

L'AUTEUR



Mathias FINK est professeur de physique à l'École supérieure de physique et de chimie industrielles de la ville de Paris (ESPCI-ParisTech). Il y dirige l'Institut Langevin-Ondes et images.

sur une zone dont la taille est égale à $\lambda/2$, pour une longueur d'onde λ . Ainsi, au lieu de restituer exactement l'image de la source ponctuelle, il se crée une tache dite focale : c'est cette limite de diffraction qui interdit de reconstruire des images parfaites des objets sources (*voir* Lumière sur l'infiniment petit, *page 50*).

Plus intéressant encore, à cette focalisation spatiale s'ajoute une refocalisation temporelle dans le cas où la source a émis un signal bref à large spectre (qui résulte de la superposition de nombreuses sinusoïdes de longueurs d'onde différentes) dans un milieu dispersif : malgré la dispersion du milieu, l'onde retournée temporellement retrouve exactement sa durée initiale, à l'endroit où était située sa source ! On obtient ainsi une compression spatio-temporelle d'énergie au point source.

De surprise en surprise

Dans le schéma envisagé jusqu'à présent, la source était totalement entourée d'antennes, ce qui n'était pas très réaliste. Il fallait de très nombreux transducteurs disposés dans toutes les directions de l'espace en regard de la source. En pratique, on se restreint à des miroirs à retournement temporel qui n'ont qu'une ouverture angulaire limitée (donnée par le rapport entre la taille du miroir et sa distance à la source). En testant de tels miroirs dans le domaine ultrasonore, nous n'imaginions pas qu'une excellente surprise nous attendait. Nous avons constaté que, pour des signaux brefs à spectre large, le nombre de transducteurs nécessaires pour refocaliser efficacement une onde diminue quand le milieu où les ondes se propagent est complexe. Autrement dit, bien qu'elles subissent des diffusions multiples dues aux obstacles ou des réverbérations contre les parois, le nombre de transducteurs nécessaires au retournement temporel diminue au point que, dans bien des cas..., un seul transducteur suffit !

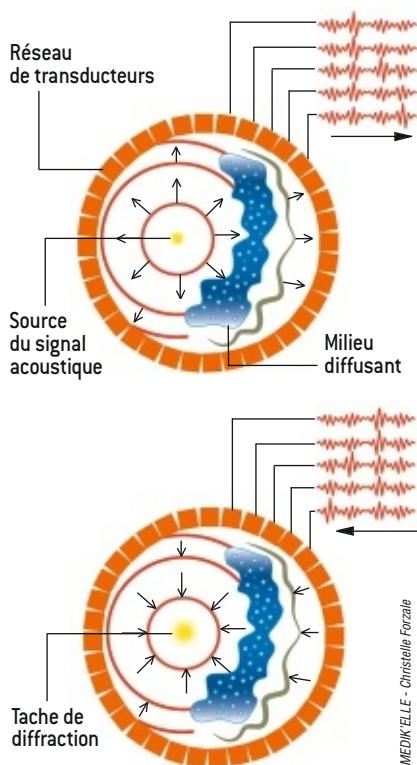
Dans ces conditions, bien que le miroir à retournement temporel soit très petit, il est capable de réaliser des taches focales dont la dimension est toujours de l'ordre de la demi-longueur d'onde. Cet effet a été observé dans les scénarios les plus divers : la propagation d'ultrasons de longueur d'onde millimétrique sur des distances de plusieurs mètres, la propagation d'ondes sonores en mer sur plusieurs

Pour étudier la propagation d'un paquet d'ondes ultrasonores à travers un milieu diffusant de structure aléatoire, nous avons immergé un petit miroir à retournement temporel de 40 millimètres de longueur formé de 96 transducteurs ultrasonores placés dans une cuve remplie d'eau (*a*). Ce miroir fonctionne autour d'une fréquence centrale de trois mégahertz (la longueur d'onde est de l'ordre de 0,5 millimètre). Entre ce miroir et une très petite source d'ultrasons, on introduit un milieu désordonné, de grande largeur, formé de 2 000 tiges de métal qui résonnent autour de trois mégahertz.

Dans la première phase de l'expérience, la source ponctuelle émet un signal ultrasonore très bref, qui dure une microseconde. Ce train d'ondes ultrasonores se propage à travers la forêt des tiges, qui le modifie. La plus grande partie de l'onde initiale se divise en de très nombreuses ondelettes à chaque collision avec les tiges. Le processus peut se répéter de nombreuses fois et, à la sortie du milieu, on obtient un signal ultrasonore très long (200 microsecondes) qui a l'allure d'un bruit aléatoire (*b*). Les 96 transducteurs enregistrent ces signaux dont la durée est de l'ordre de 200 microsecondes.

Après renversement du temps dans les mémoires électroniques, les 96 bruits acoustiques sont réémis dans le milieu. On observe alors le signal ultrasonore qui se propage à travers l'ensemble des tiges, et on constate qu'à l'emplacement de la source initiale, le signal ultrasonore dure maintenant une microseconde, c'est-à-dire qu'il a exactement retrouvé sa durée initiale (*c*).

Par ailleurs, la taille de la tache focale obtenue à travers le milieu diffusant, ici la forêt de tiges, est beaucoup plus petite que celle observée dans une expérience de retournement qui serait effectuée en milieu homogène, de l'eau uniquement. Dans l'expérience effectuée en milieu homogène, on retrouve le résultat classique : la taille de la tache focale dépend de l'ouverture angulaire (la tangente de l'angle sous lequel le miroir est vu du point focal). En présence du milieu diffusant, c'est maintenant, après retournement



MEDIK'ELLE - Christelle Forzale

1. LE SIGNAL SONORE émis par la source est capté par les transducteurs qui entourent la source, et mémorisé (*en haut*). Puis tous ces signaux sont réémis dans une chronologie inversée et l'onde ainsi créée se refocalise sur la source initiale (*en bas*). Cependant, cette onde parfaitement convergente ne s'arrête pas au point source et donne lieu à une nouvelle onde divergente, ce qui entraîne l'apparition d'une tache de diffraction autour de la source.



LE RETOURNEMENT TEMPOREL DES ULTRASONS EN MILIEU DIFFUSANT

temporel, l'ensemble des tiges du milieu qui devient la source d'un rayonnement cohérent focalisant sur le point initial : c'est donc cette nouvelle ouverture angulaire qui fixe la taille de la tache focale et non plus la taille du miroir. Pour la géométrie de notre expérience, la résolution est améliorée d'un fac-

teur 35 quand on passe de l'eau à notre forêt de tiges métalliques, parce que l'ouverture angulaire est 35 fois plus grande. Enfin, pour des impulsions ultrabrèves, un seul transducteur suffit pour obtenir une tache focale de même dimension.

Au contraire, quand l'expérience est réalisée avec une onde

monochromatique et un seul transducteur (*d*), on constate que l'onde ne refocalise pas après retournement temporel (*e*). Une onde rouge, par exemple, donne ce que l'on nomme une figure de tavelures (*sur l'écran rouge*).

Dans le cas d'un signal bref constitué de plusieurs longueurs

d'onde (*ici rouge, verte et bleue*), on observe de multiples figures de tavelures différentes (*f*). Les composantes spectrales ne refocalisent pas au point source, mais elles sont en phase en ce point, et en ce point seulement (*g*), de sorte que le signal y est très intense à un instant particulier, le temps focal.

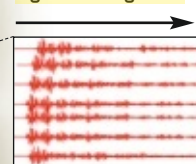
Signal source bref



Milieu diffusant

Miroir à retournement temporel

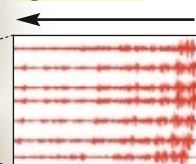
Signaux enregistrés



Signal refocalisé



Signaux réémis



Forme de la tache focale

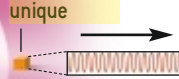


Milieu homogène

Milieu hétérogène

En milieu homogène, l'ouverture angulaire est donnée par le rapport entre la taille du miroir et la distance à la source [1]. Avec un milieu hétérogène, elle est donnée par le rapport entre la taille du milieu et sa distance à la source [2].

Transducteur unique



Avec une onde monochromatique et un transducteur unique (*d*), le renversement temporel ne fait pas refocaliser l'onde au point source (*e*). Le profil d'intensité est aléatoire et donne des taches nommées tavelures. Avec un signal bref à large spectre (*f et g*), dont on n'a représenté que trois composantes, on obtient plusieurs figures de tavelures. Au point focal (*en jaune*), toutes les ondes sont en phase, et l'amplitude est maximale. Ailleurs, le signal est faible.

d

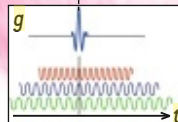
e

f

g

Figure de tavelures

Multiples figures de tavelures



MEDIKELLE - Christelle Forzale

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.

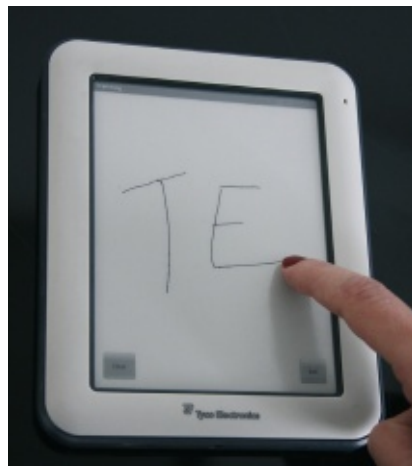
R. K. Ing et al., **In solid localization of finger impacts using acoustic time-reversal process**, *Applied Physics Letters*, vol. 87[20], Article 204104, 2005.

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.