

Ondes et renversement du temps

par Mathias FINK

Laboratoire Ondes et Acoustique
ESPCI et Université Denis Diderot - Paris

Le renversement du temps est un de ces concepts qui intéressent toujours bon nombre de physiciens. Il s'avère que dans le domaine des ondes (acoustiques et électromagnétiques), de véritables expériences de renversement du temps peuvent être mises en œuvre en utilisant des miroirs à retournement temporel. La conclusion de ces expériences est étonnante : plus le milieu de propagation est complexe et « chaotique », plus il est facile de réaliser une expérience de renversement du temps. On décrira dans cet article les nombreuses applications de ce concept.

25

Une des symétries les plus fondamentales de la physique, l'invariance par renversement du temps, peut être exploitée dans le domaine de la physique des ondes, en acoustique et depuis peu en électromagnétisme, pour créer une grande variété d'expériences et d'instruments qui intéressent la physique fondamentale et dont les applications vont de la médecine aux télécommunications en passant par l'acoustique sous-marine, la sismologie, le contrôle non destructif, la domotique...

L'évolution des performances des composants électroniques permet en effet de réaliser aujourd'hui de véritables miroirs à retournement temporel (MRT) qui permettent de faire revivre à une onde toutes les étapes de sa vie passée. Ces dispositifs exploitent le fait que, dans la plupart des cas, la propagation des ondes acoustiques (sonores et ultrasonores) et des ondes électromagnétiques est un processus réversible. Quelles que soient les déformations subies dans un milieu de propagation complexe par une onde rayonnée par une source (réfraction, diffusion multiple, réverbération), il existe toujours, en théorie, une onde duale capable de parcourir en sens inverse tous les chemins complexes et qui converge exactement à la source. L'intérêt principal d'un MRT est de créer physiquement cette onde duale, à partir d'un réseau d'antennes réversibles (réceptrices et émettrices), de convertisseurs A/D et D/A (analogiques-numériques) et de mémoires électroniques, et de pouvoir ainsi focaliser une énergie ondulatoire à travers des milieux de propagation très complexes.

Un miroir à retournement temporel acoustique a une surface tapissée de transducteurs piézo-électriques qui jouent alternativement le rôle de microphones et de haut-parleurs. L'onde acoustique rayonnée par une source quelconque est d'abord mesurée par tous les microphones et enregistrée dans des mémoires électroniques. Puis, dans un deuxième temps (la phase de retournement temporel), toutes ces mémoires sont relues *en verlan*. Plus exactement, on inverse la chronologie des signaux reçus par chaque microphone (et non la succession des syllabes). Les signaux arrivés les derniers sont relus les premiers et vice versa. Tous les microphones passent alors, de façon synchrone, en mode haut-parleur et sont alimentés par les signaux « retournés temporellement » en provenance des mémoires électroniques. On réalise ainsi de nouvelles conditions initiales de rayonnement, et du fait de la réversibilité, l'onde ainsi rayonnée n'a pas d'autre possibilité que de revivre pas à pas toutes les étapes de sa vie passée. Bien entendu, ce type de miroir a un comportement très différent de celui d'un

miroir ordinaire. Un miroir à retournement temporel réalise l'image « réelle » de la source sur elle-même alors qu'un miroir ordinaire réalise une image virtuelle de la source.

L'étonnante robustesse de cette technique a été vérifiée dans les scénarios les plus divers, qui vont de la propagation d'ultrasons de longueur d'onde millimétrique dans le corps humain sur des distances de plusieurs décimètres, à la propagation en mer sur plusieurs dizaines de kilomètres d'ondes acoustiques métriques, et depuis peu à la propagation d'ondes électromagnétiques centimétriques sur plusieurs centaines de mètres [1-2]. Un point commun, assez extraordinaire, à toutes ces expériences est que, plus le milieu de propagation est complexe et chaotique (diffusion multiple dans des milieux aléatoires ou réverbération sur les parois de cavités de géométrie compliquée), plus les taches focales obtenues sont fines et propres. La relation qui existe entre la complexité du milieu et la taille de la tache de diffraction est certainement la propriété la plus spectaculaire du MRT, comparée à celles des systèmes conventionnels de focalisation (lentilles, miroirs, antennes multiéléments). Un MRT agit comme une antenne qui utilise la complexité du milieu environnant pour apparaître beaucoup plus grande qu'elle ne l'est en réalité et ce n'est plus la taille de l'antenne qui fixe la résolution spatiale, mais les propriétés de l'environnement (les corrélations spatiales et fréquentielles du champ).

Une expérience idéale

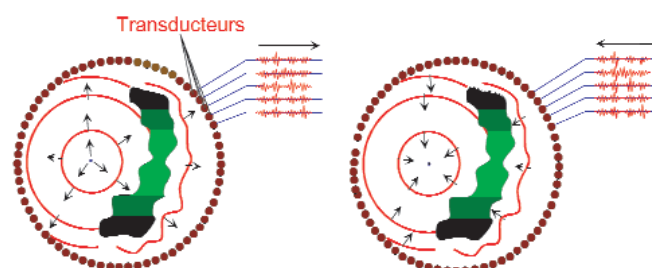


Figure 1 : Dans une première étape, le signal sonore émis par la source se propage à travers un milieu complexe et est capté par l'ensemble des microphones qui entourent la source. Dans une deuxième étape, tous les signaux captés sont réémis dans une chronologie inversée et l'onde ainsi créée se refocalise sur sa source initiale. Cependant, cette onde parfaitement convergente donne lieu, après le collapse au point source, à une nouvelle onde divergente, ce qui entraîne l'apparition d'une tache de diffraction autour de la source.

Pour comprendre l'origine de ces effets, il faut d'abord revenir au principe d'une expérience idéale de retournement temporel ondulatoire. L'expérience de pensée la plus simple consiste à imaginer une source d'ondes entourée par une surface complètement fermée couverte de transducteurs piézo-électriques. Le champ ondulatoire rayonné dans un premier temps est mesuré et enregistré par tous les transducteurs. Dans un deuxième temps, on impose sur cette même surface ce champ dans une chronologie temporelle inversée. La surface devient émettrice et génère alors un champ renversé temporellement, dual du champ initial, qui converge exactement vers sa source, et ceci aussi bien en milieu homogène qu'hétérogène (cf. figure 1).

On fabrique ainsi physiquement ce que les physiciens appellent la solution « avancée » du problème du rayonnement. C'est une solution duale de la solution « retardée » qui est la seule observée habituellement. On sait en effet que, chaque fois qu'on essaye de prévoir le rayonnement d'une source, la symétrie par renversement du temps des équations des ondes pose un sérieux problème aux physiciens. Il existe en effet, mathématiquement, toujours deux solutions possibles : une pour laquelle le champ rayonné par la source se répand dans l'espace sous la forme d'une onde divergente qui n'atteint les points d'observations qu'après le moment où la source a été allumée. Cette solution nous convient parfaitement, car elle vérifie le principe de causalité et on l'appelle la solution « retardée ». Dans un milieu de célérité c uniforme, cette solution retardée peut s'écrire sous la forme $s(t - r/c)$, où $s(t)$ est une fonction qui dépend de la modulation temporelle de la source et où r est la distance du point d'observation à la source. Il existe aussi une deuxième solution qui ne respecte pas la causalité : la solution « avancée », où le champ rayonné par la source atteint le reste de l'espace avant que la source ne soit allumée et qui s'écrit $s(t + r/c)$!!! Bien que cette solution nous paraisse parfaitement absurde, il faut savoir que des grands physiciens comme FEYNMAN et WHEELER ont essayé d'interpréter avec un certain succès la théorie du rayonnement électromagnétique en tenant compte à la fois des solutions avancées et retardées.

Dans notre expérience bien entendu, tout est causal, et le MRT fabrique une solution qui ressemble beaucoup à la solution avancée : c'est une onde qui converge vers la source au lieu de diverger comme la solution retardée. Une remarque importante s'impose cependant concernant la réalisation de la solution avancée. Le champ réémis par le miroir à retournement temporel ressemble pendant un certain temps à une onde convergeant vers la source, mais une onde *ne sait pas s'arrêter* (elle a toujours une célérité) et lorsque l'onde convergente atteint l'endroit où était située la source, elle « collapse » et repart en sens inverse sous la forme d'une onde divergente. On observe alors autour de la source l'interférence entre l'onde convergente et cette onde divergente. Ce n'est pas exactement l'onde avancée qui est créée, mais c'est l'onde avancée moins l'onde retardée (en effet, l'onde divergente repart avec un signe opposé à l'onde convergente). Si l'onde qui est utilisée dans l'expérience est sinusoïdale et contient un certain nombre d'oscillations, on démontre alors qu'il se crée autour du point source une interférence constructive entre ces deux ondes sur une zone dont le rayon est égal à la demi-longueur d'onde utilisée. C'est la limite de diffraction. Plus exactement, pour une source initiale parfaitement ponctuelle émettant un rayonnement bref de large contenu spectral, le champ « retourné » focalise sur cette source, mais sous la forme d'une tache dont les dimen-

sions sont de l'ordre de la demi-longueur d'onde minimale émise.

Pour pouvoir réaliser des taches focales infiniment fines, en dessous des limites de la diffraction, il faudrait pouvoir empêcher l'onde divergente de se créer, ou au moins de se propager après le moment où le front avant de l'onde convergente atteint le foyer (le point source). C'est ce que peut faire un petit gadget appelé *puits acoustique* [3] et placé au point source ; plutôt que d'absorber le rayonnement incident, celui-ci émet, de façon active et au bon moment, une deuxième onde divergente en opposition de phase avec l'onde divergente naturelle. C'est de l'antibruit qui permet d'obtenir une interférence parfaitement destructive entre les ondes divergentes et qui donne des taches focales beaucoup plus petites que la limite de diffraction.

Diffusion multiple, cavité ergodique et super-résolution

Non seulement, ces puits acoustiques sont difficiles à réaliser, mais il est aussi difficile de réaliser une surface complètement fermée à retournement temporel. Dans la pratique, on se restreint à la réalisation d'une portion de surface à retournement temporel qui n'occupe qu'une ouverture angulaire limitée. Un raisonnement simple, mais trompeur, donne alors à penser que, plus la surface du MRT est petite, plus la tache focale deviendra grande, comme c'est le cas pour une lentille. Or il n'en est rien dès que le milieu de propagation devient complexe et désordonné. Une première expérience, réalisée dans notre laboratoire par A. DERODE et *al.* illustre bien ce concept. On s'intéresse à la propagation d'un paquet d'onde ultrasonore à travers un milieu aléatoire fortement multidiffuseur. Un réseau linéaire formé de quatre-vingt-seize transducteurs ultrasonores est utilisé comme miroir, sa dimension totale est de 40 mm. Il est immergé dans une cuve d'eau et il fonctionne autour d'une fréquence centrale de 3 MHz (longueur d'onde $\lambda \sim 0,5$ mm dans l'eau). Entre ce réseau et une source ultrasonore de très faible dimension (un élément du réseau de 0,35 mm), on a introduit un milieu désordonné formé de deux mille tiges d'acier de 0,8 mm de diamètre, réparties aléatoirement avec un écartement moyen de 2,6 mm (cf. figure 2).

Dans la première phase de l'expérience, la source ponctuelle émet un signal ultrasonore très bref dont la durée est de 1 μ s, soit trois périodes ultrasonores. Ce train d'ondes ultraso-

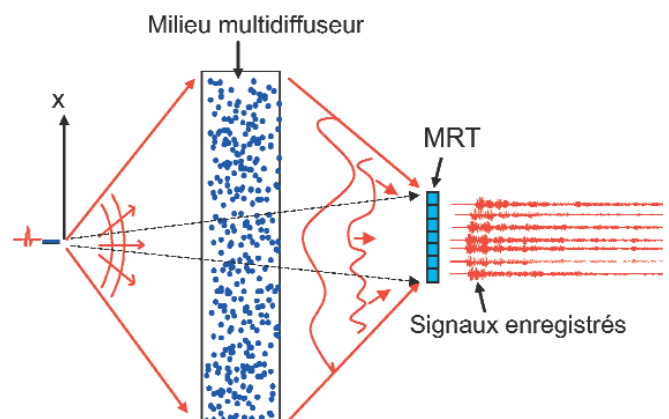


Figure 2 : Schéma de l'expérience en présence d'un milieu multidiffuseur. Le MRT est situé à droite en position verticale, et la source initiale est à gauche de la figure.

nore se propage à travers la forêt de tiges qui le modifie complètement. Seule une très faible partie de l'onde initiale se propage sans diffusion, alors que la plus grande partie de l'énergie incidente donne lieu à des processus de diffusion multiple.

Au niveau du réseau de transducteurs, on observe l'arrivée d'une onde de longue durée de structure incohérente, qui résulte de l'ensemble des chemins de diffusion multiple (cf. figure 3b) : c'est la coda. Les signaux enregistrés par le miroir s'étendent sur près de 200 μs , à comparer au signal initial dont la durée était de 1 μs (cf. figure 3a). Dans une deuxième phase, ces signaux de 200 μs sont retournés temporellement et réémis dans une chronologie inverse par tout le réseau. On constate que l'onde revit effectivement les étapes antérieures de sa propagation, jusqu'à former au point source initial une impulsion très brève dont la durée est de l'ordre de la μs (cf. figure 3c). Par ailleurs, en explorant latéralement le champ autour du point initial, on constate que la taille de la tache focale obtenue à travers le milieu multidiffuseur est beaucoup plus fine que celle observée dans une expérience de retournement en milieu homogène (l'eau uniquement), comme on peut le constater sur la figure 3d, où la courbe large représente la tache focale en milieu homogène. Pour la géométrie de notre expérience le gain en résolution est de 35 !!! et peut s'expliquer par la différence énorme entre les ouvertures angulaires sous lesquelles sont vus le miroir et le milieu diffuseur par la source. Dans l'expérience effectuée à travers l'eau, l'extension de la tache de diffraction

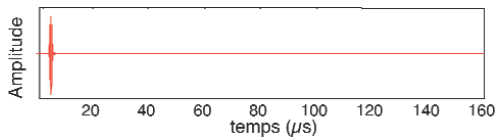


Figure 3a : Signal reçu, en provenance de la source, par un des transducteurs du MRT en l'absence de milieu multidiffuseur (à travers l'eau).

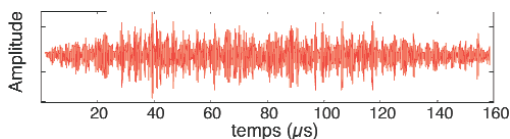


Figure 3b : Signal reçu (la coda) par le même transducteur en présence du milieu multidiffuseur.

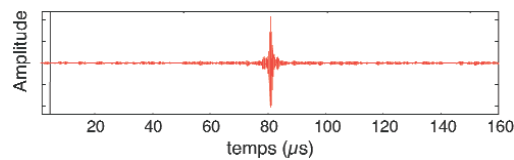


Figure 3c : Signal observé par la source (un hydrophone) après retournement temporel et ré-émission des signaux du MRT à travers le milieu multidiffuseur, on note la recompression temporelle.

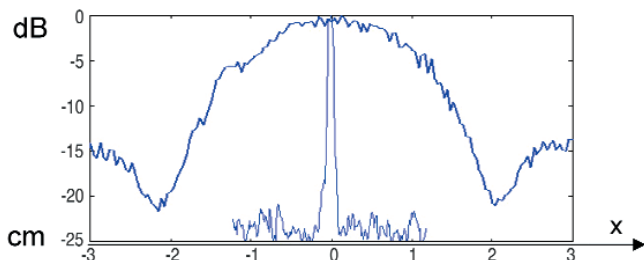


Figure 3d : Formes de la tache focale. La courbe la plus étroite correspond au retournement temporel à travers le milieu diffuseur. La courbe la plus large correspond à la même expérience de retournement effectuée dans l'eau.

dépend uniquement de la taille du miroir qui participe à la focalisation. En présence du milieu multidiffuseur, c'est l'ensemble du milieu qui devient la source d'un rayonnement cohérent qui focalise sur le point initial, et c'est donc son ouverture angulaire qui fixe la taille de la tache de diffraction, et non plus la taille du miroir.

Plus étonnant encore, on peut réduire le nombre d'éléments du miroir. Au lieu d'utiliser les quatre-vingt-seize éléments à retournement temporel, on peut n'utiliser qu'un unique élément pour former un miroir à retournement temporel quasi ponctuel, et on observe toujours une tache focale de même dimension avec cependant un niveau de lobes parasites plus grand. Un tel résultat peut sembler incompréhensible pour qui est habitué à raisonner sur des ondes monochromatiques comme en optique cohérente. En effet, renverser le sens du temps revient pour une onde parfaitement sinusoïdale (qui n'est décrite que par deux nombres : une amplitude et une phase) à renvoyer cette onde en conjuguant sa phase. C'est ce que fait en optique un miroir à conjugaison de phase. Or, quelle que soit sa phase, une onde monochromatique émise par un miroir de très petite taille (une onde sphérique divergente) ne peut pas focaliser en traversant un milieu multidiffuseur. Au contraire, elle donne lieu, après la traversée du milieu diffuseur, à un champ complètement aléatoire dont les propriétés statistiques sont décrites par la théorie du speckle optique. Comment se fait-il qu'un miroir à retournement temporel ponctuel focalise à travers un milieu aléatoire, alors qu'un miroir à conjugaison de phase en est incapable ? La réponse se trouve dans la bande passante des signaux qu'on traite dans les expériences de retournement temporel. Lorsqu'on utilise un rayonnement initial très bref qui se propage à travers des milieux diffuseurs, le signal capté par le MRT est très long, mais son spectre reste toujours large. Dans l'opération de retournement temporel, les phases de chacune des composantes spectrales sont conjuguées et bien qu'aucune des composantes spectrales du champs ne refocalise à la source, toutes leurs phases sont parfaitement corrigées sur celle-ci.

On retrouve alors au point source l'addition en phase de toutes les sinusoïdes de fréquences différentes et d'amplitude quelconque, ce qui donne un signal très intense au temps focal (cf. figure 4). Pour les points situés en dehors de la source, les composantes spectrales arrivent par contre avec des phases

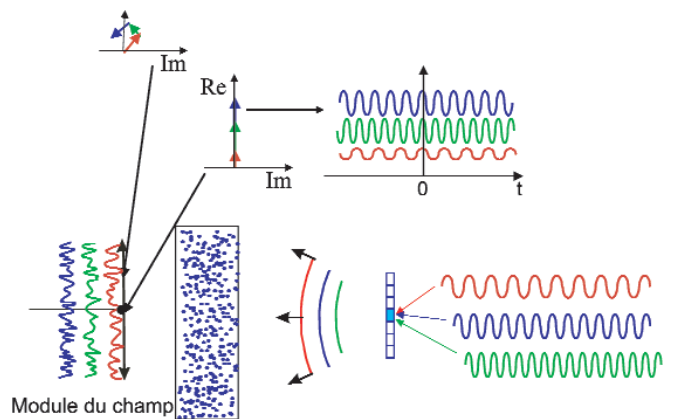


Figure 4 : Dans le cas où seul le transducteur central du MRT est utilisé, on observe, dans le plan de la source, le module du champ acoustique correspondant à trois fréquences différentes du spectre émises par le MRT. Chacune correspond à une couleur différente et à une figure de speckle différente. En tenant compte des phases des signaux qui sont toutes compensées au point source, on comprend que l'addition des sinusoïdes de différentes fréquences est constructive uniquement au point source et au temps focal.

différentes. On peut évaluer la qualité de la focalisation en étudiant le nombre de bandes de fréquence décorréliées qui couvrent le spectre total de nos signaux. À deux bandes de fréquence successives « décorréliées » du spectre (qu'on a représentées par des couleurs différentes sur la figure 4) correspondent en effet deux figures de speckle décorréliées et donc des phases complètement incohérentes. Dans l'expérience décrite, le nombre de ces bandes de fréquence est de l'ordre de deux cents. C'est le rapport entre la durée du signal d'émission (1 μ s) et la durée du signal dispersé (200 μ s) et c'est ce qui explique la qualité de la focalisation. Plusieurs équipes de mathématiciens animées par George PAPANICOLAOU de l'université de Stanford se sont penchées sur ces résultats et ont formalisé cet effet de super-résolution qu'ils associent au phénomène d'auto-moyennage des signaux à spectre large qui traversent des milieux aléatoires [4].

Cette expérience de recompression temporelle et spatiale d'un signal multidiffusé illustre bien l'efficacité étonnante du renversement temporel pour les ondes acoustiques à spectre large. Elle montre aussi la très faible sensibilité aux erreurs que l'on peut commettre dans l'expérience. Les signaux enregistrés et retournés dans les mémoires sont échantillonnés par des convertisseurs analogiques/digitaux qui sont soumis aux erreurs de quantification. Du moment que la fréquence d'échantillonnage temporelle est suffisante (de l'ordre de quatre fois la fréquence maximale du spectre), on peut se permettre de faire des erreurs de quantification très importantes. Avec un convertisseur A/D fonctionnant sur 8 bits, on fait une erreur d'1/256 sur l'amplitude des signaux. Avec un convertisseur 1 bit, l'erreur sur l'amplitude des signaux devient énorme (on remplace le signal par +1 quand il est positif et par -1 quand il est négatif). Eh bien, l'expérience de retournement temporel marche aussi bien en utilisant des convertisseurs 1 bit ou 8 bits ! Curieusement, un miroir à retournement temporel, fonctionnant sur 1 bit de quantification, permet de réaliser une expérience de renversement du temps de très bonne qualité, pourvu que le milieu traversé soit très diffusant et que la bande passante des signaux soit assez grande. Pourtant, le milieu formé d'une répartition aléatoire de tiges s'apparente en mécanique statistique à ce qu'on appelle un gaz de Lorentz, qui est un milieu chaotique. Le comportement dynamique d'une bille qui serait envoyée dans cette structure est typiquement chaotique. Une petite erreur sur la vitesse de lancement d'une bille dans ce système de tiges entraînerait, après un certain nombre de rebonds, une modification exponentielle de la trajectoire. Pour renverser temporellement la trajectoire d'une bille en renversant le vecteur vitesse de la bille, il faudrait une précision infinie sur la mesure de cette vitesse, ce qui est impossible. Cette sensibilité aux conditions initiales interdit la réalisation d'une expérience de renversement du temps en mécanique, alors que la propagation des ondes dans un tel milieu est infiniment plus robuste.

Ce même phénomène existe de façon encore plus spectaculaire lorsqu'une onde se propage au sein d'une cavité réverbérante de géométrie irrégulière (on parle de géométrie ergodique). Avec C. DRAEGER, nous avons montré qu'en utilisant un unique élément omnidirectionnel à retournement temporel on pouvait effectuer un renversement du temps quasi parfait, en entourant le milieu de propagation par des bords parfaitement réfléchissants disposés suivant des géométries qui sont celles des billards chaotiques. L'idée est que pour pouvoir capter toute l'information sur l'onde provenant d'une source omnidirectionnelle, plutôt que de mettre des transducteurs dans toutes les

directions de l'espace, il est plus astucieux d'entourer la source de murs réfléchissants, capables de rediriger vers un unique transducteur toutes les composantes de l'onde (tous les rayons). Beaucoup de géométries de billard ont cette propriété qu'on qualifie d'ergodique. L'ergodicité veut dire ici que les trajectoires de boules de billards hypothétiques qui ricocheraient de façon élastique sur les bords du billard explorent de façon uniforme tout l'espace des phases du billard⁽¹⁾. En attendant suffisamment longtemps, chaque rayon provenant de la source passe aussi près que l'on veut de tous les points du billard. Dans le domaine ondulatoire, on peut définir une sorte de temps d'ergodicité : le temps de Heisenberg τ_H , qui est le temps nécessaire pour que tous les rayons passent dans un voisinage d'une longueur d'onde de tous les points de la cavité (c'est aussi le temps sur lequel il faut enregistrer la coda pour obtenir par analyse spectrale tous les modes de la cavité). En d'autres termes, en chaque point du billard, l'évolution temporelle de l'onde élastique pendant le temps de Heisenberg contient toute l'information sur le champ ondulatoire et sur la source qui lui a donné naissance. C'est cette propriété qui nous permet de n'utiliser qu'un unique point de mesure et de retournement temporel pour renverser le champ ondulatoire dans toute la cavité et pour focaliser sur la source avec une résolution de la demi-longueur d'onde (cf. figure 5).

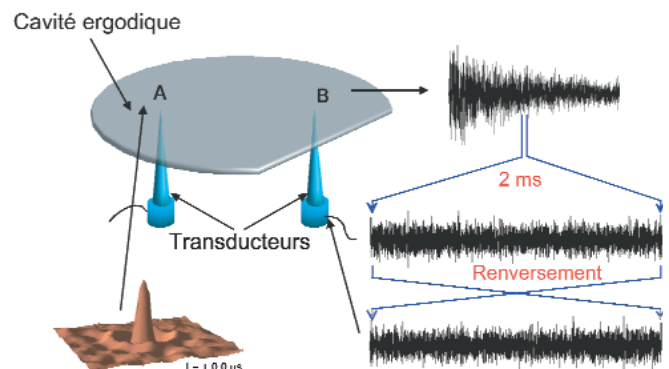


Figure 5 : Deux transducteurs A et B sont en contact avec une cavité ergodique (ici une galette de silicium). Le transducteur A émet dans un premier temps ici une impulsion de 1 μ s et le transducteur B reçoit un signal très long dont la durée est de l'ordre de 30 ms. On sélectionne une portion de ce signal d'une durée égale à 2 ms (le temps de Heisenberg) et une fois le signal retourné temporellement et réémis du point B, on observe autour du point A, au moyen d'un interféromètre optique, la propagation des ondes élastiques. On constate qu'elle refocalise sur une dimension égale à la demi-longueur d'onde.

Dans l'expérience décrite sur la figure, on utilise un billard chaotique réalisé en silicium pour avoir une très faible dissipation des ondes acoustiques. Typiquement, pour une source émettant une impulsion initiale de 1 μ s de durée, on enregistre en n'importe quel point de la cavité un bruit de réverbération d'une durée τ_a de 30 ms (τ_a est un temps d'atténuation) bien supérieur au temps d'Heisenberg de la cavité qui est dans cette expérience de 2 ms. Chaque fois qu'on est dans une situation où $\tau_a > \tau_H$ on profite complètement de l'ergodicité de la cavité. Il n'est pas nécessaire de travailler sur des cavités de silicium, le principe fonctionne aussi bien sur beaucoup de matériaux plus dissipatifs.

(1) Cette propriété est reliée au concept d'ergodicité introduit par BOLTZMANN qui permet de remplacer dans les calculs les moyennes temporelles sur les trajectoires par des moyennes spatiales.

Les applications

Télécommunications

Une des applications de ce concept est la télécommunication à large bande en milieu réverbérant. On peut ainsi envoyer à partir d'une ou de plusieurs antennes des messages différents très riches en informations, focalisés chacun sur un récepteur particulier et qui permettent d'augmenter de façon très importante le débit d'informations entre un réseau d'antennes et un ensemble de récepteurs. Pour transmettre dans un milieu réverbérant à un utilisateur un message complexe de façon optimale, il faut d'abord enregistrer, dans une phase d'apprentissage, les codes spatio-temporels nécessaires pour focaliser une impulsion brève sur l'emplacement de cet utilisateur. Dans un deuxième temps, pour faire parvenir à cet utilisateur un message, par exemple une suite d'impulsions codées du type $+1$ ou -1 , on superpose ces codes avec les bons signes sur chacun des émetteurs. Du fait de la linéarité de la propagation, l'utilisateur ne reçoit alors que le code qui lui est destiné.

Dans le cas où on a beaucoup d'utilisateurs, il suffit encore d'exploiter la linéarité et on fait réémettre en parallèle par les antennes la superposition de tous les codes spatio-temporels de



Figure 6a : Photo d'une antenne à retournement temporel de 80 m de long réalisée par le Scripps.

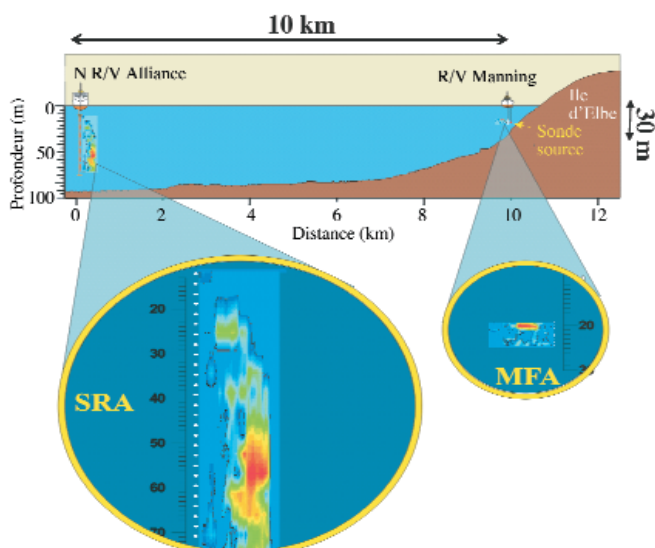


Figure 6b : Cette antenne a été immergée au large de l'île d'Elbe. Pour une longueur d'onde de 50 cm, on obtient une tache focale à une distance de 10 km de 30 cm de largeur à mi-hauteur (c'est le signal observé dans la vignette MFA). C'est pratiquement la limite de diffraction.

focalisation et de toutes les impulsions codées destinées à chaque utilisateur. La démonstration expérimentale a été faite aussi bien en acoustique sous-marine sur de très grandes distances qu'en acoustique des salles, et les premières réalisations d'antennes électromagnétiques à retournement temporel fonctionnant dans la bande Wi-Fi (Wireless fidelity) autour de 2,4 GHz ont montré qu'on pouvait aussi focaliser des ondes électromagnétiques sur des zones de quelques centimètres dans des immeubles. Dans le domaine de l'acoustique sous-marine, par exemple, l'équipe de B. KUPERMAN du Scripps a testé au large de l'île d'Elbe des miroirs à retournement temporel fonctionnant à 3 KHz immergés dans une profondeur d'une centaine de mètres. En exploitant la réverbération entre le fond de la mer et la surface, ils ont montré qu'on pouvait focaliser un message acoustique à 10 km de distance sur une zone de 30 cm de large [4], ce qui correspond à une résolution de la demi-longueur d'onde (cf. figures 6a et 6b).

De la même façon, les applications à la téléphonie mobile en milieu urbain (milieu très réverbérant) sont envisageables et sont en cours d'étude dans plusieurs laboratoires. Le problème majeur qui se pose pour réaliser des antennes électromagnétiques à RT est la fréquence d'échantillonnage des convertisseurs nécessaires pour enregistrer des signaux dont la fréquence centrale est de 2,4 GHz. G. LEROSEY et al. ont développé une technique permettant un échantillonnage réduit en traitant différemment la porteuse du signal et son enveloppe. On retourne temporellement l'enveloppe et on prend le complexe conjugué de l'onde porteuse [5].

Le résultat le plus spectaculaire de ces recherches est que, contrairement à l'intuition, plus un milieu est désordonné et réverbérant, plus la quantité d'informations qui peut être envoyée à des utilisateurs est grande. La réverbération, qui est généralement perçue comme une limitation en télécommunications, devient au contraire un allié efficace en permettant de créer des taches focales de plus faible dimension, et en évitant ainsi les interférences entre messages qui sont la limite principale des systèmes de télécommunications actuels. Cette amélioration peut se quantifier en évaluant la quantité maximale d'informations qu'il est possible d'envoyer, sans faire d'erreur, dans la zone où se situent les utilisateurs. On a pu montrer [6], que cette quantité d'information dépend à chaque fréquence du nombre de valeurs propres significatives de l'opérateur décrivant une opération de retournement temporel entre le réseau émetteur et les utilisateurs. En effet, la recherche des invariants (associés à chaque vecteur propre) permet de trouver des codes spatio-temporels orthogonaux qui forment une base optimale pour créer des canaux de communications indépendants. Ce nombre de canaux indépendants est égal au nombre de taches focales ne se recouvrant pas qu'on peut créer dans le volume de réception, et ce nombre augmente avec la complexité du milieu.

Objets tactiles

Une autre application spectaculaire des propriétés de refocalisation des antennes à retournement temporel touche la domotique. Comment transformer un objet quelconque (une table, une porte, un mur...) en un clavier intelligent ? Il suffit de penser à l'impact de votre doigt sur la surface d'un objet solide quelconque. Cet impact génère une onde élastique qui se réfléchit de nombreuses fois sur les bords de l'objet. L'enregistrement de cette signature sonore, sur un temps de l'ordre du temps d'Heisenberg, par un unique microphone (un accéléromètre) contient toute l'information pour localiser la source de

l'impact. Comme on l'a vu précédemment, un retournement temporel refocaliserait ce signal sur une tache focale d'une demi-longueur d'onde. On peut alors diviser la surface d'un objet en autant de zones distinctes de surface élémentaire $(\lambda/2)^2$. Pour réaliser un clavier tactile, il suffit alors, dans un premier temps, de stocker en mémoire toutes les signatures temporelles de chacun des points d'impact. Puis, dans un deuxième temps, lorsqu'on tape à un endroit de l'objet, on compare la signature de cet impact à la banque de données. Une opération d'inter-corrélation du nouveau signal avec l'ensemble des signatures mémorisées initialement revient mathématiquement à réaliser dans l'ordinateur l'opération de retournement temporel. Les longueurs d'onde des ondes de Lamb qui sont générées dans la plupart des objets sont de l'ordre du centimètre, ce qui permet d'obtenir des claviers virtuels très pratiques. Une start-up Sensitive Object a été créée sur ce projet par Ros Kiri ING, un enseignant-chercheur de notre laboratoire, et les applications de ce principe sont très nombreuses.

Dans le même ordre d'idées, D. ALBERT de l'US Army a développé une méthode de localisation par retournement temporel des snipers dans les villes. La réverbération rend en effet très difficile le repérage de la source du tir. En utilisant un modèle de propagation du son dans une ville dont on connaît la géométrie des bâtiments, il a montré qu'on pouvait retrouver la position du sniper avec un petit nombre de microphones.

Détection et imagerie

Si les expériences décrites précédemment illustrent l'intérêt des miroirs à retournement temporel sur le plan des télécommunications et de la localisation de sources actives, le domaine de la détection de cibles (sources passives) est aussi très prometteur. C'est le domaine de l'échographie et du sonar. On a alors une situation différente de celles décrites précédemment, car on ne dispose pas d'une source acoustique active qui envoie une onde qu'on cherche à renverser temporellement. Le problème à résoudre est celui de la détection ou de l'imagerie de cibles réfléchissantes situées derrière ou dans des milieux de propagation complexes. Les milieux de propagation dans lesquels les ultrasons se propagent sont souvent hétérogènes et les faisceaux ultrasonores sont distordus au cours de la propagation. Dans le domaine médical, par exemple, une couche de graisse d'épaisseur variable, des tissus osseux ou certaines couches de tissus musculaires peuvent fortement perturber la propagation des ultrasons, et les techniques de focalisation nécessaires pour obtenir de bonnes images ne fonctionnent pas correctement. Dans un autre domaine, celui du contrôle non destructif par ultrasons des objets solides (en aéronautique et dans l'industrie nucléaire), les pièces à contrôler sont généralement immergées. La forme de l'interface entre la pièce solide et le liquide de couplage complique la propagation ultrasonore et limite actuellement le niveau de détection des petits défauts. En acoustique sous-marine, les phénomènes de convection, les variations de la vitesse du son en fonction de la profondeur et la réverbération acoustique entre le fond et la surface de la mer sont aussi des sources très importantes de distorsion pour les sonars.

Comment, dans ces cas, exploiter le principe du retournement temporel pour détecter et focaliser sur une cible ? Il suffit pour cela d'utiliser le réseau de transducteurs formant le miroir à retournement temporel suivant la séquence suivante. Dans un premier temps, on illumine le milieu à explorer au moyen d'une impulsion ultrasonore brève. Dans le cas où le milieu contient

une cible réfléchissante, on sélectionne l'écho réfléchi par cette cible au moyen d'une fenêtre temporelle et on renverse temporellement cet écho avant de le réémettre. La cible réfléchissante, une fois illuminée, se comporte comme une source acoustique secondaire sur laquelle le front d'onde réémis focalisera de façon optimale même à travers un milieu de propagation hétérogène.

En présence de plusieurs cibles, le problème se complique. Si on éclaire, au moyen d'une impulsion brève, un milieu contenant plusieurs cibles de réflectivités différentes, l'opération de retournement des échos provenant de ces cibles génère plusieurs fronts d'onde d'amplitudes différentes, qui convergent vers chacune des cibles. Si les réflecteurs sont séparés les uns des autres d'une distance supérieure à la limite de résolution du miroir, le miroir crée les images réelles acoustiques des cibles sur elles-mêmes sans interférences parasites. Le front d'onde le plus intense éclaire la cible de plus forte réflectivité et les fronts d'onde d'amplitude plus basse éclairent les autres cibles. On peut alors itérer le processus, et après plusieurs itérations, le processus convergera vers la cible la plus brillante. Une fois le faisceau orienté sur cette cible, l'itération ne modifie plus le résultat. On a obtenu un premier invariant de l'opération de retournement temporel. Dans un deuxième temps, on peut soustraire ce front d'onde de l'ensemble des échos pour ne plus éclairer cette cible et une nouvelle itération nous permettra de sélectionner la seconde cible par ordre de brillance. On trouve alors un second invariant de l'opération de retournement temporel... Toute cette approche peut être réalisée en hard et permet de détecter très rapidement l'ensemble des cibles d'un milieu et de trouver tous les fronts d'onde optimaux focalisant sur chacune des cibles. Le gros intérêt de cette méthode est de permettre la correction optimale de toutes les aberrations.

Une autre approche très puissante a été développée par C. PRADA. Plutôt que d'effectuer physiquement toutes ces itérations dans le milieu, on exploite la linéarité des opérations décrites pour effectuer toutes ces opérations en soft. On mesure dans un premier temps, l'ensemble des réponses impulsionnelles échographiques inter éléments captées par le réseau de transducteurs : si le réseau comporte N transducteurs émetteurs/récepteurs, on mesure N^2 signaux. La méthode consiste, dans un deuxième temps, à simuler l'opération de retournement temporel et la recherche de ces invariants en calculant les « vecteurs propres » et les valeurs propres d'une matrice qui se déduit de l'ensemble des réponses impulsionnelles. C'est la méthode D.O.R.T (Diagonalisation de l'opérateur de retournement temporel) [6].

À partir de ces différents principes, on peut développer des méthodes de détection de cibles et même dans certains cas de destruction. On peut aussi développer des méthodes de classification et d'imagerie. Dans le premier cas, la méthode itérative est plus rapide à mettre en œuvre et elle a été testée dans le domaine de la lithotritie (destruction de calculs rénaux) et du contrôle non destructif. Nous avons par exemple développé des systèmes de focalisation-poursuite et de destruction de calculs biologiques très précis qui focalisent à chaque instant une onde impulsionnelle de grande amplitude (1000 bars) sur les calculs qui bougent avec la respiration du patient. Une amélioration importante de cette technique a été réalisée récemment pour obtenir des ondes de choc de très grande amplitude à partir d'un MRT formé d'un nombre réduit de transducteurs piézo-électriques. On intercale, pour cela, entre le patient et le miroir à retournement temporel un guide d'onde acoustique très dispersif qui permet de recomprimer les échos de longue durée

sous la forme d'impulsion ultracourte pendant la phase de retournement temporel.

Pour ce qui est de la classification et de l'imagerie, la méthode D.O.R.T est plus appropriée et elle fait l'objet de nombreuses recherches en acoustique sous-marine, en contrôle non destructif et en électromagnétisme. L'étude du spectre de l'opérateur temporel d'une cible complexe donne en effet des informations très riches sur la cible, et cette voie de recherche est développée par plusieurs équipes (C. PRADA, D. CHAMBERS, M. SAILLARD) qui s'intéressent à la classification des cibles en acoustique et en électromagnétisme [7].

Thérapie

Enfin, une autre application médicale prometteuse du retournement temporel est la thérapie du cerveau par hyperthermie ultrasonore. 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 par des techniques dérivées du retournement temporel. La technique qui a été dernièrement développée permet de compenser les effets de dissipation qui existent dans le crâne et qui brisent l'invariance par renversement du temps. Elle repose sur l'utilisation de techniques de retournement temporel couplées à la correction des effets de dissipation du crâne. En outre, bien que dans la phase finale de focalisation des effets de propagation non linéaire apparaissent, cette technique permet de compenser avec une grande précision les effets de réfraction, d'absorption et de réverbération de la boîte crânienne. Un prototype complet formé de trois cents transducteurs de puissance a été réalisé et testé avec succès *in vivo* sur vingt-deux brebis à l'Institut mutualiste Montsouris. Il a permis de nécroser les tissus biologiques avec une précision millimétrique derrière la boîte crânienne des brebis. Le procédé de focalisation a été testé dans un premier temps, en implantant un hydrophone dans le cerveau pour servir de source de référence (cf. figures 7a et 7b).

Pour éviter l'utilisation de cet hydrophone M. TANTER et al. ont développé une nouvelle approche de source virtuelle qui consiste, après avoir obtenu l'image 3D du crâne par tomogra-

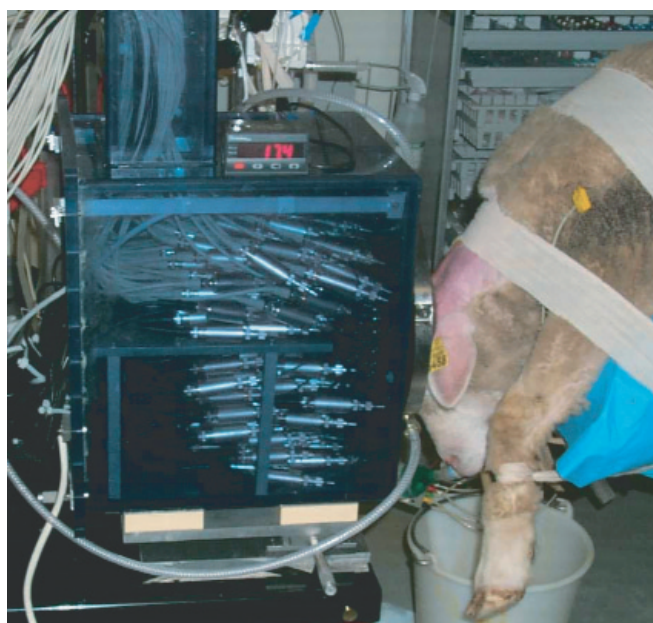


Figure 7a : Dispositif de thérapie ultrasonore par retournement temporel testé sur des brebis.

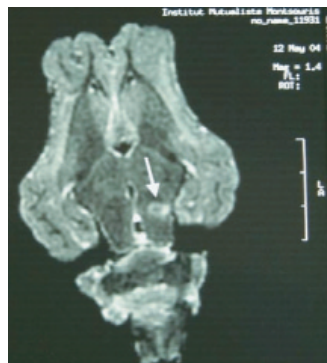


Figure 7b : Image IRM d'un plan de coupe du cerveau de brebis où on observe la nécrose des tissus du cerveau.

phie rayon 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 sources virtuelles. Cette approche a été testée avec succès *in vitro* et le sera prochainement *in vivo* sur l'animal.

Conclusion

La robustesse des expériences de renversement temporel a été vérifiée à la fois dans le domaine des ondes acoustiques et électromagnétiques à des échelles très diverses, qui vont du millimètre à des dizaines de kilomètres avec des longueurs d'ondes très variées. Un point commun à toutes ces expériences est que, plus le milieu de propagation est complexe, plus il est facile de réaliser une expérience de renversement du temps et donc de focaliser une onde sur sa source. Dans de nombreuses applications, l'approche « retournement temporel » apporte des solutions originales qui devraient déboucher sur des réalisations industrielles et médicales.

Bibliographie

- [1] FINK M. Les miroirs à retournement temporel. *Pour la Science*, février 2000, n° 268, p. 66-73.
- [2] FINK M. Time reversed Acoustics. *Physics Today*, mars 1997, n° 20, p. 34-40.
- [3] DE ROSNY J. et FINK M. Overcoming the diffraction limit in wave physics using a time-reversal mirror and a novel acoustic sink. *Physical Review Letters*, 2002, 89 (12), p. 124301.
- [4] BLOMGREN P., PAPANICOLAOU G et ZHAO H.K. Super-resolution in time-reversal acoustics. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2002, 111 (1), p. 230-248.
- [5] LEROSEY G., DE ROSNY J., TOURIN A., DERODE D., MONTALDO G. et FINK M. Time Reversal of electromagnetic waves. *Physical Review Letters*, 2004, 92, p. 194301.
- [6] PRADA C. et FINK M. Eigenmodes of the time reversal operator : a solution to selective focusing in multiple target media. *Wave Motion*, 1994, vol. 20, p. 151-163.
- [7] CHAMBERS D.H. et BERRYMAN J.G. Time-reversal analysis for scatterer characterization. *Physical Review Letters*, 2004, 92 (2), Art. n° 023902.



Mathias FINK est professeur à l'Université Denis Diderot (Paris-7) et à l'École Supérieure de Physique et Chimie Industrielles (« PC »), où il dirige le Laboratoire Ondes et Acoustique. Il est membre de l'Académie des sciences et de l'Académie des technologies, et a reçu la médaille d'argent du CNRS ainsi que le grand prix Gaz de France. Ses recherches concernent la physique des ondes dans les milieux complexes et ses applications, en particulier à l'imagerie médicale et à la thérapie par ultrasons. Depuis quelques années, ses activités se sont diversifiées vers les télécommunications, la sismologie et l'acoustique sous-marine.