

Texte de la 350^e conférence de l'Université de tous les savoirs donnée le 15 décembre 2000.

**Le renversement du temps en acoustique
Par Mathias Fink**

Nous vivons dans un environnement qui nous paraît pratiquement toujours irréversible : Lorsqu'on fait tomber une goutte d'encre dans de l'eau, on voit le colorant diffuser et on ne voit jamais réapparaître au sein du liquide la goutte d'encre initiale. Cette apparente irréversibilité du monde macroscopique a toujours intrigué les physiciens dans la mesure où les équations de la physique microscopique et de la mécanique sont, elles, parfaitement réversibles. Il y a eu et il y a toujours de nombreux débats sur ce thème, et nous savons que, pour expliquer cette tendance vers l'irréversibilité, le physicien Ludwig Boltzmann a introduit le concept d'entropie qui mesure en quelque sorte le désordre d'un système de particules. Il a montré que lorsque l'on s'intéresse à un système de particules qui interagissent (de façon élastique) entre elles, et lorsque ce système est isolé du reste de l'univers, la tendance naturelle de l'ensemble des particules est d'évoluer vers le plus grand désordre c'est-à-dire vers une entropie maximale. Il faut remarquer cependant que cette croissance de l'entropie d'un système de particules n'est observée que dans les systèmes parfaitement isolés. Lorsqu'un système est en interaction avec l'extérieur et peut échanger aussi bien des particules que de l'énergie, on peut observer lorsque le système est maintenu hors d'équilibre une apparition d'ordre dans le système. Ce domaine a été exploré de façon très approfondie ces dernières décennies en physique non linéaire à la suite des travaux précurseurs de Ilya Prigogine. Le problème qui nous intéresse ici est différent, il s'agit de savoir s'il est possible d'exploiter la réversibilité qui existe à l'échelle microscopique pour réaliser en laboratoire des expériences macroscopiques que l'on fait évoluer dans les deux sens : de l'ordre vers le désordre et ensuite de façon parfaitement symétrique du désordre vers l'ordre. Quel dispositif doit entourer notre système de particules en interaction pour pouvoir inverser la dynamique de ces particules sur commande ?

Pour aborder ce problème il faut d'abord comprendre ce que signifie l'assertion : la physique microscopique est réversible ? Cette affirmation est fondamentalement liée au principe de la dynamique que Newton a énoncé et qui dit la chose suivante : Lorsque vous avez une particule d'une certaine masse qui est soumise à une force, cette particule va se déplacer avec une vitesse qui évoluera au cours du temps et son accélération (dérivée de la vitesse par rapport au temps c'est-à-dire taux de variation de la vitesse par unité de temps) sera proportionnelle à cette force. C'est bien l'accélération de la particule qui est proportionnelle à la force et non pas sa vitesse (comme on le pense souvent à tort). Or la vitesse d'une particule est elle-même la dérivée de la position de la particule par rapport au temps, ce qui implique que c'est la dérivée seconde par rapport au temps de la position de la particule (l'accélération) qui est proportionnelle à la force : $F = m\gamma$ où γ est l'accélération. C'est ce fait relativement étrange qui implique que les lois de la mécanique sont réversibles. Si, par exemple, vous observez les trajectoires de deux boules de billard qui peuvent interagir, leurs positions au cours du temps vont respecter la loi de la dynamique. Ces deux boules peuvent se cogner ou peuvent interagir à travers différentes forces. Ce que dit l'équation de la dynamique sur la réversibilité de cette expérience, c'est la chose suivante : si deux physiciens très adroits étaient capables d'arrêter, à un instant donné, ces deux boules de billards tout en mesurant exactement leur vitesse (au moment où ils les arrêtent) et si, plus tard, ils étaient capables de les renvoyer, de façon parfaitement synchrone, en leur communiquant une vitesse opposée, et bien, ces deux boules n'auront pas d'autres possibilités que de revivre pas à pas leur vie passée, c'est-à-dire de parcourir leur trajectoire initiale en sens inverse (pour un

système de particules indestructibles, refaire leur trajectoire en sens inverse c'est revivre leur vie passée !).

On imagine aisément les difficultés expérimentales qui se posent pour réaliser ce genre d'expérience avec deux boules qui s'entrechoquent (il faudrait de remarquables joueurs de billard) et on peut légitimement se poser la question de la réalisation de telles expériences sur un système encore plus compliqué formé de milliers de boules qui s'entrechoquent.

Théoriquement au moins, si on pouvait arrêter, mesurer et renvoyer l'ensemble des boules en marche arrière avec les bonnes vitesses : toutes les trajectoires se dérouleront en sens inverse et les mêmes collisions auront lieu dans une chronologie inversée comme si on passait un film à l'envers. Est-il possible de réaliser de telles expériences ? Avant de réaliser l'expérience, on peut au moins la simuler dans un ordinateur qui a été programmé pour effectuer les calculs des trajectoires de chaque particule en respectant scrupuleusement la loi de la dynamique. On part, par exemple de 1 000 boules en interactions et on suit à chaque instant la position et la vitesse de chaque boule. Puis, à un instant donné, on arrête le système de particules et on inverse toutes les vitesses afin de renvoyer les boules en marche arrière. On applique toujours la loi de la dynamique et on observe le système évoluer. Et bien la déception est de taille : ça ne marche pas ; au début, les boules repartent sur leur trajectoire initiale, mais après une dizaine de collisions effectuées exactement en marche arrière, le système se met à dégénérer, et on n'arrive pas à reconstituer le passé du système. Pourquoi ?

Parce qu'un ordinateur a une précision finie, et lorsqu'on mesure la position et la vitesse de chaque particule on obtient, dans la mémoire de l'ordinateur, des chiffres représentés avec une précision finie qui dépendent du nombre de bits sur lesquels on échantillonne le signal. On se heurte alors au problème fondamental de la physique classique : le chaos déterministe. La moindre erreur dans la mesure ou dans la préparation du système de particules va s'amplifier de façon exponentielle avec le temps. Typiquement une erreur de mesure de 10^{-15} suffit, sur une machine travaillant avec une précision de 64 bits, pour perdre l'évolution réversible après 10 collisions. L'erreur initiale est tellement amplifiée qu'après quelques collisions les particules ne retrouvent plus leurs anciens partenaires. Cette sensibilité exponentielle aux erreurs fixe les limites d'une telle expérience. C'est le même phénomène qui interdit aussi de prévoir le climat une semaine à l'avance. Devant une telle constatation et devant le succès des théories du chaos déterministe, il semble donc que bien que la physique microscopique soit réversible, on ne pourra jamais, avec nos moyens limités, renverser le temps dans une expérience de physique. Heureusement, ce qui vient d'être dit ne concerne que le monde des particules classiques (approximation du monde quantique). Si l'on s'intéresse à l'évolution d'une onde au cours du temps la situation est beaucoup plus sympathique, et les ondes se rencontrent dans tous les domaines de la physique depuis la mécanique quantique en passant par l'électromagnétisme ou par l'acoustique.

C'est dans ce dernier domaine typiquement macroscopique que des expériences de renversement du temps peuvent être réalisées relativement facilement. Les ondes acoustiques évoluent dans des systèmes de particules où le nombre des particules est extraordinairement grand, bien plus grand que les 1 000 particules dont nous parlions tout à l'heure. Les systèmes de particules (les molécules) qui nous intéressent en acoustique peuvent être des gaz, des liquides ou des solides. À côté des mouvements d'agitation désordonnés de chaque molécule qui existent à toutes les températures (différentes du zéro absolu), il existe des mouvements coordonnés de ces particules qui sont décrits par les ondes acoustiques. Lorsqu'une personne parle, le mouvement vibratoire de ses cordes vocales se répercute sur les molécules d'air et de proche en proche se répand un mouvement vibratoire des molécules d'air autour de leur position d'équilibre. Ce qui est important, c'est que ces mouvements sont des mouvements d'ensemble où toutes les molécules bougent en phase sur des distances qui sont caractérisées par la longueur d'onde de l'onde acoustique. Sur une échelle de l'ordre de la longueur d'onde

(ou plutôt du dixième de la longueur d'onde), c'est l'ensemble des particules qui bouge de façon coordonnée et non pas chaque particule qui bouge indépendamment les unes des autres.

Pour ces mouvements collectifs, qui respectent eux aussi les lois de la dynamique, et dont l'évolution dans le temps peut être très compliquée dans le cas de la propagation acoustique dans des milieux complexes (réfraction, réflexion, diffraction), les acousticiens ont la chance unique de disposer de deux instruments très performants qui peuvent être reproduits à des milliers d'exemplaires et qui sont le microphone et le haut-parleur.

Que fait un microphone ? Lorsqu'un microphone est positionné à un endroit où les particules sont mises en mouvement par le passage des ondes acoustique, le choc de ses particules sur la membrane du microphone génère un courant électrique proportionnel à la vitesse des particules. Un microphone mesure donc localement la vitesse des particules. Que fait un haut-parleur ? Lorsqu'on envoie un courant électrique dans un haut-parleur, la membrane du haut-parleur se met en mouvement à une vitesse proportionnelle à ce courant. Elle communique alors aux molécules d'air avec laquelle elle est en contact cette vitesse. Si on savait réaliser localement les deux fonctions microphone puis haut-parleur, on disposerait alors du physicien de base idéal pour réaliser une expérience de renversement du temps. Or, nous disposons dans le domaine de la physique de petits gadgets qu'on appelle des transducteurs piézo-électriques qui remplissent parfaitement cette double fonction (ce sont des transducteurs réversibles). La piézo-électricité propriété découverte par Pierre Curie est un phénomène réversible qui se manifeste dans certains cristaux pour lesquels une contrainte appliquée engendre l'apparition d'un courant électrique, et dans lesquels réciproquement l'injection d'un courant électrique déforme le cristal.

Fort de ces dispositifs une expérience de renversement du temps peut s'envisager en acoustique en réalisant ce que nous avons appelé une cavité à renversement temporel. Les parois de cette cavité sont tapissées de transducteurs piézo-électriques reliés chacun à une mémoire électronique de grande taille.

Quelque part au sein de la cavité, un cri est émis par une source quelconque (les cris dont nous parlons peuvent être sonores ou ultrasonores, et c'est dans le domaine des ultrasons que ces dispositifs ont d'abord été réalisés, les longueurs d'onde ultrasonores qui nous intéressent sont millimétriques, alors que les longueurs d'onde sonores sont plutôt décimétriques). Ce cri va mettre en vibration les molécules du milieu situées à l'intérieur de la cavité. Si par exemple la vitesse du son est constante dans la cavité et si le cri émis part dans toutes les directions (source omnidirectionnelle) l'onde acoustique se répandra de façon parfaitement symétrique dans l'espace (on parlera d'onde sphérique). Si par contre le milieu de propagation est complexe, par exemple, rempli de nombreux obstacles et de matériaux dans lesquels la vitesse du son change, le front d'onde se déformera et l'onde ne gardera plus son caractère sphérique et on verra apparaître de nombreux échos sur les obstacles qui briseront la symétrie spatiale de l'onde émise initialement. Le son perçu par un observateur pourra être différent du cri initial, les effets de réverbération et de déformation de l'onde pourront dans certain cas le rendre incompréhensible.

Dans une expérience de renversement du temps¹, on tapisse les parois de la cavité de dispositifs réversibles qui jouent alternativement le rôle de microphones et de haut-parleurs (**figure 1**). Chaque microphone mesure l'onde acoustique qui l'atteint et tous les signaux électriques sont enregistrés dans des mémoires électroniques rapides, identiques à celles utilisées en informatique. On mesure ainsi au cours du temps la vitesse des particules qui cognent les microphones sur toute la surface de la cavité. Une fois que l'intérieur de la cavité est devenu parfaitement silencieux, quand toute l'énergie sonore a été convertie par les microphones en électricité, on passe à la phase de renversement du temps. Il s'agit alors de

¹ M.Fink "Time reversed Acoustics" *Physics Today*, 20, p.34-40, Mars 97.

relire l'ensemble des mémoires électroniques en verlan. Plus exactement on inverse la chronologie des signaux sonores reçus par chaque microphone. Les signaux arrivés les derniers sont relus en premiers et vice versa. Chaque microphone passe alors en mode haut-parleur et est alimenté en verlan par les mémoires électroniques. L'ensemble de ces haut-parleurs émet alors en parallèle une gigantesque onde sonore suivant une chronologie inversée, et du fait de la réversibilité des lois de la dynamique, cette onde sonore n'a pas d'autre possibilité que de revivre pas à pas toutes les étapes de sa vie passée pour reconverger finalement très précisément sur la source sous la forme du cri initial prononcé en verlan.

Figure 1

Parmi les différents dispositifs que nous avons réalisés dans notre laboratoire, une cavité à retournement temporel fonctionne dans le domaine audible. Elle est formée de 70 couples de microphones-haut parleurs qui ceinturent une pièce de grande dimension. Une personne située dans la pièce dit « bonjour » et les 70 microphones fonctionnent en mode « retournement temporel ». Ils génèrent alors une onde acoustique qui revient alors en marche arrière vers l'interlocuteur et converge vers sa tête sous la forme d'un signal qui ressemble à « roujnob ». Si maintenant deux personnes parlent en même temps dans la pièce et prononcent, par exemple, pour l'un « bonjour » et pour l'autre « hello », une fois l'opération de retournement temporel effectuée, chacune des personnes recevra en verlan le message qu'elle a prononcé. On peut compliquer ce petit jeu et si dès le départ chaque personne parle en verlan, alors après la phase de renversement temporel, une personne entendra bonjour et l'autre hello. On peut ainsi au moyen des nombreux haut-parleurs situés dans la pièce envoyer en même temps différents messages aux différentes personnes d'une pièce. En utilisant le concept de renversement du temps le système apprend à réaliser le jeu d'interférences sonores optimal pour focaliser chaque message au bon endroit. Il faut aussi remarquer que tous les défauts de la pièce (réverbérations et diffraction par les obstacles) sont parfaitement corrigés.

Ces expériences de renversement du temps sont étonnamment robustes et permettent de corriger la propagation acoustique dans des milieux très complexes. C'est un problème qui se pose souvent dans le domaine des ultrasons qui sont utilisés pour faire l'image du corps humain, d'un moteur d'avion ou des fonds marins. En médecine, certain patient donne des images ultrasonores floues, il s'agit en général des patients obèses ou très musclés. En effet la technique de focalisation qui est utilisée en échographie pour donner des images nettes ne marche que si la vitesse des ultrasons est constante dans le corps humain, or les couches de graisse et les muscles ont des vitesses ultrasonores sensiblement différentes de celles des autres tissus et les ultrasons ne se propagent plus en ligne droite dans de tels milieux. Comment corriger la déformation des faisceaux ultrasonores dans ces milieux sans connaître la carte exacte des vitesses ultrasonores ? Les techniques de retournement temporel permettent de résoudre ce problème. Une expérience ultrasonore réalisée par Arnaud Derode dans un milieu particulièrement complexe² illustre ce concept. On s'intéresse ici à la propagation d'une onde ultrasonore de fréquence 3 Mhz (c'est-à-dire 3 millions d'oscillation par seconde). C'est une fréquence typiquement utilisée en médecine auquel correspond une longueur d'onde de 0,5 mm dans l'eau ou dans le corps humain. On utilise ici non pas une cavité à retournement temporel qui nécessiterait des dizaines de milliers de transducteurs, mais un petit miroir à retournement temporel formé d'un réseau de 128 transducteurs répartis sur un rectangle de 4 cm. Il est immergé dans une cuve d'eau. Entre le miroir et une source

² A. Derode, P. Roux et M. Fink "Robust Acoustic Time reversal with high order multiple scattering" *Physical Review Letters*, Décembre 1995, Vol 75, 23, p 4206-4209.

acoustique de très faible dimension, on a introduit un milieu très désordonné formé de 2 000 tiges de métal qui résonnent toutes à la fréquence de 3 Mhz. C'est un milieu particulièrement épouvantable pour les ultrasons (**figure 2**). Dans la première phase de l'expérience la source ponctuelle émet un signal ultrasonore très bref dont la durée est de 1 microseconde, soit trois périodes ultrasonores (**figure 3a**). Cette onde brève se propage à travers la forêt de tiges qui la modifie complètement. Seule une faible partie de l'onde initiale se propage en ligne droite, alors que la plus grande partie de l'énergie incidente va subir de très nombreuses collisions qui vont la rendre complètement aléatoire. L'onde initiale se divise en de très nombreuses ondelettes à chaque collision avec les tiges et le processus va se répéter avec, comme résultante, un signal ultrasonore très long (300 microsecondes) qui a l'allure d'un bruit complètement aléatoire qui est observé à la sortie du milieu. Les 128 transducteurs enregistrent ces signaux dont la durée typique est de l'ordre de 300 microsecondes (**figure 3 b**). Après renversement du temps dans les mémoires électroniques les 128 bruits acoustiques sont réémis dans le milieu. On observe alors le signal ultrasonore qui se repropage à travers l'ensemble des tiges et on constate qu'à l'emplacement exact de la source initiale le signal ultrasonore dure maintenant 1 microseconde c'est-à-dire qu'il a exactement retrouvé sa durée initiale (**figure 3c**). Par ailleurs, en explorant latéralement le champ autour du point initial, on constate que l'onde est parfaitement focalisée sur celui ci.

Figure 2 : Dans un premier temps, une impulsion ultrasonore est émise par la source A. Le signal acoustique ayant traversé la forêt de tiges métalliques est capté en B par l'ensemble des transducteurs d'un réseau linéaire de 128 éléments. Dans une deuxième étape, les 128 signaux captés sont réémis vers la forêt de tiges après inversion de la chronologie temporelle, et on peut observer au point source le signal retourné temporellement.

Figure 3a : On observe sur cette figure une portion de 80 μ s du signal capté par un des éléments de la barrette de transducteurs. La durée totale du signal est de plus de 300 μ s, à comparer avec la durée du pulse initial de 1 μ s.

Figure 3b : On retrouve au point A un signal dont la durée est pratiquement de 1 μ s après l'opération de retournement temporel.

Cette expérience de recompression temporelle et spatiale d'un signal multidiffusé illustre bien l'efficacité étonnante du renversement temporel pour les ondes acoustiques. Elle montre aussi la très faible sensibilité aux conditions initiales de l'expérience. Les signaux enregistrés et retournés dans les mémoires sont échantillonnés par des convertisseurs analogiques/digitaux d'une dynamique de 8 bits fonctionnant à 20 Mhz de fréquence d'échantillonnage. Néanmoins la quantité d'information que nous avons captée et retournée est suffisante pour assurer une bonne propagation inverse à travers les 2 000 tiges. Curieusement, un petit miroir à retournement temporel, qui pourtant ne capte le champ ultrasonore que sur une faible ouverture angulaire (comparé à une cavité à retournement temporel) permet de réaliser une expérience de renversement du temps de très bonne qualité pourvu que le milieu traversé soit très hétérogène et très diffusant. 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 envoyé dans ce gaz est typiquement chaotique. Deux boules lancées au sein de ce système de tiges sur des trajectoires voisines suivent, après un certain nombre de rebonds, des trajectoires qui s'écartent l'une de l'autre suivant une loi exponentielle. 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 bien moins chatouilleuse et beaucoup plus robuste.

Plus étrange encore, on constate dans nos expériences que plus le milieu a un comportement chaotique, moins le nombre de transducteurs, nécessaires pour réaliser une expérience de renversement du temps sur un champ ondulatoire, est grand. Nous avons même montré qu'en utilisant *un unique transducteur de très petite taille et réversible*, on pouvait effectuer un renversement du temps quasi parfait en entourant le milieu de propagation par des bords parfaitement réfléchissants disposés suivant des géométries très particulières qui sont celles des billards chaotiques. La théorie de ces billards chaotiques a été élaborée par plusieurs mathématiciens russes (Sinai, Bunimovitch). L'idée qui nous guidait ici était 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 était plus astucieux d'entourer la source de murs réfléchissant capable de rediriger vers un unique transducteur toutes les composantes de l'onde (tous les rayons). Certaines géométries de billard ont cette propriété qui est qualifiée chez les physiciens d'ergodicité et les billards en forme de stade sont ergodiques. Chaque trajectoire de la bille passe en attendant suffisamment longtemps aussi près que l'on veut de tous les points du billard. Pour la propagation des ondes, cette notion est plus difficile à formuler, mais nous pouvons dire, qu'en chaque point du billard, l'évolution temporelle de l'onde élastique 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.

Pour réaliser cette expérience³, nous produisons une onde élastique à la surface d'une plaque de silicium qui a la forme d'un disque circulaire tronqué par deux segments parallèles (c'est notre stade chaotique). Cette géométrie assure l'ergodicité du billard. En un point A du billard, la pointe d'un cône d'aluminium solidaire d'un transducteur piézo-électrique est en contact avec la plaque de silicium. Elle oscille très brièvement et engendre des ondes de surface pendant une microseconde. La longueur d'onde de ces ondes est typiquement de 2,5 mm. Une seconde pointe couplée à un capteur piézo-électrique, placée en B, enregistre les oscillations produites par le passage de l'onde. Le signal observé et enregistré en ce point a une durée très longue (**figure 4**). Il est en effet formé d'un premier signal direct qui arrive du point A mais qui est suivi de très nombreuses répliques provenant des réflexions multiples de l'onde entre les bords du billard. Ces signaux se superposent pour donner un champ ondulatoire d'aspect complètement aléatoire. Durant le temps caractéristique de l'enregistrement (plusieurs dizaines de millisecondes) les ondes parcourent plusieurs centaines de mètres et elles traversent le billard des centaines de fois.

Figure 4 : Schéma de l'expérience de renversement du temps à l'intérieur d'une cavité de géométrie ergodique. Les points A et B sont situés sur une plaque de silicium dont les bords ont une géométrie chaotique.

Du signal enregistré au point B, nous extrayons une partie (deux millisecondes) que nous renvoyons du même point, selon une chronologie inversée. On utilise alors une sonde optique pour suivre la progression de l'onde de surface renversée temporellement. On constate qu'après quelques millisecondes, l'onde revient à son point de départ, comme si nous passions le film de la propagation initiale à l'envers (**figure 5**). La focalisation de l'onde autour du point A est optimale à condition que le temps durant lequel l'onde est renvoyée soit au moins égal au temps de Poincaré ou temps d'ergodisation du billard, c'est-à-dire. le temps

³ Draeger, M. Fink "One channel time-reversal of elastic waves in a chaotic 2D-silicon cavity" *Physical Review Letters*, 79 (3), p.407-410, Juillet 1997.

nécessaire pour que toute l'information sur le champ ondulatoire atteigne B. La tache focale obtenue autour de la source à une symétrie circulaire et son diamètre a une dimension égale à la demi longueur d'onde utilisée. Nous avons constaté que l'expérience était très robuste et que de petites perturbations n'empêchaient pas la focalisation de se réaliser.

Figure 5 : On observe autour du point A , au moyen d'un interféromètre optique, la propagation de l'onde retournée temporellement au point B. On peut constater qu'au temps $t = 0 \mu s$, elle se concentre au point source sous la forme d'une tâche de diffraction très symétrique dont la largeur est égale à la demi longueur d'onde.

La conclusion de cette expérience est pour le moins curieuse, les ondes aiment les environnements chaotiques. Elles sont beaucoup plus faciles à manipuler dans ce contexte et le contrôle d'un champ ondulatoire nécessite beaucoup moins de sources dans ces géométries. Plus le milieu est complexe, plus l'onde acoustique retrouve facilement sa source. Renversement du temps ondulatoire et chaos se marient très bien.

Si les expériences décrites précédemment illustre l'intérêt des miroirs à retournement temporel sur le plan fondamental, c'est dans le domaine de l'échographie ultrasonore, que les applications de cette technique sont les plus prometteuses. On a alors une situation différente de celles décrites précédemment, car on ne dispose généralement pas d'une source acoustique active qui envoie une onde qu'on cherche à renverser temporellement. Le problème qui peut être résolu est celui de la détection ou de l'imagerie de cibles réfléchissantes situées derrière des milieux de propagation complexes. C'est un peu comme si on essayait de voir un obstacle derrière un verre dépoli ! 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, la turbulence, 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 la ré-émettre. 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 (**figure 6**). En présence de plusieurs cibles, on peut montrer que l'itération du procédé permet de focaliser rapidement sur la cible la plus brillante.

Figure 6 : Un élément d'un réseau de transducteurs envoie une onde ultrasonore à travers un milieu, de célérité ultrasonore hétérogène, qui déforme le faisceau (phase a). En présence d'une cible réfléchissante (à droite de la figure), une onde réfléchie revient vers le réseau de

capteurs (phase b). Enfin les signaux échographiques sont retournés temporellement et renvoyés vers la cible de façon optimale (phase c).

La première application des miroirs à retournement temporel est *la destruction précise des calculs rénaux* et vésiculaires dans le corps humain. Dans les techniques actuelles de lithotritie la localisation du calcul est réalisée au moyen d'un imageur échographique ou d'une unité de visualisation à rayons X. Bien que la position du calcul puisse dans le cas de l'imagerie X être connue avec précision, la focalisation des ondes ultrasonores, destinées à la destruction, à travers des tissus hétérogènes reste délicate. Autre inconvénient encore plus important, le ou les calculs bougent lors de la respiration et sur des distances qui peuvent atteindre plusieurs centimètres. Or la destruction d'un calcul requiert plusieurs milliers de tirs focalisés sur une zone de quelques mm² et il n'est pas possible actuellement de faire suivre mécaniquement à la sonde d'émission focalisée tous ces mouvements. On considère que dans les dispositifs piézo-électriques actuels plus de 70 % des tirs ultrasonores ratent le calcul.

Le miroir à retournement temporel permet de résoudre ces problèmes. Pour repérer un calcul rénal dans son environnement (autres calculs et parois des organes), on illumine d'abord la zone à explorer. Les signaux réfléchis sont captés et retournés temporellement. Après plusieurs itérations du processus, le faisceau ultrasonore converge vers la zone la plus réfléchissante d'un des calculs. On peut alors, amplifier très fortement les derniers signaux de l'itération afin de détruire la lithiase. Nous avons réalisé et testé, avec l'aide de l'ANVAR un tel dispositif et une version compacte de cet appareil est en développement.

Un autre domaine d'applications des miroirs est celui du contrôle non destructif des matériaux, domaine dans lequel on cherche à détecter et à localiser la présence de petits défauts dans des matériaux solides⁴. Ce problème est particulièrement difficile à résoudre pour des matériaux hétérogènes et pour des pièces de forme géométrique complexe. La pièce à contrôler est généralement immergée dans une piscine dans laquelle un ensemble de transducteurs ultrasonores, fonctionnant en mode échographique, se déplace tout en émettant des faisceaux ultrasonores destinés à balayer et à pénétrer dans la zone d'intérêt. Ces faisceaux sont distordus au passage de l'interface entre l'eau et le matériau solide suivant les lois de la réfraction. L'utilisation d'un miroir à retournement temporel se révèle être une solution particulièrement élégante pour améliorer les performances de détection. Dans le cadre d'une importante collaboration avec la SNECMA, un miroir à retournement temporel formé de 128 voies fonctionnant en temps réel a été réalisé et testé dans notre laboratoire. En utilisant des techniques de retournement temporel itératives, nous avons pu montrer avec François Wu que l'on pouvait détecter des défauts de 0,4 mm à plus de 150 mm de profondeur dans les alliages de titane. C'est une performance bien meilleure que celle obtenue par les autres méthodes ultrasonores de CND. La possibilité de réaliser un véritable autofocus ultrasonore ouvre des perspectives très prometteuses dans le domaine du contrôle des matériaux.

Une autre application médicale très prometteuse du retournement temporel est la thérapie du cerveau par hyperthermie ultrasonore. Il s'agit de focaliser des ultrasons à travers la boîte crânienne en corrigeant les aberrations de la propagation par des techniques dérivées du retournement temporel. La technique que nous avons dernièrement développée avec M. Tanter et J.L Thomas, 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 qui existent dans le crâne et qui brisent l'invariance par renversement du temps. 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 près de 200 transducteurs

⁴ M. Fink "Ultrasound puts materials to the test" *Physics World*, p.41-45, Février 1998.

de puissance est en cours de réalisation. La technique de focalisation ultrasonore que nous avons mise au point est très efficace, et son utilisation en *imagerie ultrasonore du cerveau* est aussi possible.

D'autres applications des miroirs à retournement temporel sont en test en détection et en télécommunications sous-marines. Une équipe de l'Université de San Diego (dirigée par le Prof. Kuperman) et l'OTAN ont testé en mer de très grandes antennes à retournement temporel (100m) qui ont permis de focaliser des ondes acoustiques à des distances de 15 km sur des zones de l'ordre du mètre⁵. C'est la réverbération des ondes acoustiques entre le fond de la mer et la surface qui est exploitée pour obtenir des taches focales très fines. Le pilotage des petits robots téléguidés par retournement temporel acoustique permet d'atteindre des grands débits d'information et l'information n'est envoyée qu'au bon véhicule. De nombreuses applications sous-marines sont en test par plusieurs laboratoires au USA (SCRIPPS, University of Washington et M.I.T), aussi bien dans le domaine des télécommunications croisées et cryptées entre toute une flotte de navires de surface, de sous-marins et de robots sous-marins, que dans la mise au point de barrières acoustiques à retournement temporel, qui dans des chenaux sous-marins très réverbérants permettent de repérer le passage d'une cible de faible dimension (plongeur).

Enfin les techniques de retournement temporel des ondes peuvent aussi s'appliquer à d'autres types d'onde que les ondes acoustiques. En télécommunication par voie Hertzienne vers les téléphones mobiles, ou on utilise des ondes électromagnétiques à des fréquences de quelques GHz, la réverbération des ondes électromagnétique entre les structures d'une ville, limite fortement le débit d'information qui peut être envoyé entre l'antenne émettrice et les téléphones cellulaires. Les techniques de retournement temporel, en exploitant la réverbération en milieu urbain, comme dans le cas des expériences qui ont été faites dans des billards chaotiques, vont permettre de focaliser les messages de façon très précise sur chaque récepteur et le débit d'information pourra alors être augmenté d'une façon très importante. Cette technologie est plus difficile à mettre en œuvre qu'en acoustique du fait des fréquences utilisées qui sont 1000 fois supérieures à celles des ultrasons, mais les progrès de l'électronique rapide permettent maintenant de réaliser des miroirs électromagnétiques à retournement temporel.

Du chaos quantique, à la télécommunication à haut débit en ville, en passant par la thérapie, l'imagerie médicale, le contrôle non-destructif et l'acoustique sous-marine, l'invariance par renversement du temps des équations de la physique peut jouer un rôle important⁶. Contrairement, à l'intuition, la nature chaotique de la propagation dans la plupart des environnements réverbérants n'est pas une limite au contrôle des champs ondulatoires ; elle devient un énorme avantage lorsqu'on exploite astucieusement les symétries de la physique et les progrès vertigineux de l'électronique rendent désormais très accessibles la construction de miroirs à retournement temporel.

⁵ W.A. Kuperman, W.S. Hodgkiss, Hee C. Song, T. Akal, C. Ferla et D. Jackson "Phase conjugation in the ocean: Experimental demonstration of an acoustic time reversal mirror" *J. Acoust. Soc. Am.*, 103, 25-40 (1998).

⁶ M. Fink, D. Cassereau A. Derode, C. Prada, P. Roux, M. Tanter, J-L Thomas et F. Wu « Time-reversed acoustics » *Reports on Progress in Physics, Topical review*, 63, 12 p 1933-1995, Dec 2000.

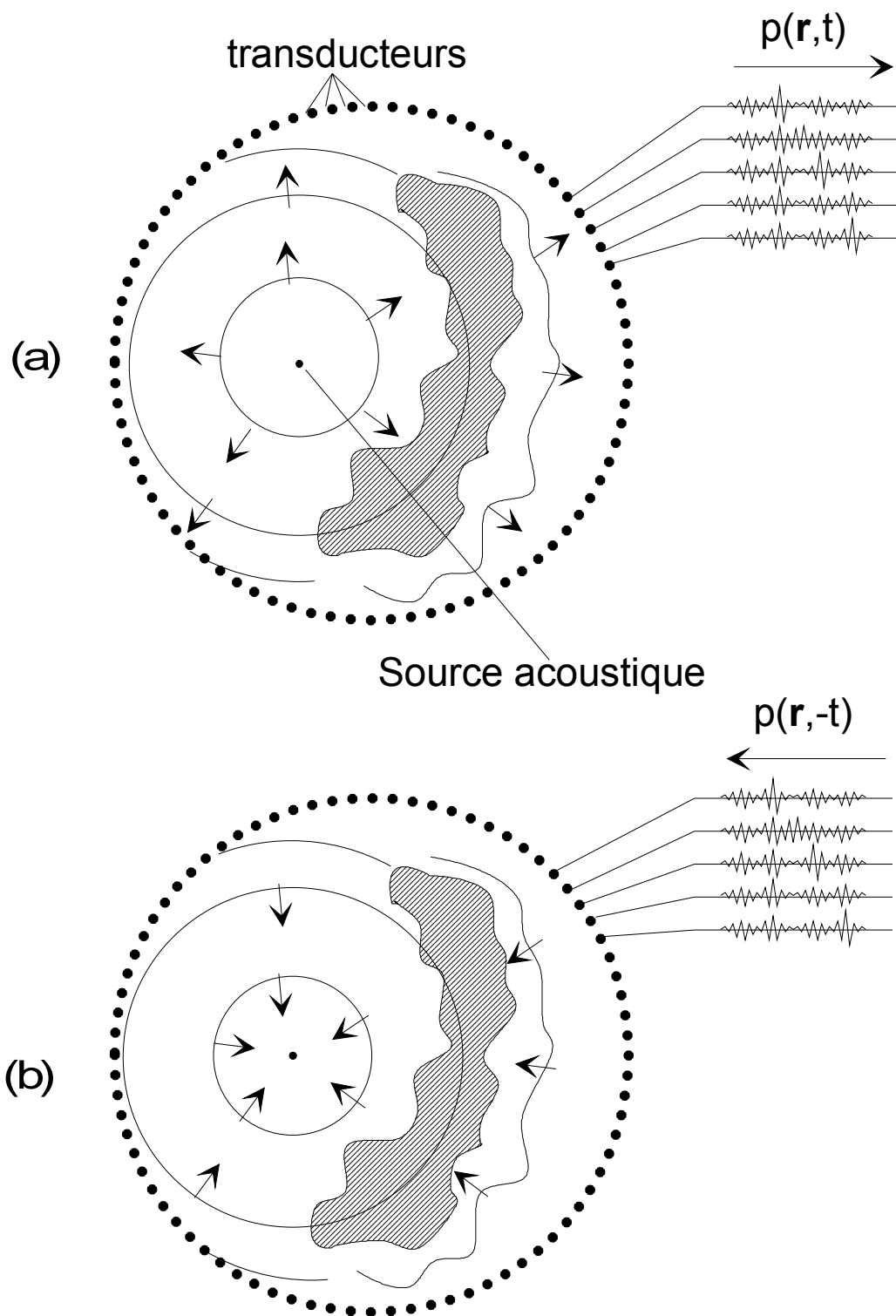


FIG. 1

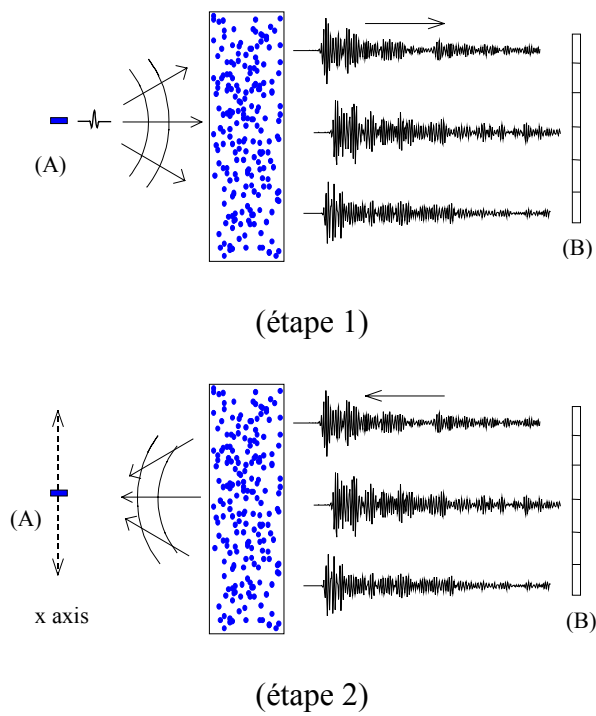


Fig. 2 : Dans un premier temps, une impulsion ultrasonore est émise par la source A. Le signal acoustique ayant traversé la forêt de tiges métalliques est capté en B par l'ensemble des transducteurs d'un réseau linéaire de 128 éléments.

Dans une deuxième étape, les 128 signaux captés sont réémis vers la forêt de tiges après inversion de la chronologie temporelle, et on peut observer au point source le signal retourné temporellement .

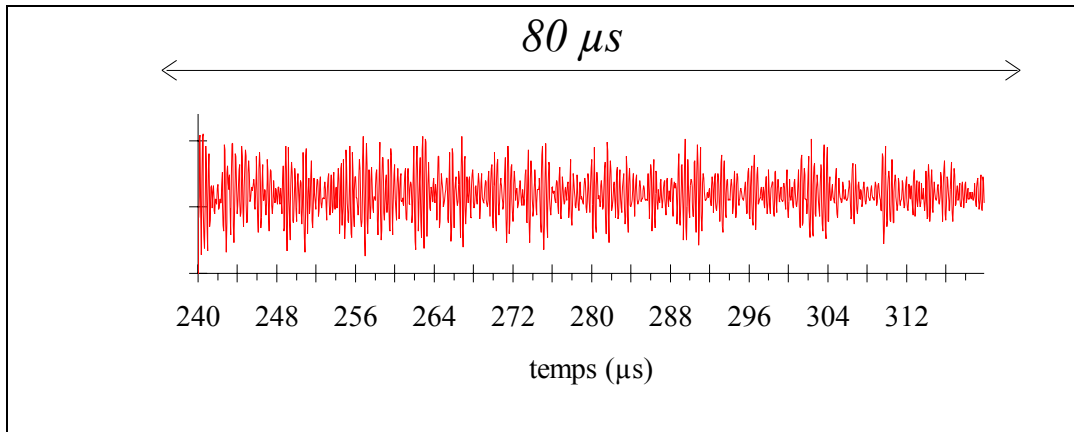


Fig 3a - On observe sur cette figure une portion de $80 \mu s$ du signal capté par un des éléments de la barrette de transducteurs. La durée totale du signal est de plus de $300 \mu s$, à comparer avec la durée du pulse initial de $1 \mu s$.

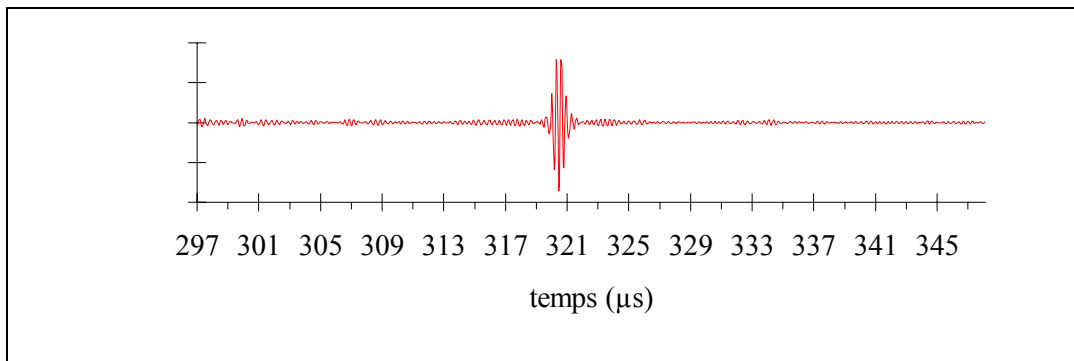


Fig 3b - On retrouve au point A un signal dont la durée est pratiquement de $1 \mu s$ après l'opération de retournement temporel.

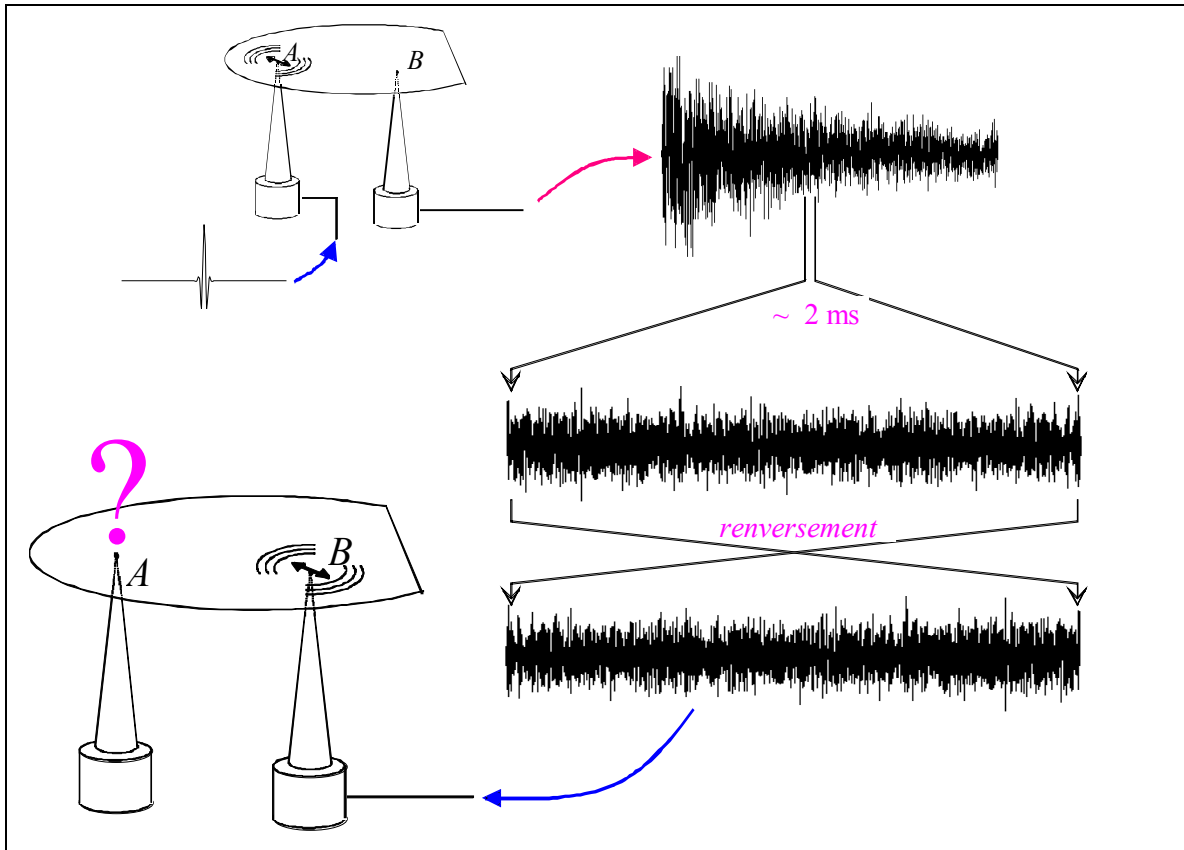


Figure 4 : Schéma de l'expérience de renversement du temps à l'intérieur d'une cavité de géométrie ergodique. Les points A et B sont situés sur une plaque de silicium dont les bords ont une géométrie chaotique.