

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.

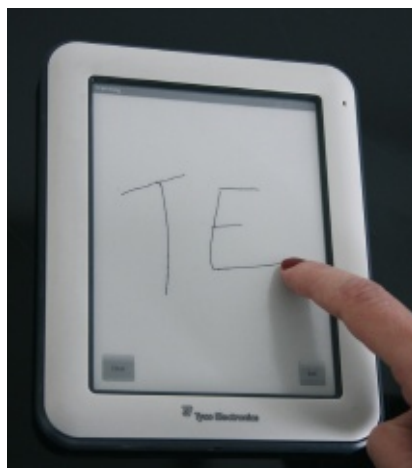
R. K. Ing et al., In solid localization of finger impacts using acoustic time-reversal process, *Applied Physics Letters*, vol. 87(20), Article 204104, 2005.

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 décorrelées) 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.