

Les milieux complexes : un atout pour le retournement temporel

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.

Mathias Fink | 30 novembre 1999 | [Pour La Science n°409](#)

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.

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 propagation à l'envers. C'est le domaine des miroirs à retournement temporel.

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.

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.

Remonter le temps

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 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. 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. Quelles que soient les distorsions, il existe toujours, en théorie, une onde duale capable de parcourir en sens inverse les chemins complexes suivis par l'onde incidente, et qui converge exactement à la source.

Un miroir à retournement temporel constitué d'un réseau d'antennes réversibles entourant complètement la source est capable de créer physiquement cette onde duale. 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.

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. 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 sur une zone dont la taille est égale à $\lambda/2$. Ainsi, au lieu de restituer exactement l'image de la source ponctuelle, il se crée une tache dite focale (limite de diffraction).

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.

Dans le schéma envisagé jusqu'à présent, la source était totalement entourée d'antennes : 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. 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 $\lambda/2$. 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.

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 $200\mu s$. 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.

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 ? Renverser le sens du temps revient pour une onde sinusoïdale à renvoyer cette onde en remplaçant sa phase Φ par son opposé, $-\Phi$.

Quelle que soit sa phase, une onde sinusoïdale émise par une source de très petite taille (une onde sphérique divergente) ne focalise jamais en traversant un milieu diffusant, mais donne lieu 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. 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 plus éloignés, 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 décorréélées) 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.

Ainsi, une seule antenne exploitant 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

Cavités : 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. 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 98m de longueur, formé de 29 transducteurs fonctionnant autour d'une fréquence centrale de trois kilohertz (soit à une longueur d'onde de 50cm). 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 1000km 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 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. 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

crystal. On sait qu'un atome se comporte comme un résonateur qu'excitent 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 Lerozey, 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 2.4GHz / 12cm.

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 2.4GHz. En se couplant entre eux, ils créent un spectre de modes collectifs très riches qui contient de nombreuses fréquences s'étalant de quelques 0.1GHz à 2.4GHz. 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 canettes de soda vides ! 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 6.6cm et qui résonnent à 420Hz, ce qui correspond à une longueur d'onde dans l'air de 80cm.

En fabriquant une « structure cristalline » de 7×7 canettes, on réalise un milieu qui peut vibrer selon 49 modes d'oscillation différents, dont les fréquences s'étalent de 340 à 420Hz. En utilisant une émission acoustique brève de dix millisecondes centrée sur 400Hz 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 des micro-ondes, très efficace et on refocalise l'onde sonore sur une tache focale dont la dimension est de l'ordre de $\lambda/25$.

Retournement temporel dans le cerveau

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 à travers la boîte crânienne.

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 méthode a été validée sur des cadavres, et elle sera prochainement testée dans le cadre du projet *Ultrabrain*, 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.