

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.

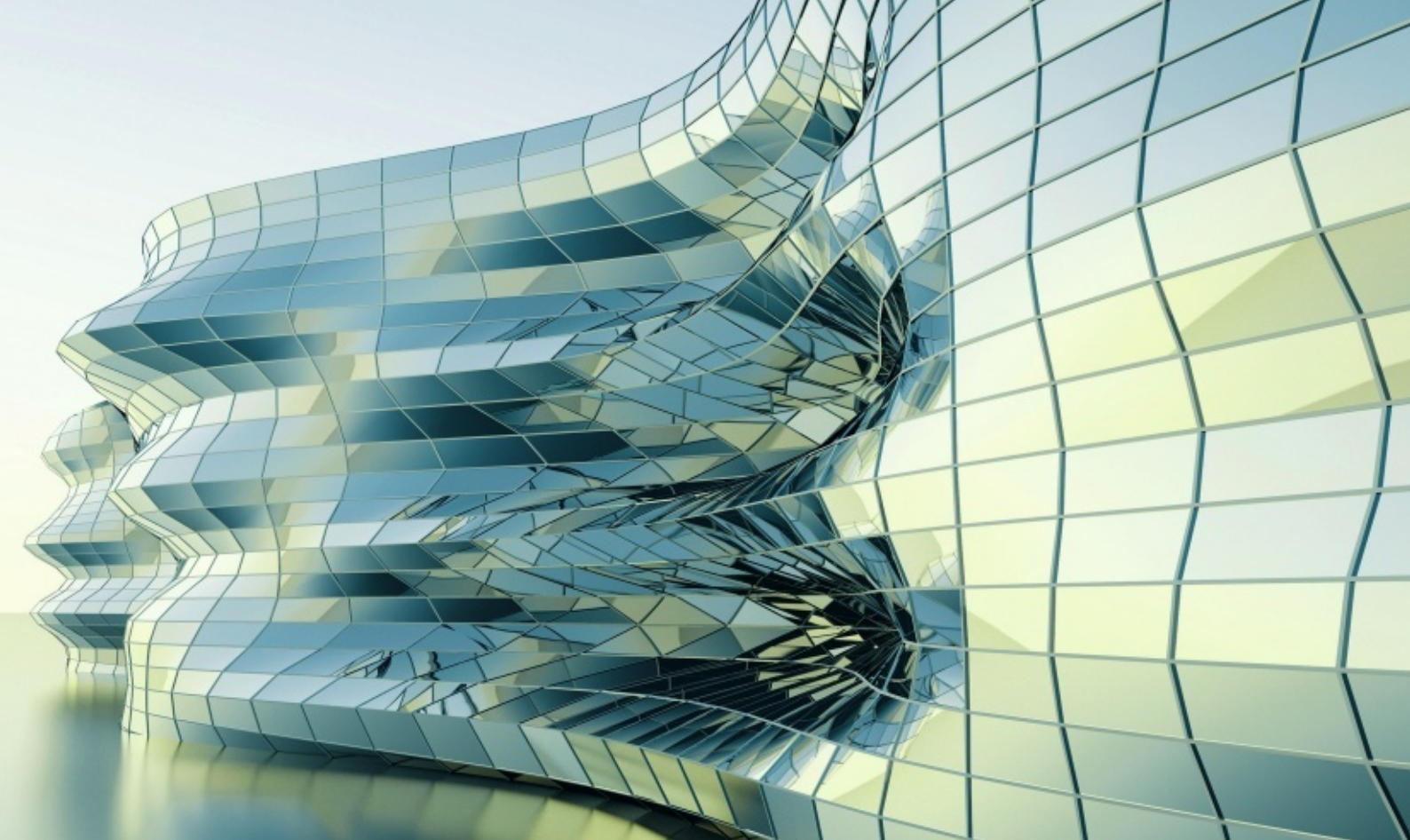
Nous nous intéresserons à des milieux de propagation tellement complexes qu'une impulsion ondulatoire est déformée au cours de sa propagation au point que le signal reçu par un récepteur lointain ne ressemble en rien au signal émis par la source ; on qualifie ces milieux de dispersifs. On est confronté 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 réfléchiée 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/Yuriy Belmesov

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 !

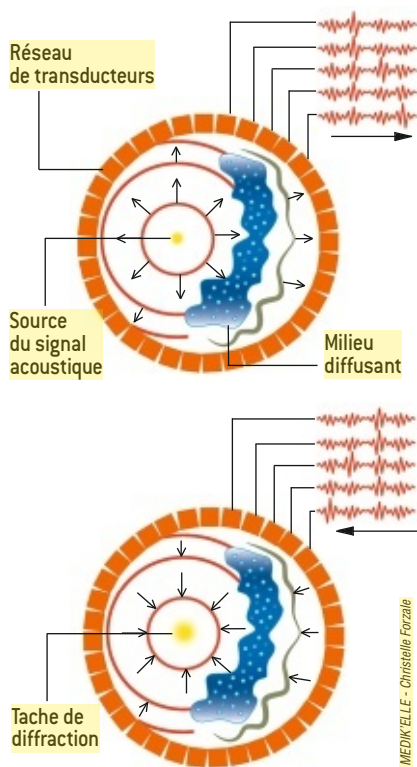
Dans ces conditions, bien que le miroir à retournement temporel soit très petit, il est capable de réaliser des taches focales dont la dimension est toujours de l'ordre de la demi-longueur d'onde. Cet effet a été observé dans les scénarios les plus divers : la propagation d'ultrasons de longueur d'onde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



Institut Langevin