

centaines de kilomètres ou encore la propagation d'ondes électromagnétiques centimétriques sur plusieurs kilomètres. Cela est rendu possible par le fait qu'un miroir à retournement temporel apparaît, dans un environnement complexe, beaucoup plus grand qu'il ne l'est en réalité. Ce n'est pas la taille du miroir qui fixe la résolution spatiale, mais les propriétés du milieu où se propagent les ondes.

Un milieu dispersif plus efficace qu'un milieu homogène

De nombreuses expériences ont confirmé ce résultat surprenant. Une première expérience, réalisée en 1994 dans notre laboratoire avec Arnaud Derode, illustre ce concept. Pour ce faire, nous avons immergé un miroir à retournement temporel formé de 96 transducteurs dans une cuve d'eau. Nous avons modifié les propriétés du milieu en y plaçant un réseau aléatoire de 2 000 tiges métalliques qui diffusent les ondes ultrasonores émises par la source.

Dans le cas d'un signal initial bref (une microseconde), le signal observé à la sortie du milieu diffuseur a une allure totalement aléatoire et s'étale sur une durée de l'ordre de 200 microsecondes. Pourtant, après renversement du temps, on constate que le signal ultrasonore, qui s'est propagé en sens inverse à travers l'ensemble des tiges, retrouve sa durée initiale à la source et refocalise sur une tache focale qui ne dépend pas de la taille du miroir (voir l'encadré page 33).

Plus étonnant encore, on peut réduire le nombre d'éléments du miroir en passant de 96 éléments à un unique élément, formant ainsi un miroir à retournement temporel quasi ponctuel. La tache focale conserve la même dimension, mais présente davantage de pics d'intensité parasites de part et d'autre du pic d'intensité maximale.

Comment se fait-il alors que le signal ultrasonore quasi aléatoire émis par un unique transducteur à retournement temporel refocalise à travers un milieu diffusant, alors que ce serait impossible si l'expérience avait été faite non plus avec un signal bref à large spectre, mais avec un signal sinusoïdal (une longueur d'onde unique)? Renverser le sens du temps revient pour une onde sinusoïdale (décrite par son amplitude et sa phase) à renvoyer cette onde en remplaçant sa phase Φ par son opposé, $-\Phi$.

✓ BIBLIOGRAPHIE

F. Lemoult et al., **Acoustic resonators for far-field control of sound on a subwavelength scale**, *Physical Review Letters*, vol. 107, article 064301, 2011.

G. Lerosey et al., **Focusing beyond the diffraction limit with far-field time reversal**, *Science*, vol. 315, pp. 1 120-1 122, 2007.

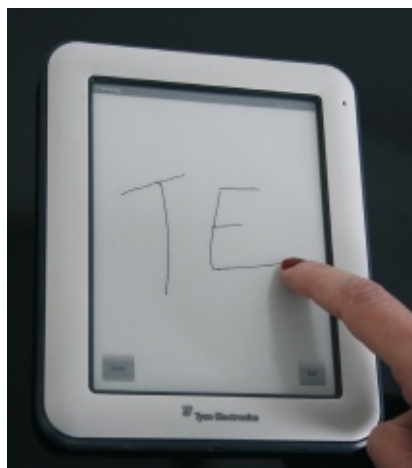
R. K. Ing et al., **In solid localization of finger impacts using acoustic time-reversal process**, *Applied Physics Letters*, vol. 87[20], Article 204104, 2005.

M. Fink et al., **Time reversal acoustics in biomedical engineering**, *Annual Review of Biomedical Engineering*, vol. 5, pp. 465-497, 2003.

G. F. Edelmann et al., **An initial demonstration of underwater acoustic communication using time reversal**, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 27, pp. 602-609, 2002.

M. Fink et al., **Time-reversed acoustics**, *Reports on Progress in Physics*, vol. 63, n° 12, pp. 1 933-1 995, 2000.

A. Derode et al., **Robust acoustic time reversal with high order multiple scattering**, *Physical Review Letters*, vol. 75, n° 23, pp. 4 206-4 209, 1995.



2. N'IMPORTE QUEL SUPPORT, y compris un support en bois, peut, grâce au retournement temporel, devenir une tablette tactile. L'impact d'un doigt sur une tablette ou le bruit qu'il fait en se déplaçant sur la surface produit une onde élastique qui se réverbère dans l'objet et qui est captée par un transducteur. Ce signal est comparé à une banque de signaux préalablement mémorisés. On reconstruit ainsi, « pixel » par « pixel », la trajectoire du doigt ou sa position sur la tablette.

Or, quelle que soit sa phase, une onde sinusoïdale (monochromatique) émise par une source de très petite taille (une onde sphérique divergente) ne focalise jamais en traversant un milieu diffusant.

Au contraire, elle donne lieu, après la traversée d'un tel milieu, à un champ dont l'intensité, dans le plan d'observation, a un profil aléatoire, caractérisé par des figures de tavelures, c'est-à-dire des taches réparties au hasard. La taille des taches de tavelures dépend de la longueur d'onde et de la taille du milieu diffusant. Ce sont les analogues des franges qui résultent de l'interférence de deux ondes planes, mais ici il s'agit de l'interférence de très nombreuses ondes de phase et d'amplitude quelconques. Ainsi, une antenne unique à retournement temporel ne permet pas de refocaliser une onde monochromatique : pour focaliser des ondes monochromatiques, il faut de nombreuses antennes et donc un grand miroir à retournement temporel.

Pourquoi avec un signal à large spectre, une unique antenne suffit-elle ? Quand on utilise un rayonnement initial très bref qui se propage à travers un milieu diffusant, le signal capté par l'antenne dure longtemps et son spectre est large. Dans l'opération de retournement temporel, bien qu'aucune des composantes spectrales ne refocalise à la source, elles y arrivent toutes en phase. Dès lors, au point source, toutes les sinusoïdes de fréquences différentes et d'amplitudes quelconques ont la même phase, ce qui donne un signal très intense à un instant particulier : c'est le temps focal.

En revanche, pour les points situés en dehors de la source (à partir de la tache de tavelure la plus proche), les composantes spectrales arrivent avec des phases suffisamment différentes pour que leur superposition donne des signaux faibles. Le rapport entre l'amplitude au point focal et celle dans la tache de tavelure la plus proche caractérise l'efficacité de ce processus de focalisation.

Il dépend du nombre de figures de tavelures indépendantes (elles ne se ressemblent pas, et sont qualifiées de décorrélées) présentes dans le spectre émis par la source. Dans notre expérience, il y a 200 figures de tavelures indépendantes correspondant à des fréquences différentes. On dit que le signal temporel capté par une antenne contient 200 degrés de liberté fréquentiels.

Cela revient à dire que cette unique antenne à 200 degrés de liberté fréquentiels est capable de focaliser un signal à large spectre avec la même qualité que 200 antennes réparties dans l'espace qui fonctionneraient avec une unique fréquence (monochromatique).

Ainsi, une seule antenne exploitant une large diversité de fréquences, et donc beaucoup de degrés de liberté fréquentiels, est suffisante pour focaliser un rayonnement ayant traversé un milieu diffusant. À chaque point de l'espace correspond un signal temporel unique. Une fois connu l'ensemble des signaux correspondant à tous les points d'une zone, on peut soit focaliser sur chacun des points, soit utiliser cette banque de signaux pour localiser des sources quelconques ou pour faire l'image d'une source complexe à partir du signal enregistré par une unique antenne.

Cavités et autres pièges

Le succès des techniques de retournement temporel vient du fait qu'il existe de nombreuses situations dans la vie courante où l'on observe le même type d'effet que dans les milieux diffusants. C'est le cas chaque fois qu'une onde se propage dans un milieu entouré de parois réfléchissantes. On est alors dans une situation analogue à celle qui se produit dans un kaléidoscope, où un petit objet semble se répéter de façon périodique selon certaines directions. De même, pour un observateur situé au sein d'une cavité réfléchissante ou à l'intérieur des parois d'un guide d'ondes, chaque transducteur

d'un petit miroir à retournement temporel apparaît comme accompagné d'une multitude de transducteurs virtuels créés par les parois réfléchissantes. On a ainsi l'impression d'avoir un grand miroir à retournement temporel formé de beaucoup de transducteurs.

En 2002, William Kuperman et ses collègues de l'Institut américain de recherche SCRIPPS ont observé cet effet spectaculaire en mer. Ils ont conçu un miroir acoustique à retournement temporel de 98 mètres de longueur, formé de 29 transducteurs fonctionnant autour d'une fréquence centrale de trois kilohertz (soit à une longueur d'onde de 50 centimètres). Ils l'ont immergé au large de l'île d'Elbe dans une zone où la profondeur est de l'ordre d'une centaine de mètres. En modulant le signal envoyé par le miroir à retournement temporel, ils ont focalisé un message sonore à dix kilomètres de distance qui n'était capté que par un plongeur situé à l'emplacement de la tache focale ! Cette technique a donné lieu à de nombreux développements dans le domaine des communications sous-marines et, récemment, une équipe japonaise a réalisé des communications sur plus de 1 000 kilomètres par retournement temporel.

Peut-on conserver une bonne focalisation en réduisant les 29 transducteurs du miroir à retournement temporel à un unique transducteur ? Pas si l'on reste dans la mer, qui se comporte comme un guide d'ondes acoustiques dans lequel les ondes sont réverbérées entre le fond de la mer et la surface de l'eau, mais peuvent « fuir » latéralement. En effet, un guide d'ondes

présente peu de degrés de liberté fréquentiels. La solution consiste à travailler avec une cavité fermée, où les ondes sont piégées. On sait qu'un champ ondulatoire enfermé dans une cavité peut toujours s'écrire comme la superposition d'un certain nombre de « modes de vibration » dont les fréquences sont parfaitement définies. Pour chaque mode, tous les points du milieu vibrent avec la même fréquence temporelle, mais avec des phases et des amplitudes différentes.

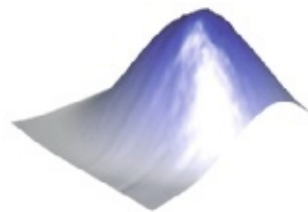
Certains points vibrent avec une certaine phase, d'autres en opposition de phase. Les points situés aux nœuds des modes ne vibrent pas du tout, alors que ceux situés aux ventres vibrent beaucoup. À chaque mode est associée une figure de vibration et la distance la plus petite entre un nœud et un ventre est égale à la demi-longueur d'onde des ondes acoustiques vibrant à la fréquence du mode. Par ailleurs, deux modes de fréquences différentes ont des figures d'oscillations indépendantes, qui sont les analogues de deux figures de tavelures décorrelées.

Si une source unique, située dans une cavité au point A, émet une impulsion brève à large spectre, elle peut exciter de nombreux modes de cette cavité, et un simple transducteur situé en un point quelconque B de la cavité peut servir de miroir à retournement temporel. Au point B, le transducteur mesure un signal, superposition de tous les modes produits par le point A, qui s'étale sur un temps très grand. Après retournement temporel, le signal est réémis dans la cavité et refocalise au point A. La refocalisation spatio-temporelle sera d'autant plus



3. UN « CRISTAL » DE 49 CANETTES DE SODA peut osciller suivant 49 modes de vibration différents dont les fréquences s'étalent entre 340 et 420 hertz, alors qu'une canette isolée oscille à 420 hertz. Quand l'une des canettes reçoit un signal acoustique de quelques millisecondes, tous les modes du cristal sont excités et des transducteurs éloignés reçoivent la superposition de ces modes. Après retournement temporel, le signal se concentre sur l'unique canette où était située la source. La résolution atteint $\lambda/25$.

Tache focale sans les canettes



Tache focale avec les canettes

