



Physique

La complexité : un atout pour le retournement temporel des ondes

Mathias Fink

Dans certaines conditions, les ondes peuvent remonter le cours de leur vie et se focaliser précisément à l'endroit d'où elles ont été émises. C'est le principe du retournement temporel qui trouve sans cesse de nouvelles applications. La découverte la plus surprenante est que cette focalisation est d'autant plus efficace que le milieu traversé est complexe.

Contrôler les ondes, c'est-à-dire manipuler leur évolution temporelle et spatiale dans un environnement complexe trouve des applications dans des domaines aussi variés que la médecine, les télécommunications, la sismologie, la domotique, l'aviation, etc. Les premières techniques de contrôle des ondes ont été mises au point en optique : c'est le domaine de l'optique adaptative utilisée pour améliorer la qualité des images des étoiles qui arrivent sur Terre dégradées par la turbulence de l'atmosphère ou pour focaliser des faisceaux de lumière très intense à travers l'atmosphère. En utilisant des miroirs déformables, on parvient à gommer ces perturbations et à optimiser la focalisation et la qualité des images.

Curieusement, la complexité des milieux où se propagent les ondes n'est pas forcément un obstacle. Au contraire, nous allons examiner comment, dans certains milieux de propagation complexes, la qualité de la focalisation des ondes peut devenir bien meilleure que dans les milieux simples. C'est le cas des ondes focalisées par retournement temporel, c'est-à-dire ayant subi une opération après laquelle elles reviennent à leur point de départ, comme si l'on passait le film de leur pro-

pagation à l'envers. C'est le domaine des miroirs à retournement temporel, qui permettent de faire revivre à une onde toutes les étapes de sa vie passée.

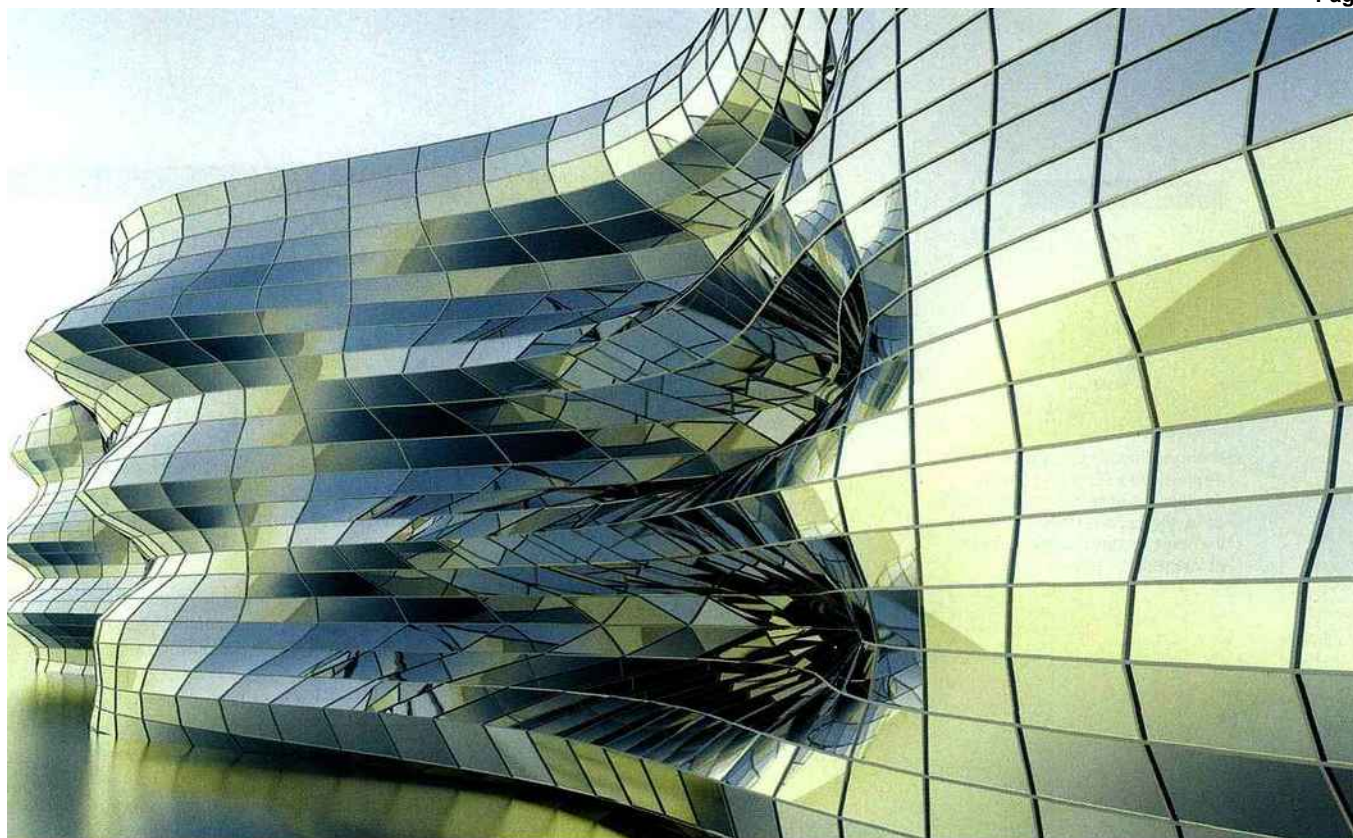
Nous nous intéresserons à des milieux de propagation tellement complexes qu'une impulsion ondulatoire est déformée au cours de sa propagation au point que le signal reçu par un récepteur lointain ne ressemble en rien au signal émis par la source; on qualifie ces milieux de dispersifs. On est confronté à ce type de difficultés, par exemple, quand un téléphone portable émet une impulsion électromagnétique très brève. Cette dernière est perçue dix rues plus loin comme un train d'impulsions correspondant à une superposition de nombreuses impulsions élémentaires provenant des multiples chemins parcourus par le signal entre la source et le récepteur : l'onde s'est réfléchi sur de nombreux obstacles, donnant naissance à autant de signaux secondaires.

C'est le cas pour les ondes acoustiques subissant des réverbérations, mais aussi pour les ondes lumineuses, notamment pour des impulsions de lumière ultrabrèves qui se propagent dans un milieu diffusant (diffusant pour les physiciens de l'optique et diffuseur pour les acousticiens), tel le corps humain.

Comment parvient-on à traiter de tels signaux ? Après avoir rappelé le principe du retournement temporel, nous examinerons en quoi un milieu diffusant peut se révéler être un atout et nous évoquerons quelques-unes des applications possibles de ce phénomène.

Remonter le temps

Comment fonctionnent les miroirs à retournement temporel ? C'est d'abord en acoustique (sonore et ultrasonore) que ces techniques de manipulation d'ondes ont été mises au point dans les années 1990, car les faibles fréquences d'oscillation de ces ondes (de quelques kilohertz à quelques mégahertz) étaient alors compatibles avec la vitesse de stockage des informations dans les mémoires électroniques disponibles. Puis ces composants électroniques sont devenus si rapides que l'on a pu appliquer ces méthodes aux micro-ondes électromagnétiques utilisées dans les télécommunications et aux ondes radars (atteignant le domaine des gigahertz). Enfin, récemment, la possibilité de mesurer et de contrôler la modulation temporelle et spatiale d'ondes optiques a permis de réaliser les premières expériences de contrôle de la lumière à travers des milieux diffusants.



Ces dispositifs exploitent tous le fait que la propagation des ondes dans un milieu non dissipatif est un processus réversible. Une onde rayonnée par une source subit de nombreuses distorsions au cours de sa propagation dans un milieu complexe, dues aux phénomènes de réfraction, de diffusion multiple ou encore de réverbération. Toutefois, quelles que soient ces distorsions, il existe toujours – du moins en théorie – une onde duale capable de parcourir en sens inverse tous les chemins complexes suivis par l'onde incidente, et qui converge exactement à la source.

Or un miroir à retournement temporel constitué d'un réseau d'antennes réversibles (alternativement réceptrices et émettrices) entourant complètement la source est capable de créer physiquement cette onde duale. Pour ce faire, à chaque antenne est associé un dispositif qui transforme un signal (qu'il s'agisse d'une onde lumineuse ou d'une onde acoustique) en signaux numériques, lesquels sont traités dans des mémoires numériques pour réaliser l'opération de retournement temporel. Par exemple, en acoustique, un miroir à retournement temporel idéal est une surface fermée tapissée de composants piézo-électriques qui jouent alternative-

ment le rôle de microphones et celui de haut-parleurs (voir la figure 1). Les signaux émis par la source sont enregistrés, puis, durant l'étape de retournement temporel, tous ces signaux mémorisés sont « relus » en inversant la chronologie des signaux reçus par chaque microphone : les derniers arrivés sont les premiers relus, et *vice versa*. Pendant la seconde étape, tous les microphones passent, de façon synchrone, en mode haut-parleur, et sont alimentés par les signaux « retournés temporellement » provenant des mémoires électroniques. Notons que la même opération peut être réalisée avec des ondes électromagnétiques en remplaçant les transducteurs piézo-électriques par des antennes, telles celles utilisées par exemple en téléphonie mobile.

On réalise ainsi de nouvelles conditions initiales de rayonnement, et du fait de la réversibilité, l'onde ainsi rayonnée revient à son point de départ. Toutefois, si l'onde réémise par le miroir à retournement temporel converge parfaitement à l'endroit de la source initiale, elle ne s'y arrête pas, et elle repart nécessairement en sens inverse sous forme d'une onde divergente. Si l'onde utilisée dans l'expérience est sinusoïdale, on observe alors qu'autour du point source se crée une interférence constructive entre ces deux ondes

L'ESSENTIEL

✓ Les ondes émises par une source ponctuelle peuvent subir un retournement temporel, une opération qui leur fait revivre à l'envers le film de leur vie.

✓ Cette opération nécessite normalement de nombreuses antennes, qui sont alternativement réceptrices ou émettrices. Dans certains cas, un seul de ces éléments suffit.

✓ De surcroît, l'opération est d'autant plus efficace que le milieu où se propagent les ondes est complexe.

✓ Les applications possibles du retournement temporel se développent, par exemple dans les télécommunications.

✓ En milieu complexe, la précision (ou limite de résolution) est bien meilleure que celle autorisée par d'autres méthodes.

© Shutterstock/Uny BFMissap

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 !

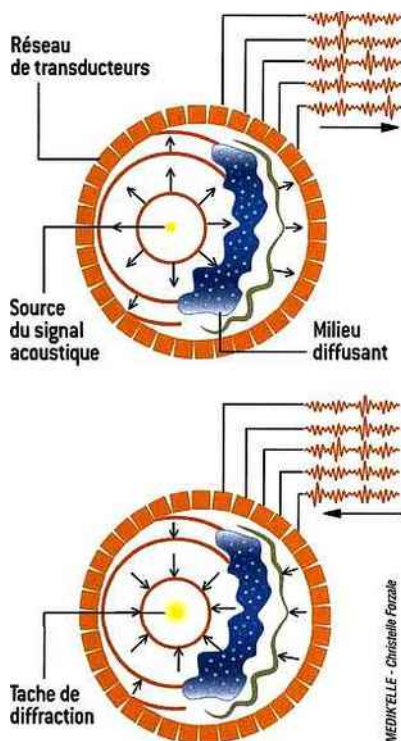
Dans ces conditions, bien que le miroir à retournement temporel soit très petit, il est capable de réaliser des taches focales dont la dimension est toujours de l'ordre de la demi-longueur d'onde. Cet effet a été observé dans les scénarios les plus divers : la propagation d'ultrasons de longueur d'onde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

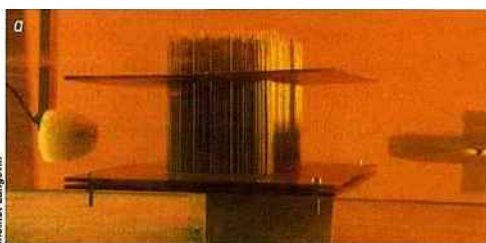
Dans la première phase de l'expérience, la source ponctuelle émet un signal ultrasonore très bref, qui dure une microseconde. Ce train d'ondes ultrasonores se propage à travers la forêt des tiges, qui le modifie. La plus grande partie de l'onde initiale se divise en de très nombreuses ondelettes à chaque 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



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-

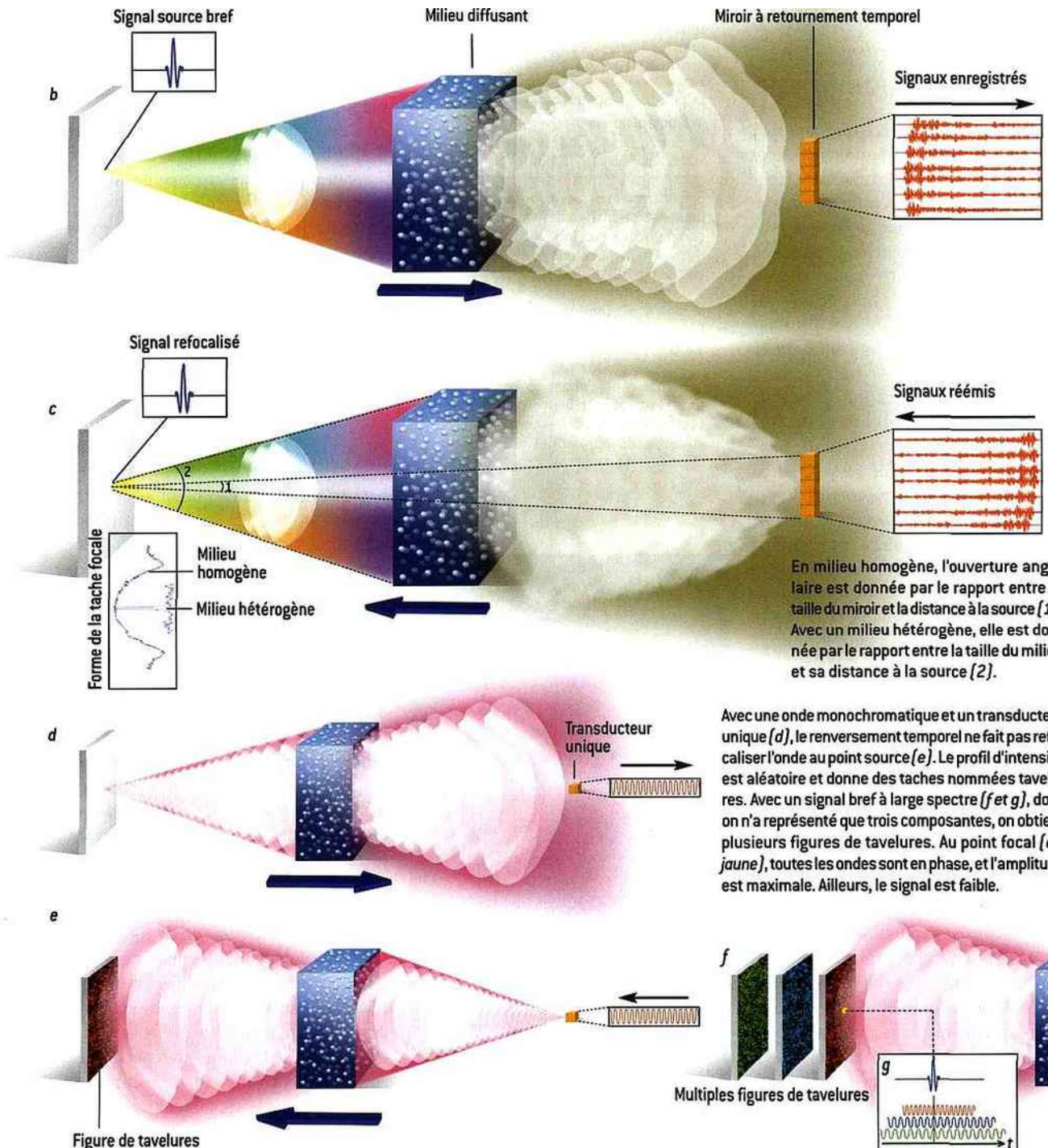
teur 35 quand on passe de l'eau à notre forêt de tiges métalliques, parce que l'ouverture angulaire est 35 fois plus grande. Enfin, pour des impulsions ultrabrèves, un seul transducteur suffit pour obtenir une tache focale de même dimension.

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.



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].

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.

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 2000 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.

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.

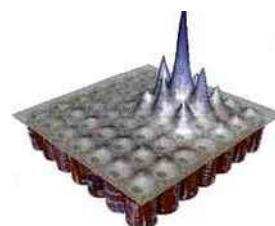
Si une source unique, située dans une cavité au point A, émet une impulsion brève à large spectre, elle peut exciter de nombreux modes de cette cavité, et un simple transducteur situé en un point quelconque B de la cavité peut servir de miroir à retournement temporel. Au point B, le transducteur mesure 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



Tache focale sans les canettes



Tache focale avec les canettes



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 $\lambda/25$.

efficace que le nombre de modes excités par la source est grand. Quant à la dimension de la tache focale, elle est de l'ordre de la plus petite distance qui sépare un nœud d'un ventre des différents modes, c'est-à-dire de la demi-longueur d'onde des fréquences les plus élevées du spectre.

Une application de cette expérience touche la domotique : elle permet de transformer un objet solide quelconque (une table, une porte, un vase, un mur, etc.) en un clavier intelligent. Imaginons l'impact d'un doigt sur la surface d'un objet, qui, s'il n'est pas trop grand, se comporte comme une cavité. Il produit une onde élastique qui pénètre dans l'objet et s'y réverbère. L'enregistrement de cette signature sonore, sur un temps long, par un unique transducteur, contient toute l'information pour localiser la source de l'impact. Comme on l'a évoqué, un retournement temporel refocaliserait ce signal sur sa source. Pour réaliser un clavier tactile, on divise la surface de l'objet en points d'impact élémentaires dont on enregistre, dans une phase d'apprentissage, les signatures temporelles acoustiques. Puis, quand on tape à un endroit de l'objet, on compare la signature de cet impact à la banque des signatures mémorisées.

Cela revient à réaliser mathématiquement, dans l'ordinateur, l'opération de retournement temporel, et permet d'obtenir des objets tactiles très pratiques. Non seulement on peut réaliser des claviers à touches virtuelles, mais la technique est aussi applicable quand un doigt se déplace sur une surface. Le doigt crée, en glissant, un bruit de frottement qui permet de

suivre sa trajectoire : le doigt devient ainsi une souris d'ordinateur. Une jeune entreprise, *Sensitive Object*, créée par Ros Kiri Ing, un des chercheurs de notre laboratoire, a connu un grand succès et a été récemment rachetée par une grande société américaine, *Tyco-Electronics*, et développe de telles tablettes tactiles.

Des résonateurs couplés pour la super-résolution

Les exemples précédents montrent qu'un milieu diffusant ou des parois réfléchissantes permettent à une petite antenne de se transformer en une lentille spatio-temporelle capable de focaliser pendant un temps bref des signaux sur une dimension de l'ordre de la longueur d'onde. Est-il possible d'utiliser le même principe pour descendre au-dessous de la longueur d'onde ? On peut effectivement y parvenir, mais, pour ce faire, il ne faut pas que la source sur laquelle on veut focaliser le faisceau soit située dans un milieu homogène : c'est la source elle-même qui est placée dans un milieu hétérogène.

Ce milieu qui entoure la source doit créer un spectre de modes dont les échelles d'oscillations spatiales sont bien inférieures aux longueurs d'onde utilisées. Pour obtenir un tel résultat, il faut un milieu formé d'une collection de petits résonateurs fortement couplés entre eux. Ces résonateurs doivent avoir des dimensions beaucoup plus petites que la longueur des ondes qui les mettent en résonance. On

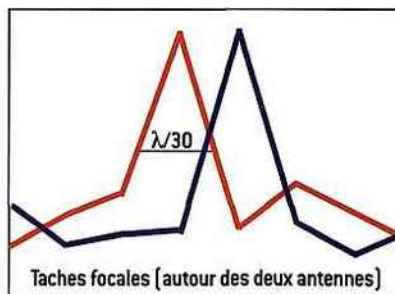
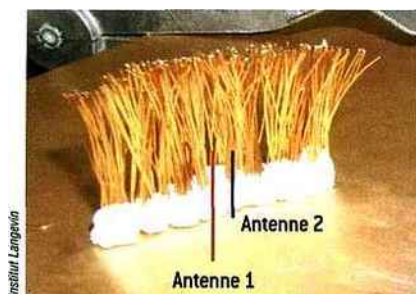
parle de résonateurs sublongueur d'onde qui, du fait de leur petite dimension, peuvent être disposés en nombre dans une zone petite comparée à la longueur d'onde. Ils sont répartis soit de façon désordonnée soit de façon périodique.

On réalise alors une structure (une sorte de métamatériau) qui ressemble à une grosse molécule formée d'atomes identiques couplés entre eux ou à un petit morceau de cristal. On sait qu'un atome se comporte comme un résonateur qu'il excite des photons de fréquences données. La longueur d'onde de ces photons excitateurs est bien supérieure à la taille de l'atome. Lorsqu'on étudie une molécule formée de plusieurs atomes couplés, on observe un spectre de modes de résonance plus riche que celui d'un atome particulier et, à chaque fréquence, correspond une structure spatiale spécifique d'oscillation des atomes (un mode de vibration des atomes).

L'échelle spatiale des oscillations de ces modes peut être aussi petite que la distance entre deux atomes voisins, qui, ici, est bien inférieure à la longueur d'onde. Dès lors, on comprend qu'une antenne à large bande (utilisée pour le retournement temporel) capable d'exciter de nombreux modes sublongueur puisse créer des concentrations de lumière ou d'énergie mécanique sur des taches focales dont la taille sera inférieure à la longueur d'onde. Plus le nombre de résonateurs couplés est grand, plus l'effet est spectaculaire.

Nous avons réalisé les premières démonstrations de ce principe dans le domaine des micro-ondes et des ondes acoustiques, avec Geoffroy Lerosey, Julien de Rosny, Fabrice Lemoult et Arnaud Tourin, à l'Institut Langevin. Dans la première expérience, nous nous sommes intéressés à la focalisation d'ondes électromagnétiques du type micro-ondes utilisées en télécommunication dans la bande Wi-Fi. La fréquence centrale d'utilisation est égale 2,4 gigahertz correspondant à une longueur d'onde de 12 centimètres.

La source de rayonnement utilisée est un petit fil de cuivre que l'on insère au sein d'une structure faite de centaines de petits fils de cuivre répartis latéralement de façon aléatoire, mais très proches les uns des autres. Ces fils ont tous la même longueur choisie pour résonner à 2,4 gigahertz. En se couplant entre eux, ils créent un spectre de modes collectifs très riches qui contient de nombreuses fréquences



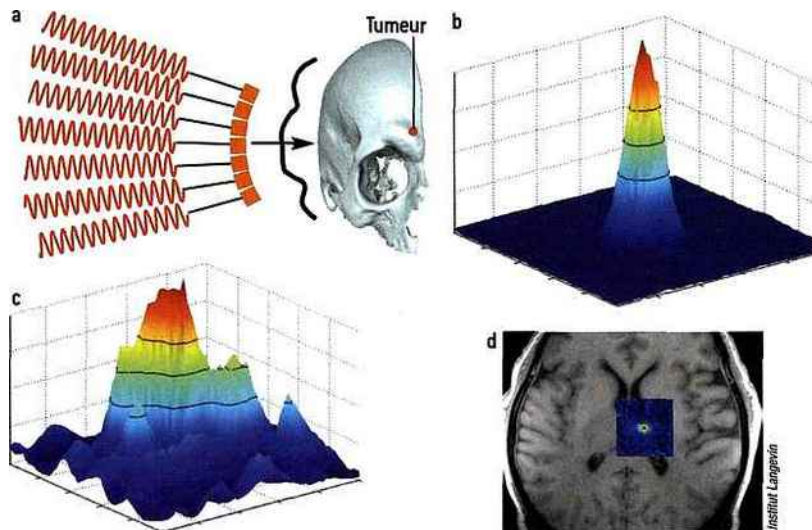
4. DE NOMBREUX PETITS FILS DE CUIVRE (résonateurs électromagnétiques), de même taille, sont répartis de façon aléatoire sur un support. Leur couplage crée un ensemble très riche de modes collectifs d'oscillations. Ces modes sont excités par une impulsion électromagnétique émise par une petite antenne (rouge ou bleue) insérée au cœur de la structure. Une antenne située à grande distance reçoit un signal complexe, la superposition de tous les modes excités. Une opération de retournement temporel et de réémission permet de refocaliser l'onde sur sa source, mais avec une tache focale de taille millimétrique ($\lambda/30$, figure de droite), soit quatre millimètres. Cela signifie qu'une antenne éloignée peut envoyer des messages distincts focalisés sur chacune des deux antennes proches.

s'étalant de quelques centaines de mégahertz à 2,4 gigahertz. Après émission par la source au sein de cette structure d'une impulsion à large spectre durant dix nanosecondes, une antenne située en champ lointain reçoit un signal très long qui résulte de la superposition de tous les modes excités. Un retournement temporel de ce signal électromagnétique suffit à refocaliser à la source, mais la tache focale mesurée a alors une dimension égale à un trentième de la longueur d'onde ($\lambda/30$). Elle résulte de la superposition cohérente de tous les modes sublongueur d'onde régénérés par le retournement temporel et qui oscillent sur des dimensions de l'ordre de la distance entre deux fils, de l'ordre du millimètre.

Disposer de taches focales de dimension millimétrique dans le domaine des télécommunications est intéressant, car, en plaçant plusieurs antennes séparées de quelques millimètres au sein du milieu de résonateurs, on peut envoyer des messages différents focalisés sur chacune des antennes du milieu à partir d'une ou de plusieurs antennes situées en champ lointain. On peut ainsi exploiter la complexité du milieu pour augmenter la quantité d'information reçue dans un volume donné. La Société *Time-Reversal Communications* a été créée pour exploiter ces idées dans le domaine des télécommunications discrètes et sécurisées à très haut débit.

Ce même principe de focalisation sublongueur d'onde s'applique aussi en acoustique. G. Lerosey et F. Lemoult ont choisi de l'illustrer en fabriquant un petit « cristal » constitué de 49 canettes de soda vides (voir la figure 3)! On sait qu'en acoustique on peut fabriquer des résonateurs sublongueur d'onde, dits de Helmholtz. Ces canettes cylindriques trouées sont des résonateurs dont le diamètre est égal à 6,6 centimètres et qui résonnent à 420 hertz, ce qui correspond à une longueur d'onde dans l'air de 80 centimètres.

En fabriquant une « structure cristalline » de sept canettes sur sept, on réalise un milieu qui peut vibrer selon 49 modes d'oscillation différents, dont les fréquences s'étalent de 340 à 420 hertz. En utilisant une émission acoustique brève de dix millisecondes centrée sur 400 hertz et localisée juste au-dessus d'une canette, on observe en champ lointain une onde sonore résultant de la superposition de tous les modes. La refocalisation par retournement temporel est, comme avec



5. POUR « BRÛLER » UNE TUMEUR CÉRÉBRALE, on y focalise des ultrasons intenses. Pour ce faire, on pourrait utiliser un retournement temporel (a), mais cela imposerait d'implanter un émetteur situé à l'endroit de la tumeur. Pour éviter cela, on utilise une méthode virtuelle de retournement temporel. Connaissant l'image tridimensionnelle du crâne, on construit un modèle de propagation d'une onde ultrasonore dans le cerveau et l'on simule une multitude de retournements à partir de n'importe quel point du cerveau. La méthode permet de focaliser les ondes de façon précise (b). Sans corrections des aberrations dues au crâne, l'onde ne focalise pas (c). La méthode, testée sur l'animal, permet d'élever la température des cellules tumorales jusqu'à 65 °C (le point rouge), ce qui les détruit.

des micro-ondes, très efficace et on refocalise l'onde sonore sur une tache focale dont la dimension est de l'ordre de $\lambda/25$.

Les applications des miroirs à retournement temporel se multiplient, entre autres dans le domaine médical, dans le traitement de certaines tumeurs cérébrales par ultrasons focalisés. Avec cette méthode, il s'agit de focaliser des ultrasons de grande intensité pendant plusieurs secondes à travers la boîte crânienne en corrigeant les aberrations de la propagation dues à l'os.

Retournement temporel dans le cerveau

Avec Mickael Tanter et Jean-François Aubry, nous avons vérifié que la technique du retournement temporel permet de compenser avec précision les effets de la boîte crânienne. Avec un premier prototype de 300 transducteurs et un émetteur implanté dans le cerveau d'une brebis, nous avons montré que l'on pouvait concentrer sur des zones millimétriques des puissances acoustiques suffisantes pour élever la température des tissus à 65 °C. Puis pour éviter l'utilisation d'un émetteur implanté, nous avons développé une approche utilisant une source

virtuelle. Elle consiste, après avoir obtenu l'image tridimensionnelle du crâne par scanner à rayons X, à bâtir un modèle informatique de la propagation ultrasonore à l'intérieur du crâne et à simuler l'opération de retournement temporel de signaux provenant de n'importe quel point du cerveau. La Société *Supersonic Image* a fabriqué un dispositif à 512 transducteurs, compatible avec un dispositif d'imagerie par IRM. La méthode a été validée sur des cadavres, et elle sera prochainement testée dans le cadre du projet *Ultrasound*, à l'Institut du cerveau et de la moelle.

Enfin, un mot des sonars et radars à retournement temporel. Ils sont également en plein développement. Ils peuvent être utilisés en imagerie sous-marine des petits fonds où il est pratiquement impossible de repérer par les méthodes sonar classiques des cibles, telles des mines, à cause de la réverbération. De même, des radars à retournement temporel permettent d'observer des personnes se déplaçant derrière un mur. Les applications du retournement temporel dans les milieux complexes sont légion que ce soit pour les ondes acoustiques ou électromagnétiques. Qui plus est, les applications de ces techniques aux ondes lumineuses, aux ondes sismiques et même aux vagues à la surface de la mer sont plus que prometteuses. ■