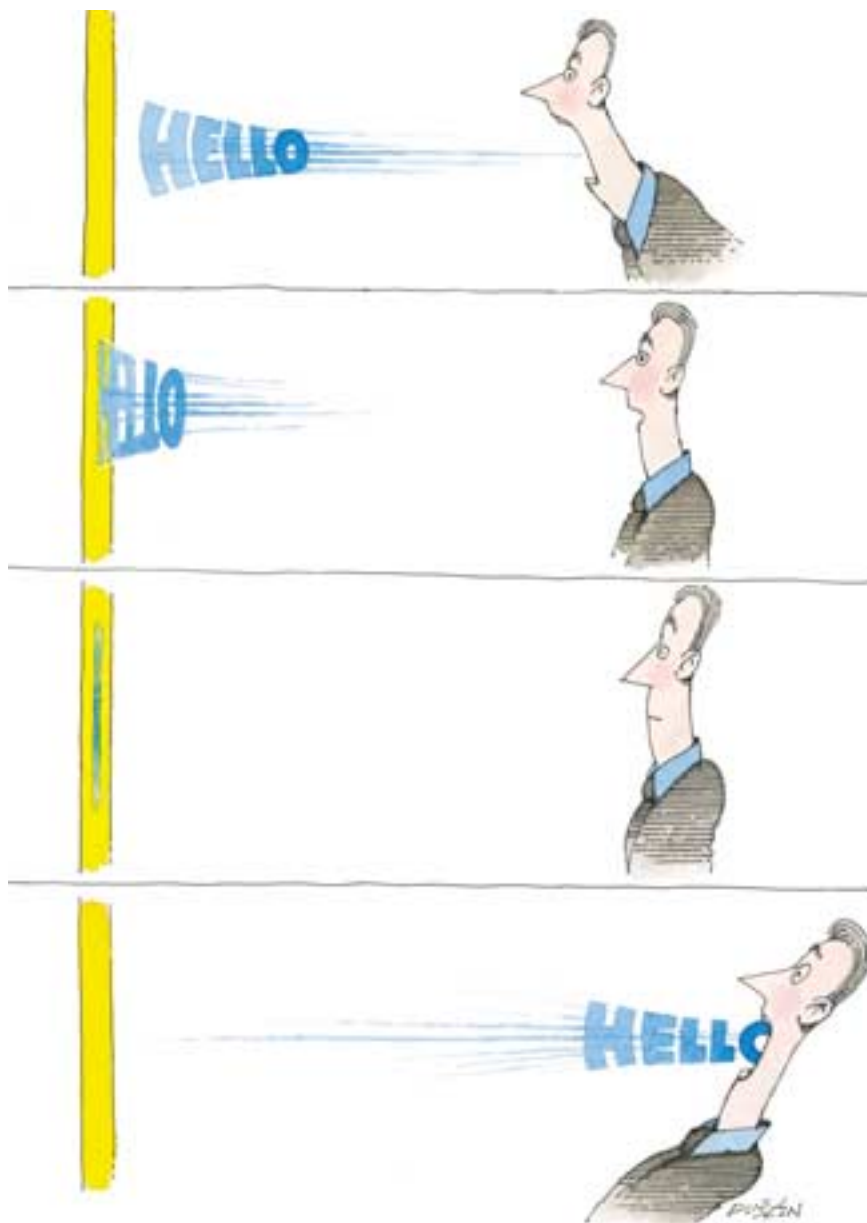


respectives se superposent, et elles s'annulent si les sommets de l'une correspondent aux creux de l'autre. Ce phénomène de superposition ou d'interférence a lieu partout où se croisent différentes ondes sonores. Dans les salles de concert, par exemple, les architectes doivent prendre garde à ces interférences : comme les murs et autres surfaces solides réfléchissent le son sous forme d'échos qui peuvent interférer, seule une conception bien faite évite que le son qui arrive dans la salle ne soit dégradé.

Le retournement des ondes acoustiques est également fondé sur la réversibilité des mécanismes qui sous-tendent la physique des ondes. Quand on projette un film qui décrit la propagation d'ondes à l'envers, les ondes obtenues obéissent encore aux équations de la physique des ondes. Cette propriété de réversibilité est partagée par les lois de la mécanique, qui décrivent le comportement élastique des boules de billard, par exemple. Toutefois, sauf dans quelques cas simples, on n'observe jamais le «retournement temporel» de la trajectoire d'une boule de billard. Cette impossibilité résulte du phénomène de chaos déterministe : une modification minime de la position ou de la vitesse initiales d'une boule modifie considérablement sa position finale.

Imaginons que l'on tire une boule dans une sorte de flipper comportant une centaine d'obstacles fixes, arrangés au hasard. Même dans des simulations sur ordinateur, la trajectoire de la boule n'est pas réversible. Lorsque, après avoir laissé la boule effectuer plusieurs dizaines de collisions, on l'arrête et on la renvoie en marche arrière en inversant sa vitesse, la boule ne parvient pas à refaire le trajet jusqu'à son point de départ : après une dizaine de collisions environ, elle rate un obstacle qu'elle aurait dû heurter, et la suite du parcours est modifiée. Dans une simulation des lois de la mécanique, le moindre arrondi dans les calculs fait échouer le retournement temporel ; or les ordinateurs tronquent toujours les nombres qu'ils manipulent. De la même façon, dans les expériences réelles, on ne parvient jamais à renvoyer la boule en sens inverse, exactement dans la bonne direction et avec la bonne vitesse.

Par opposition, la propagation des ondes est régie par des lois



Dusan Petric

linéaires : une petite perturbation de l'onde initiale modifie peu l'onde finale. Ainsi, malgré les inévitables imprécisions de mesure, si l'on enregistre l'onde finale et si on la renvoie en sens inverse, on obtient une onde qui se déplace en sens inverse de l'onde initiale, semblable à celle-ci, à des imperfections mineures près.

Des miroirs qui retournent le temps

Nos miroirs acoustiques à retournement temporel enregistrent le son «allô» qui arrive de la bouche des visiteurs. Chaque microphone qui compose ces miroirs mesure le son du «allô» qui provient de la bouche du visiteur à travers tous les obstacles de la salle, et tous ces signaux sont enre-

gistrés dans des mémoires électroniques. Lorsque la dernière composante du «allô» a été enregistrée, on passe à la phase de retournement temporel, qui consiste à relire l'ensemble des mémoires électroniques «en verlan». Plus exactement, on inverse la chronologie des signaux reçus par chaque microphone (et non la succession des syllabes). Les signaux arrivés les derniers sont relus en premier, et *vice versa*. Tous les microphones passent alors, de façon synchrone, en mode haut-parleur et sont alimentés par les signaux inversés stockés dans les mémoires électroniques. Ce qui sort du réseau de haut-parleurs est maintenant une onde sonore qui parcourt toutes les étapes de sa vie passée et qui se propage au travers de la pièce, sur les mêmes trajectoires

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'analogue 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 de 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