

Le retournement temporel

Composition et décomposition des ondes sonores

Introduction

Il est frappant de constater à quel point le terme de « temps » est employé avec désinvolture dans le langage courant, jusque dans des expressions universellement et quotidiennement utilisées. Le concept de temps nous est à la fois extrêmement familier, et totalement mystérieux : c'est l'un des paradoxes qui deviennent troublants dès lors qu'on s'intéresse à cette grandeur physique insaisissable.

L'une des questions les plus fascinantes concerne probablement l'irréversibilité de son écoulement. Pourquoi nous déplaçons-nous toujours du passé vers l'avenir, sans jamais pouvoir rebrousser chemin ? Existe-il des phénomènes réels qui soient réversibles, et si oui sous quelles conditions ?

C'est sur la piste de la réversibilité que les expériences de retournement temporel nous emmènent : elles cherchent à déterminer si, dans certaines conditions, un phénomène physique particulier peut être *renversé* après avoir été observé dans son sens habituel : s'il est possible, en somme, qu'il se déroule *à l'envers*.

I Communication, détection et réversibilité

I.1 Pourquoi les ondes ?

Une information peut être propagée grâce à divers phénomènes physiques, notamment les phénomènes ondulatoires et la diffusion. C'est par l'analyse des ondes lumineuses et sonores qui nous parviennent que nous reconstituons notre environnement visuel et auditif (avec, certes, des limites de fréquences dans les deux cas). Mais les phénomènes diffusifs propagent eux aussi de l'information, et certaines hypothèses leur accordent un rôle dans la communication à très petite échelle (phénomènes biologiques de communication entre les cellules, etc.).

Dans une expérience de retournement temporel, pourquoi donc avoir choisi de renverser des ondes plutôt qu'une propagation par diffusion ?

I.2 Invariance par renversement du temps

La question précédente trouve sa réponse dans les équations qui régissent, dans une zone sans source, d'une part la propagation ondulatoire d'une grandeur ψ (par exemple la pression acoustique) dans un milieu non dissipatif :

$$\Delta\psi - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2\psi}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

et d'autre part la diffusion d'une grandeur ϕ (par exemple la concentration d'encre dans de l'eau) :

$$\Delta\phi - \frac{1}{D} \frac{\partial\phi}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

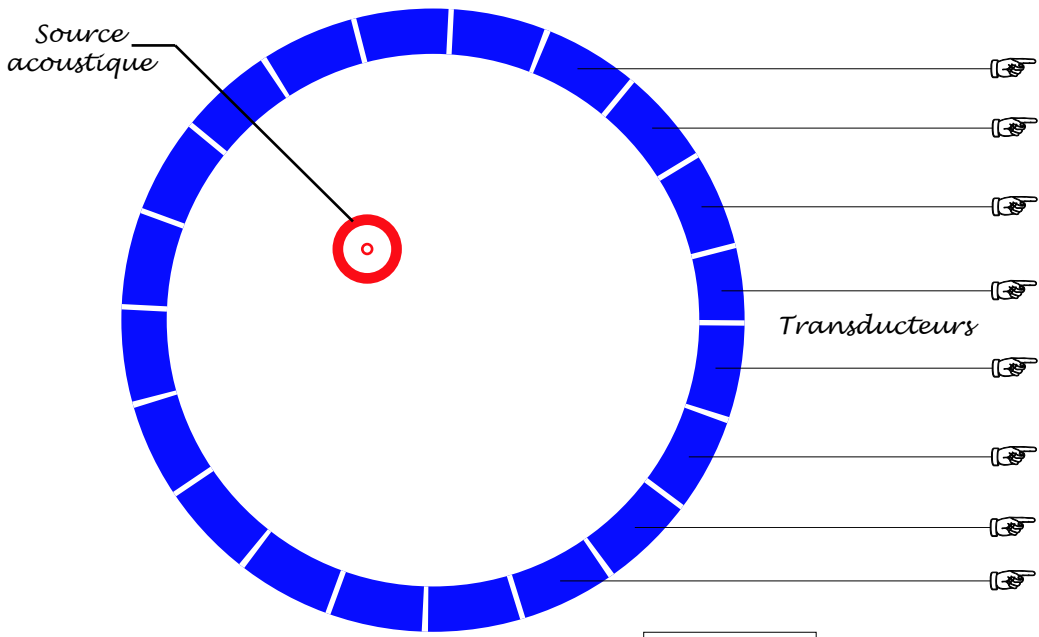
En effet, en changeant t en $-t$, on observe que si la fonction $t \mapsto \psi(r, t)$ est solution de (1), alors $t \mapsto \psi(r, -t)$, obtenue par renversement du temps, l'est également. Ceci n'est pas vrai pour l'équation (2).

On constate donc que l'opérateur d'alembertien est invariant par renversement du temps grâce à la présence d'une *dérivée seconde par rapport à t* , alors que l'équation de diffusion laisse apparaître une dérivée première.

I.3 Interprétation et conséquences

La propriété d'invariance par renversement du temps a des conséquences importantes sur le problème de la détection des objets. Il s'agit en effet de reconstituer la source grâce au champ dont elle est la cause. Ainsi, le cristallin de l'œil (lentille) reforme l'image de l'objet observé à partir des ondes divergentes qui lui parviennent : tout se passe comme s'il « renversait » lui aussi le temps, d'une certaine manière, en faisant suivre à ces ondes un trajet symétrique de celui de leur passé immédiat. Ceci est possible grâce au caractère réversible de la propagation ondulatoire.

Détecter la position d'un objet émettant des particules diffusives (par exemple des molécules odorantes) avec des détecteurs immobiles serait en revanche impossible, même avec une sorte de « rétine » constituée d'un grand nombre de nez !



Interface
+
Ordinateur

Figure 1

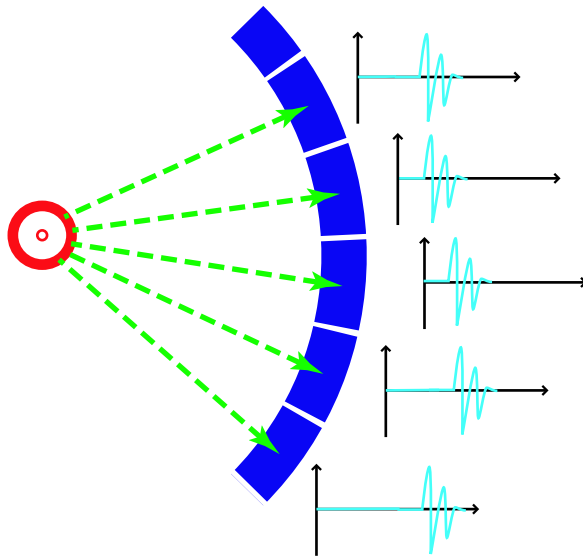


Figure 2

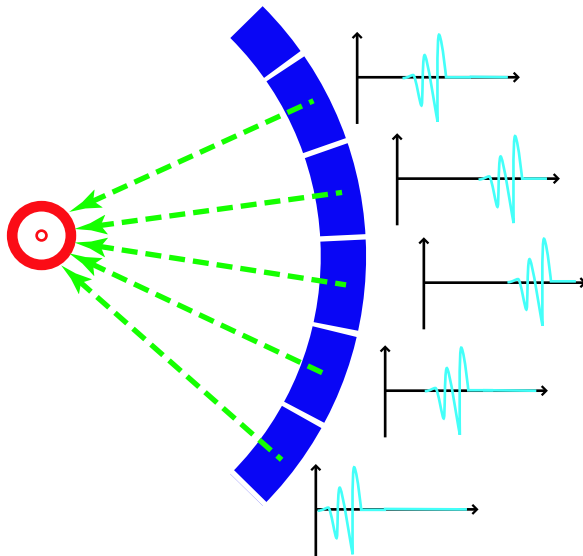


Figure 3

II Principe du retournement temporel

II.1 Dispositif théorique simple

En première approche, on peut considérer le montage schématique représenté sur la figure 1 ci-contre. La source est placée à l'intérieur d'une cavité acoustique, idéalement constituée d'une surface fermée tapissée sur sa paroi intérieure de transducteurs piézo-électriques. Les récepteurs sont reliés, comme la source, à une interface informatique qui permet de contrôler facilement à la fois le signal émis et l'enregistrement du champ de pression perçu par le réseau de transducteurs.

II.2 Démarche

On émet avec la source une onde impulsionnelle (« cri » de très courte durée) dans le domaine des ultrasons et on enregistre le champ de pression au niveau des transducteurs. Les différents signaux sont échantillonnés et stockés dans la mémoire de l'ordinateur (figure 2).

Chacun de ces signaux est ensuite renversé temporellement, puis réémis en même temps que tous les autres (figure 3) afin de reconstituer une onde qui converge vers la source.

Cette dernière est enfin utilisée comme récepteur et le signal reçu est analysé. On s'attend donc à retrouver, au niveau de la source, l'allure de l'impulsion de départ.

II.3 Défauts de la cavité acoustique

Le montage proposé n'est pourtant pas celui qu'on utilise expérimentalement ; la seule réalisation de la cavité est déjà délicate, à cause du nombre de transducteurs nécessaires. En effet, outre l'échantillonnage temporel introduit par l'ordinateur, la disposition régulière des transducteurs sur la surface constitue un échantillonnage spatial. Or, le critère de Shannon stipule qu'afin d'obtenir un signal fidèle à l'original, la fréquence d'échantillonnage doit être au moins égale au double de la fréquence la plus élevée contenue dans le signal à analyser (ce critère étant valable aussi bien dans le domaine temporel que dans le domaine spatial). Ceci revient, dans notre cas, à choisir un pas entre deux transducteurs de l'ordre de la demi-longueur d'onde des ultrasons utilisés. Il faudrait ainsi, pour une cavité sphérique de 5 cm de rayon et une fréquence centrale de 3,2 MHz, tapisser la surface d'environ 60 000 transducteurs, ce qui est évidemment irréalisable, ne serait-ce que pour des raisons de stockage de l'information ou de coût du matériel.

Il existe un autre détail important, qui n'est pas tant un problème pour l'expérimentation qu'un moyen de comprendre le phénomène : pour observer une scène parfaitement renversée temporellement il faudrait que la source acoustique soit devenue, pendant la phase de retournement temporel, un « puits » acoustique. En effet, les ondes ayant reconvergé au niveau de la source continuent bien entendu de se propager, redevenant divergentes, et interfèrent avec celles qui sont encore convergentes. Ce phénomène permet d'expliquer d'une manière plutôt originale les limites de diffraction (les plus petits détails observables sont de l'ordre de la longueur d'onde).

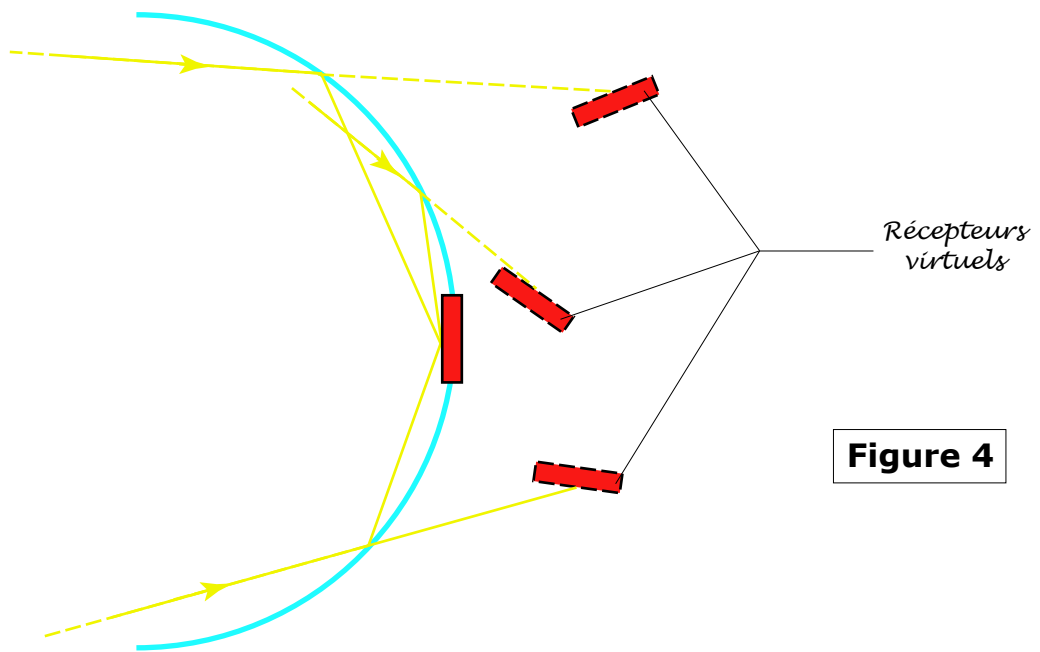


Figure 4

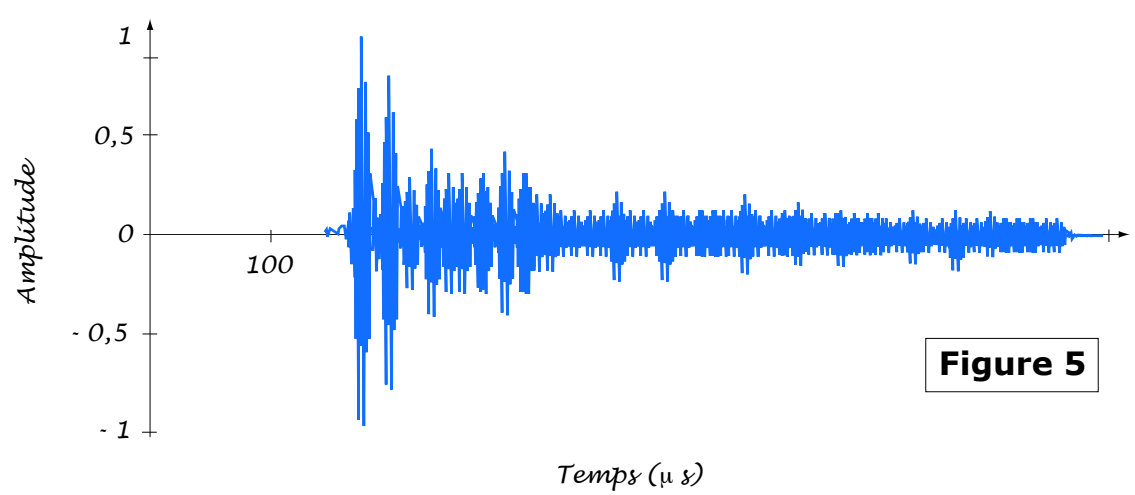


Figure 5

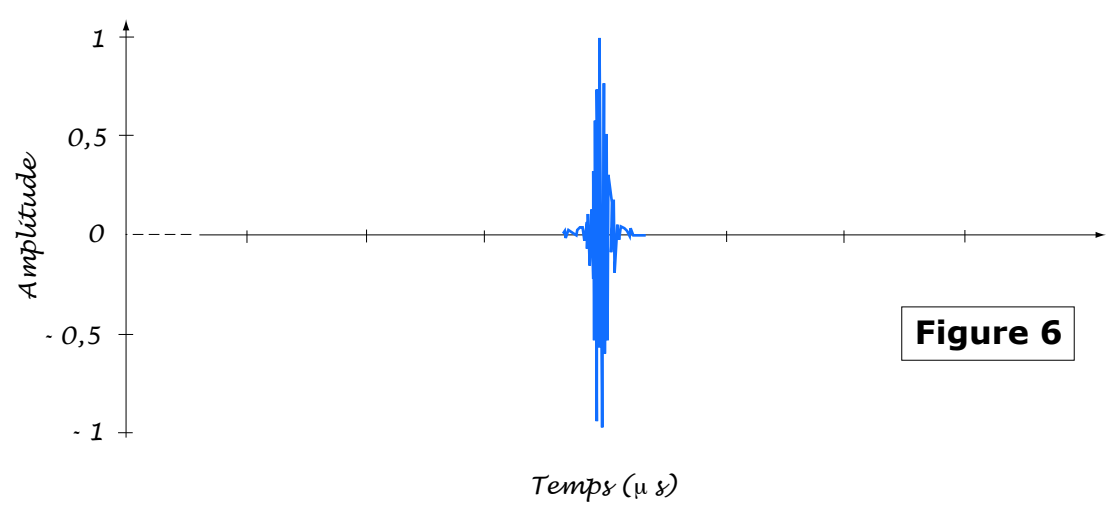
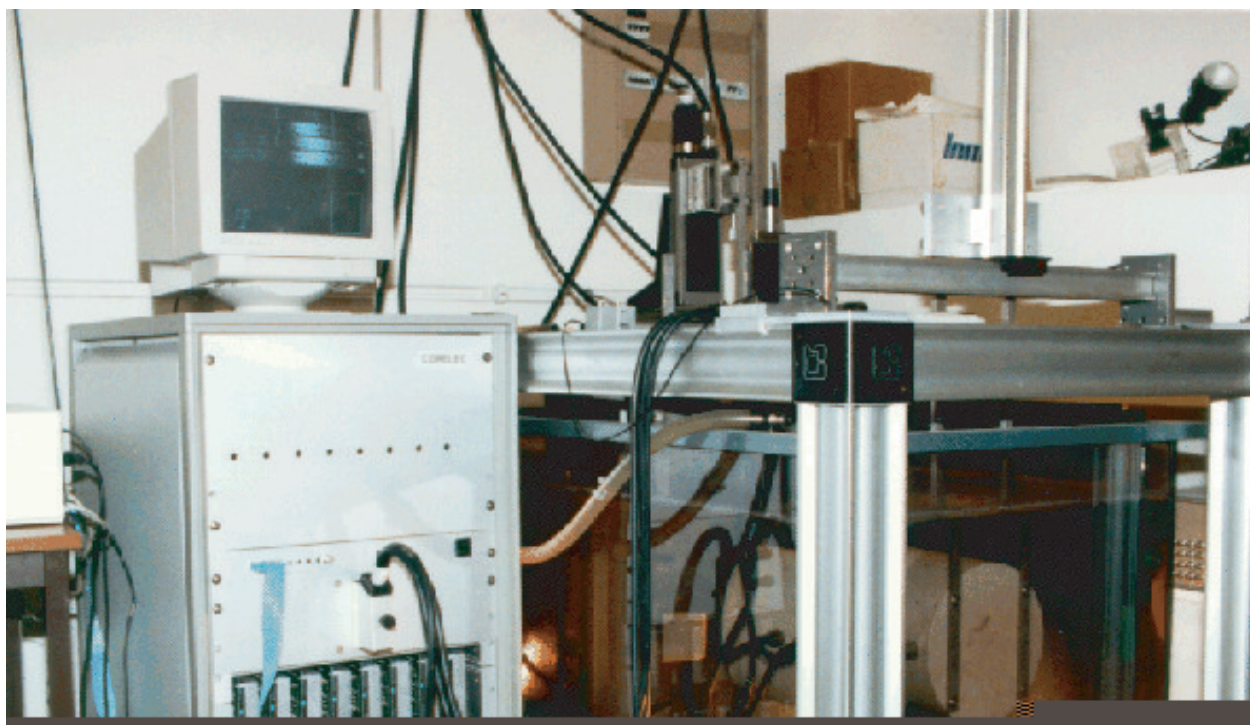
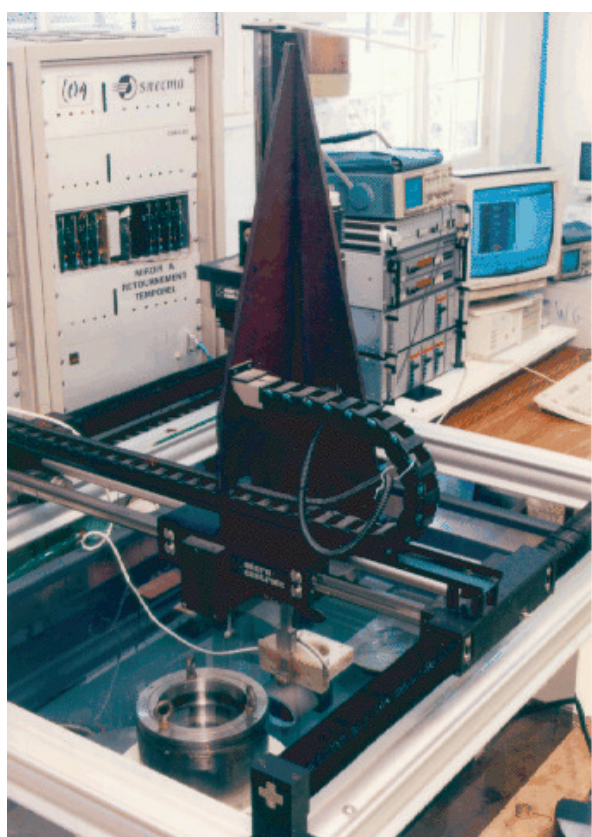


Figure 6



Miroir à retournement temporel destiné à la lithotritie (destruction des calculs)



Miroir à retournement temporel destiné au contrôle non destructif du titane

III Expérimentation

III.1 La réflexion et l'hécatombe des transducteurs

Étant donné l'impossibilité de réaliser une cavité à retournement temporel complète, il a fallu trouver le moyen de ne travailler qu'avec un nombre limité de transducteurs : un miroir à retournement temporel. Un tel miroir a une ouverture angulaire limitée et ne capte qu'une partie de l'énergie émise par la source, ce qui compromet fortement la qualité de la refocalisation puisque la source est, elle, omnidirectionnelle. La solution à ce problème a été de disposer autour de la source des *parois réfléchissantes* (d'impédance acoustique très élevée devant celle de l'air) qui permettent de rediriger vers le miroir, grâce à des réflexions multiples, toute l'énergie provenant de la source. Ceci revient en réalité à créer un nombre colossal de miroirs virtuels, images par les parois réfléchissantes du miroir réel (figure 4). L'expérience montre même que la refocalisation s'effectue de manière tout à fait correcte avec *un seul transducteur* en réception.

III.2 Résultats

Les résultats expérimentaux apparaissent ci-contre : la figure 5 donne l'allure de la pression captée par l'unique récepteur au cours du temps, tandis que la figure 6 représente l'allure du champ reçu au niveau de la source après refocalisation. Si l'on a encore à l'esprit les résultats de la mécanique classique sur l'instabilité exponentielle des trajectoires (boules de billard...) vis-à-vis des conditions initiales, cette refocalisation des multiples ondes réfléchies en une seule impulsion est tout à fait remarquable, et d'autant plus surprenante que l'on n'opère qu'avec un seul transducteur.

III.3 Variantes et perfectionnements

D'autres expériences ont été faites en intercalant, entre la source et le miroir, un milieu désordonné (disposition aléatoire de petites tiges d'acier, ou de petites billes de verre, maintenues en place par un gel) ; le miroir à retournement temporel est composé d'une centaine de transducteurs. Les ondes subissent alors des diffusions multiples dans le milieu désordonné : après avoir été retournées et réémises, elles repartent vers la source avec une ouverture angulaire *indépendante du miroir*. Ainsi, la refocalisation est encore meilleure que dans l'expérience précédente, en dépit de la faible ouverture angulaire du miroir à retournement temporel.

Il est également possible d'effectuer le même type d'expérience à l'aide de guides d'ondes, qui constituent un bon exemple de cavité réfléchissante puisque le milieu de propagation est borné par des interfaces fortement réfléchissantes (la source et le miroir sont alors placés aux deux extrémités du guide). Ce dispositif expérimental a l'avantage de caractériser facilement la focalisation spatiale (et non plus seulement temporelle) du champ de pression retourné dans le plan de la source : il suffit pour cela de déplacer le transducteur source (devenu récepteur) dans ce plan.

Conclusion

Le retournement temporel, grâce à la refocalisation très précise qu'il permet, peut non seulement être appliqué à la simple détection d'objets comme en imagerie médicale ou dans l'industrie (détection de microfissures dans des pièces métalliques par contrôle non destructif), mais aussi à la destruction par élévation de température. En effet, en concentrant la puissance de multiples ondes ultrasonores en une région très précise de l'espace, on peut par exemple détruire un calcul rénal en le chauffant, sans endommager aucun des tissus voisins.

Si l'on ajoute à tout ceci les capacités de ce type de dispositif à s'adapter aux inhomogénéités du milieu (le corps humain par exemple) et aux évolutions de celui-ci au cours du temps, là où d'autres techniques en sont incapables (on estime qu'en imagerie X, plus des deux tiers des tirs ratent leur cible et entraînent des dommages sur les tissus environnants), on peut supposer que le retournement temporel aura, dans de nombreux domaines d'application, un avenir plus que radieux.

Choix du sujet

Le problème de l'écoulement du temps a intrigué des générations de physiciens : c'est un phénomène à la fois familier, immédiatement observable, et. J'ai toujours été fasciné par ce paradoxe qui fait que chacun sait ce qu'est le temps et en parle sans arrêt dans la vie de tous les jours, mais a le plus grand mal à le définir de manière rigoureuse. Mon intérêt pour la théorie de la relativité restreinte qui affirme que le temps *n'est pas* une grandeur indépendante des trois dimensions d'espace n'a fait qu'augmenter ma curiosité quant à son écoulement parfois irrégulier et, surtout, inexorablement unidirectionnel.

Les expériences de retournement temporel donnent peut-être un début de réponse à toutes ces interrogations en montrant le caractère réversible expérimentalement (et non seulement en théorie) de la propagation d'ondes, même si elles n'étudient pas directement la possibilité d'un renversement effectif de la flèche du temps.

Plutôt que de comprendre le thème proposé cette année du point de vue de l'analyse et de la synthèse de molécules organiques, ou encore en termes de décomposition spectrale d'une fonction périodique (onde électromagnétique, signal électrique, étude de la transformation de Fourier...), j'ai préféré travailler, non pas seulement sur une onde isolée, mais sur un objet entier qui émet des ondes dans toutes les directions. Le dispositif du miroir à retournement temporel m'a ainsi paru tout à fait adapté, dans le sens où il *décompose* l'image sonore d'une source ponctuelle en analysant l'onde divergente qu'elle émet, la renverse, et *recompose* à partir d'elle une onde convergente qui permet finalement de *reconstituer* l'objet émetteur.

Rencontres

Le laboratoire « Ondes et Acoustique », associé à l'Université Paris VII et au CNRS (en 1992), porte principalement son activité sur la propagation des ondes ultrasonores dans des milieux variés. J'ai pu y dialoguer avec Didier Cassereau et Arnaud Derode qui a, entre autres, étudié le retournement temporel dans les milieux désordonnés ; j'ai également pu rencontrer Mathias Fink, l'inventeur du dispositif de miroir à retournement temporel.

Bibliographie

- M. FINK, *Les miroirs à retournement temporel*, Pour la science n° 268, 2000.
- A. DERODE, P. ROUX, M. FINK, *Ultrasons : remonter le temps malgré le désordre*, La Recherche n° 291, 1996.
- A. DERODE, P. ROUX, M. FINK, *Robust acoustic time reversal with high-order multiple scattering*, Physical Review Letters, Vol. 75, 23, p. 4206–4209, 1995.
- P. REFREGIER, *Théorie du signal*, Masson, 1993.
- J-M. BRÉBEC, *Ondes*, Hatier, 1997.