celle qui avait été initialement émise. Nous avons également fait l'expérience sans les tiges. Aussi étonnant que cela paraisse, le retournement fut meilleur avec les tiges : le faisceau retourné temporellement se focalisait en une tache six fois plus petite avec les tiges que sans elles. En effet, les multiples réflexions à l'intérieur de la forêt de tiges redirigent vers le miroir une partie de l'onde initiale qui, sans ces obstacles, passerait à côté du réseau de transducteurs. Après l'opération de retournement temporel, l'ensemble de ce milieu diffusant se comporte à la manière d'une lentille convergente, comme si le miroir avait une ouverture six fois plus grande, et donc une résolution six fois meilleure.

Ces expériences ont montré que le phénomène de retournement temporel est stable. D'une part, les résultats étaient bons, alors que les signaux enregistrés étaient échantillonnés par des convertisseurs analogique-numérique, qui introduisaient des erreurs de numérisation. D'autre part, après des petits mouvements du réseau et des tiges d'une petite fraction de la longueur d'onde (0,5 millimètre), le retournement temporel donnait encore de bons résultats. En revanche, dans une expérience similaire avec des particules, le résultat serait désastreux, car chaque particule suit un trajet bien défini, et une petite erreur de vitesse ou de position initiale suffit pour que la particule manque un obstacle et que sa trajectoire ultérieure soit complètement altérée. Avec les ondes qui se propagent dans toutes les directions, l'amplitude est beaucoup plus stable, puisqu'elle résulte des interférences de toutes les trajectoires possibles.

Retournement temporel sur silicium

Quel serait le résultat si l'on réduisait à un le nombre de transducteurs de retournement temporel? Comment

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

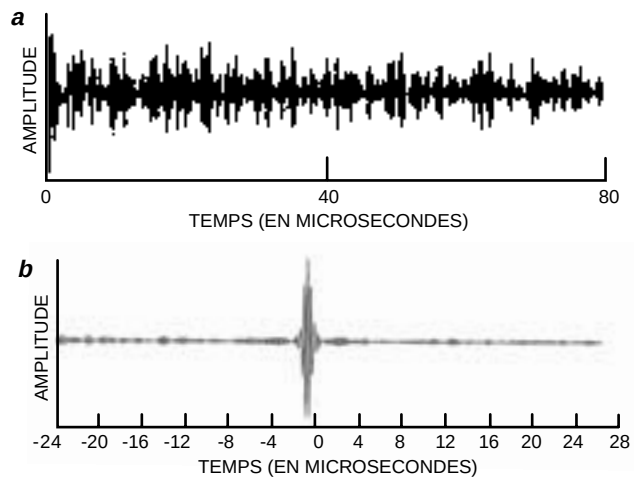
billard serait ergodique si ses bords étaient incurvés comme dans un stade: quelle que soit la direction initiale du tir, une boule finirait par passer en tout point de la table. De la même manière, dans une cavité ergodique, à condition d'attendre suffisamment longtemps,

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

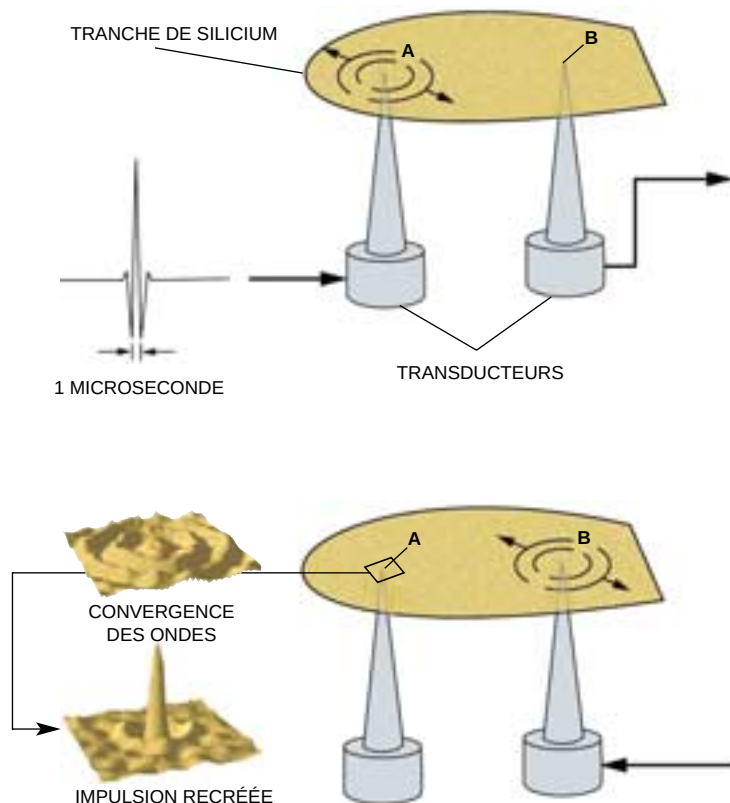
Voici trois ans, avec Carsten Draeger, nous avons mis en évidence un retournement temporel sur des ondes élastiques qui se propageaient à la surface d'un disque de silicium tronqué



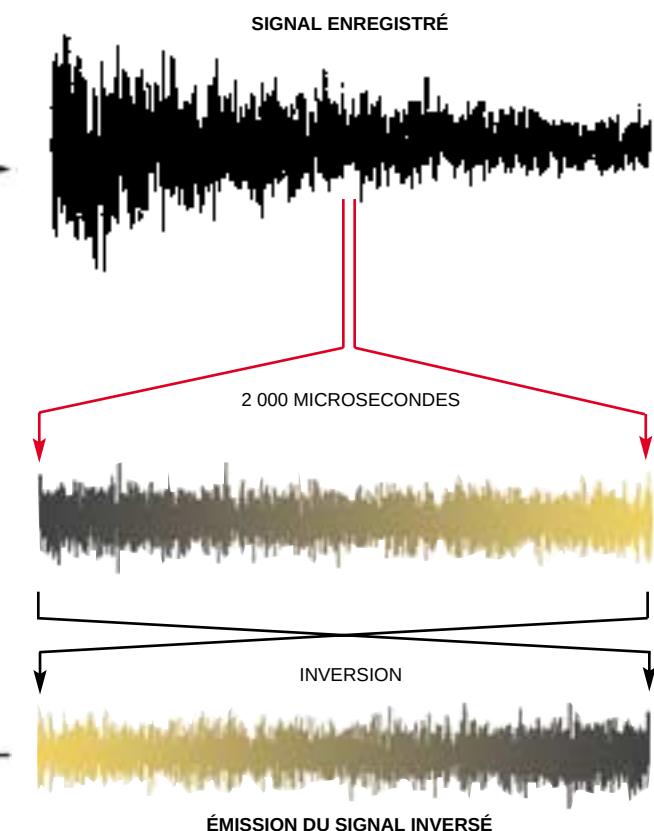
2. UNE PARTIE DE FLIPPER CHAOTIQUE à ondes acoustiques se joue lorsqu'une impulsion ultrasonore d'une durée d'une microseconde est émise dans l'eau par un transducteur (à gauche sur la photographie) : les ondes ricochent en tous sens au milieu de 2 000 tiges de métal réparties au hasard, avant d'atteindre 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 recombinaient pour recréer la brève impulsion initiale en A.