



Si la graphologie prédit mal la personnalité, permet-elle de connaître la réussite professionnelle ultérieure d'un candidat à l'embauche? Le GGCF affirme qu'«il appartient à la profession de défendre la graphologie face à des détracteurs souvent mal informés en donnant la preuve de son utilité». Que les graphologues fassent la preuve de la validité de leur technique est bien le problème essentiel. Il est étonnant de ne les voir aborder cette question qu'aujourd'hui, alors que la graphologie est utilisée depuis bientôt un siècle et qu'elle a déjà contribué à décider de l'avenir de milliers de personnes.

La graphologie a-t-elle fait la preuve de sa pertinence? Permet-elle de connaître la personnalité du scribe, de prédire ses compétences professionnelles? Hélas, la réponse est négative. D'après toutes les études disponibles (une trentaine, menées dans divers pays et sur des groupes professionnels variés), la relation entre écriture et réussite professionnelle est soit très faible (et non significative), soit nulle. On ne peut donc pas utiliser l'écriture pour sélectionner des candidats à un emploi. Finalement, ne pouvant justifier sa méthode ni démontrer ses résultats, la graphologie est une pseudo-science.

La légitimité de la graphologie

Les graphologues, lorsqu'ils sont contestés et à bout d'arguments, évoquent la confiance de leurs clients et la popularité de leur discipline. Cette confiance, on l'a vu, semble très entamée dans les pays européens, où une écrasante majorité d'organismes ont abandonné la graphologie.

Sans doute utilise-t-on encore la graphologie en France, en raison de ses qualités apparentes : son coût paraît faible (dans l'immédiat, car, à moyen et à long terme, une erreur coûtera cher à l'en-

treprise et au candidat), sa mise en œuvre est simple, et les candidats français n'ont pas encore contesté la méthode autant que les candidats américains. L'opacité qui entoure la technique contribue aussi à la confiance faite par les entreprises : comme l'analyse de l'écriture est mêlée à d'autres évaluations (curriculum vitae, références...), le client ne peut connaître exactement l'origine des erreurs de recrutement, lorsqu'il y en a.

La situation française est grave, car il est contraire à la loi sur le recrutement et les libertés individuelles (*Journal officiel* du premier janvier 1993) d'utiliser l'écriture comme méthode d'évaluation des candidats à l'embauche : cette loi précise que les techniques utilisées doivent être «pertinentes au regard de la finalité poursuivie» et que le recruteur est comptable de «la rectitude scientifique des procédés qu'il utilise». Enfin le candidat doit être «expressément informé préalablement à la mise en œuvre» des méthodes qui serviront à l'évaluer.

En cette période d'incertitude et de précarité, il est particulièrement important d'assainir le processus de recrutement en n'utilisant que les méthodes les plus pertinentes : les raisons sont à la fois économiques (coût élevé des erreurs pour les organisations), juridiques (les pratiques non validées sont illégales) et éthiques (optimisation de l'évaluation par respect des candidats).

Marilou BRUCHON-SCHWEITZER est professeur de psychologie différentielle de la santé à l'Université Victor Segalen, Bordeaux 2.

M. COOK, *Personnel selection and productivity*, éditions John Wiley, Chichester, 1988.

E. NETER et G. BEN-SHAKKAR, *The predictive validity of graphological inferences: a meta-analytical approach*, in *Personality and Individual Differences*, vol. 10, pp. 737-745, 1989.

M. BRUCHON-SCHWEITZER et D. FERRIEUX, *Une enquête sur le recrutement en France*, in *Revue Européenne de Psychologie Appliquée*, vol. 41, n° 1, pp. 9-17, 1991.

A. VOM HOFE et C. LEVY-LEBOYER, *Evaluation of the use of personality tests in personnel selection in France*, in *Revue Européenne de Psychologie Appliquée*, vol. 43 n° 3, pp. 221-227, 1993.

C. BALICCO, *Les méthodes d'évaluation en ressources humaines*, Éditions d'Organisation, Paris, 1997.

Les miroirs à retournement temporel

MATHIAS FINK

Grâce à des réseaux de transducteurs, les physiciens renvoient un son à sa source, comme si le temps s'écoulait à l'envers. On utilise aujourd'hui ces retournements temporels pour détruire des calculs rénaux, détecter des défauts dans les matériaux ou communiquer avec les sous-marins.

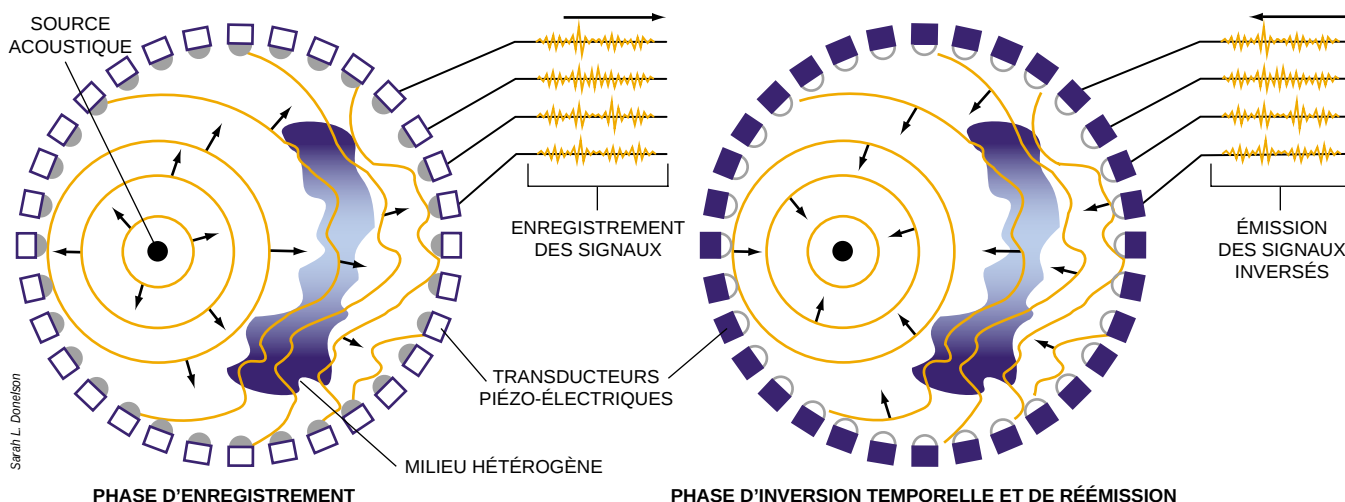
Dans une salle du Laboratoire ondes et acoustique, à l'École supérieure de physique et chimie de Paris, le visiteur peut se placer face à un réseau de microphones et de haut-parleurs. S'il parle devant ce dispositif, ses paroles lui reviennent, mais à l'envers. «Allô» revient, presque instantanément, transformé en «olla». Au premier abord, ce retour du son semble banal : ne suffit-il pas de passer un enregistrement à l'envers pour obtenir le même effet ? Oui, mais le système mis au point dans notre laboratoire a une particularité importante : il ren-

voie le son exactement à sa source ; au lieu de se propager dans toute la pièce à partir des haut-parleurs, le «olla» converge vers la bouche du visiteur, comme si le cours du temps avait été inversé. Ce phénomène fait une opération de retournement temporel des ondes acoustiques, et le réseau des transducteurs qui le met en œuvre agit comme un miroir à retournement temporel.

Le retournement temporel est plus qu'une expérience de physique amusante : on commence à l'utiliser pour détruire des calculs rénaux, contrôler des matériaux ou communiquer

dans les océans. En physique, les miroirs à retournement temporel servent également à tester des concepts fondamentaux.

Les sons sont des ondes. Quand nous parlons, nous engendrons des vibrations de l'air qui se propagent à partir de la bouche, comme des vaguelettes se propagent à la surface d'une mare à partir du point d'impact d'une pierre. Les ondes ont une propriété fondamentale, qui est utilisée dans le retournement acoustique : lorsque deux ondes passent au même endroit, elles se renforcent si leurs crêtes et leurs vallées



1. LE RETOURNEMENT TEMPOREL se fait en deux étapes. Dans une première étape (à gauche), la source émet une onde acoustique (en orange) qui se propage et se déforme au travers des hétérogénéités du milieu traversé. Un «miroir de retournement temporel», composé de transducteurs, détecte le signal qui arrive en chacun de ses points, le convertit en tension électrique et transmet les

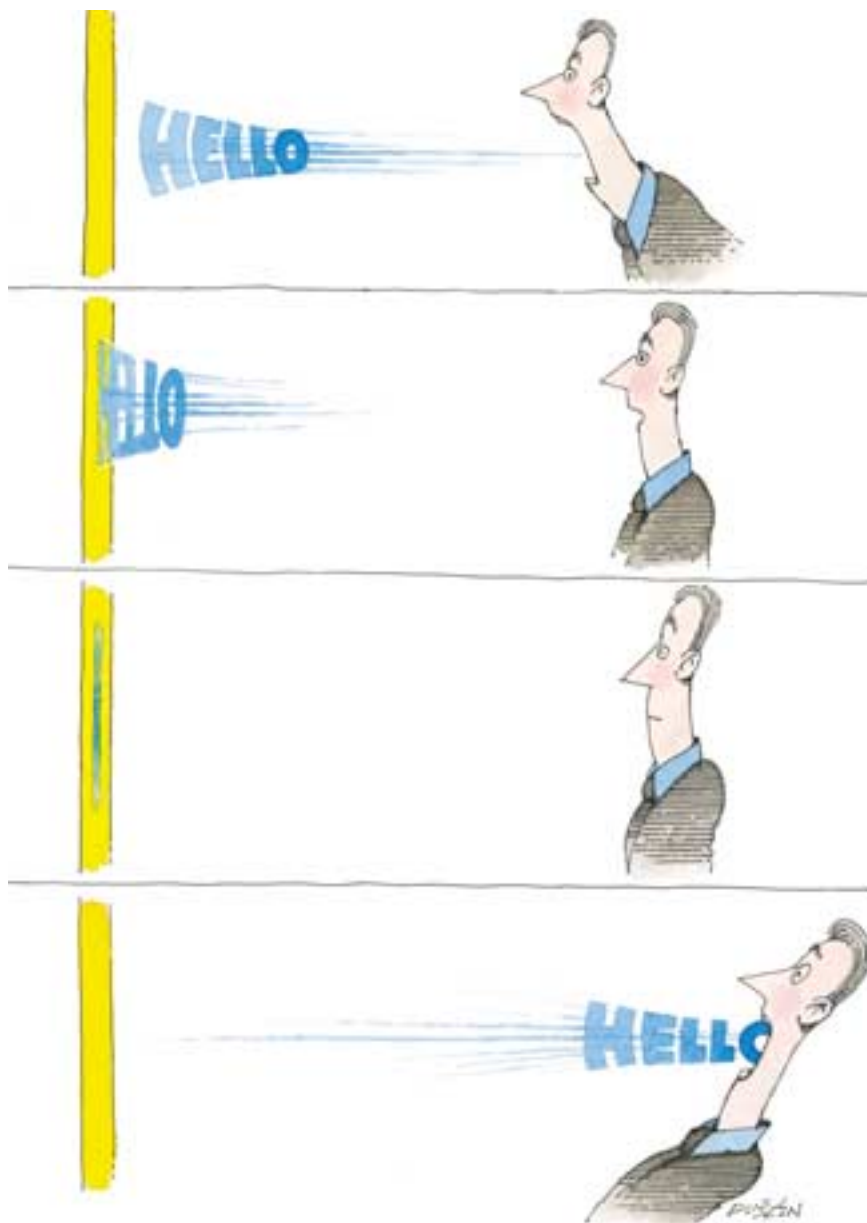
valeurs mesurées à un ordinateur. Dans la seconde étape (à droite), chaque transducteur réémet le signal qu'il a reçu selon une chronologie inverse, en synchronisme avec les autres transducteurs. L'onde originale est recrée, mais elle parcourt le chemin inverse, au travers des hétérogénéités du milieu, et se focalise à l'emplacement de la source initiale.

respectives se superposent, et elles s'annulent si les sommets de l'une correspondent aux creux de l'autre. Ce phénomène de superposition ou d'interférence a lieu partout où se croisent différentes ondes sonores. Dans les salles de concert, par exemple, les architectes doivent prendre garde à ces interférences : comme les murs et autres surfaces solides réfléchissent le son sous forme d'échos qui peuvent interférer, seule une conception bien faite évite que le son qui arrive dans la salle ne soit dégradé.

Le retournement des ondes acoustiques est également fondé sur la réversibilité des mécanismes qui sous-tendent la physique des ondes. Quand on projette un film qui décrit la propagation d'ondes à l'envers, les ondes obtenues obéissent encore aux équations de la physique des ondes. Cette propriété de réversibilité est partagée par les lois de la mécanique, qui décrivent le comportement élastique des boules de billard, par exemple. Toutefois, sauf dans quelques cas simples, on n'observe jamais le «retournement temporel» de la trajectoire d'une boule de billard. Cette impossibilité résulte du phénomène de chaos déterministe : une modification minime de la position ou de la vitesse initiales d'une boule modifie considérablement sa position finale.

Imaginons que l'on tire une boule dans une sorte de flipper comportant une centaine d'obstacles fixes, arrangés au hasard. Même dans des simulations sur ordinateur, la trajectoire de la boule n'est pas réversible. Lorsque, après avoir laissé la boule effectuer plusieurs dizaines de collisions, on l'arrête et on la renvoie en marche arrière en inversant sa vitesse, la boule ne parvient pas à refaire le trajet jusqu'à son point de départ : après une dizaine de collisions environ, elle rate un obstacle qu'elle aurait dû heurter, et la suite du parcours est modifiée. Dans une simulation des lois de la mécanique, le moindre arrondi dans les calculs fait échouer le retournement temporel ; or les ordinateurs tronquent toujours les nombres qu'ils manipulent. De la même façon, dans les expériences réelles, on ne parvient jamais à renvoyer la boule en sens inverse, exactement dans la bonne direction et avec la bonne vitesse.

Par opposition, la propagation des ondes est régie par des lois



linéaires : une petite perturbation de l'onde initiale modifie peu l'onde finale. Ainsi, malgré les inévitables imprécisions de mesure, si l'on enregistre l'onde finale et si on la renvoie en sens inverse, on obtient une onde qui se déplace en sens inverse de l'onde initiale, semblable à celle-ci, à des imperfections mineures près.

Des miroirs qui retournent le temps

Nos miroirs acoustiques à retournement temporel enregistrent le son «allô» qui arrive de la bouche des visiteurs. Chaque microphone qui compose ces miroirs mesure le son du «allô» qui provient de la bouche du visiteur à travers tous les obstacles de la salle, et tous ces signaux sont enre-

gistrés dans des mémoires électroniques. Lorsque la dernière composante du «allô» a été enregistrée, on passe à la phase de retournement temporel, qui consiste à relire l'ensemble des mémoires électroniques «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 en premier, et *vice versa*. Tous les microphones passent alors, de façon synchrone, en mode haut-parleur et sont alimentés par les signaux inversés stockés dans les mémoires électroniques. Ce qui sort du réseau de haut-parleurs est maintenant une onde sonore qui parcourt toutes les étapes de sa vie passée et qui se propage au travers de la pièce, sur les mêmes trajectoires

Dusan Petric

que le «allô» original et qui termine dans la bouche du locuteur.

Afin de fabriquer simplement ces miroirs, on utilise des transducteurs piézo-électriques, qui rassemblent les deux fonctions, microphone et haut-parleur, sur le même composant.

Le retournement temporel requiert également que la quantité d'énergie dissipée sous forme de chaleur soit faible : la chaleur est un mouvement aléatoire des molécules de l'air, alors qu'un son correspond à un mouvement collectif ordonné à l'échelle de la longueur d'onde, qui, seul, peut être retourné temporellement dans nos expériences. Cette condition est de même nature que la nécessité d'une faible friction dans les expériences de mécanique. En pratique, des boules de billard n'auront jamais le mouvement inverse, car elles sont freinées à l'aller par les frottements contre le support et par la résistance de l'air ; or on ne peut réaccélérer ces boules sur une trajectoire «retournée» dans le temps.

Lorsque les pertes d'énergie par dissipation sont suffisamment faibles, les équations auxquelles obéissent les ondes garantissent que, pour chaque émission sonore à partir d'une source, il existe en théorie un ensemble d'ondes qui emprunteraient exactement la même trajectoire en sens inverse jusqu'à la source du son. Cette propriété est vérifiée même quand le milieu de propagation est compliqué par la présence d'objets et par des variations de densité qui réfléchissent, dispersent et réfractent le son. Les ondes inversées font alors les mêmes tours et détours qu'à l'aller, et convergent simultanément à la source, comme si le cours du temps s'inversait. En 1988, nous avons construit et testé un tel miroir acoustique à retournement temporel, pour des ultrasons se propageant dans un milieu modérément hétérogène comparable à des tissus biologiques.

Une remarque permet de simplifier la construction des miroirs à retournement temporel : le réseau de transducteurs n'a pas besoin d'être continu pour assurer un retournement temporel optimal. Les lois de la diffraction nous apprennent qu'il suffit que les transducteurs soient répartis sur un réseau dont le pas (la distance entre deux transducteurs) est égal à la moitié de la plus petite longueur d'onde utilisée. Pour les mêmes raisons, les ondes se focalisent sur une

tache qui ne peut être plus petite que la moitié de la plus petite longueur d'onde utilisée. Autrement dit, les informations sur la source plus petites que cette grandeur sont perdues.

Dans l'idéal, le réseau de transducteurs couvrirait tous les murs de la pièce, sol et plafond compris, de sorte que l'on puisse engendrer la totalité de l'onde finale (voir la figure 1). En pratique, il est rarement possible d'entourer complètement la source avec des transducteurs, et l'on se contente d'un réseau de transducteurs de surface limitée, le miroir à retournement temporel. Évidemment, de l'information est alors perdue, et plus la dimension du miroir est faible, plus la taille du point focal augmente. Ce phénomène est l'analogie de la perte de résolution entre une image obtenue avec un grand miroir et celle obtenue avec un miroir plus petit. De fait, les opticiens étudient depuis une vingtaine d'années l'équivalent optique des miroirs à retournement temporel : les miroirs à conjugaison de phase. Ces dispositifs permettent, pour des ondes dans le domaine visible qui vibrent de façon bien sinusoidale, d'observer une rétro-réflexion du faisceau : la lumière est réfléchie vers sa source, quelle que soit sa position relativement à celle du miroir. Cependant, ces miroirs ne peuvent retourner tous les détails d'une onde de lumière visible dont la modulation d'amplitude serait ultrarapide, comme on sait le faire en acoustique.

Un flipper chaotique

En 1994, Arnaud Derode, Philippe Roux et moi avons réalisé une expérience de retournement temporel d'ultrasons au travers d'un milieu analogue au flipper chaotique mentionné précédemment. Les ondes se réfléchissaient entre 2 000 tiges de métal parallèles, réparties aléatoirement dans une cuve d'eau (voir la figure 2). Un petit transducteur émettait pendant une microseconde une impulsion qui se propageait au travers de cette «forêt» de tiges jusqu'à un réseau linéaire de 96 transducteurs. Ce réseau détectait d'abord un premier front d'onde, correspondant à la partie du signal sonore qui s'était propagée en ligne droite à travers la forêt, puis une deuxième onde d'allure chaotique, pendant près de 200 microsecondes. Cette onde chaotique résultait de l'interférence entre toutes les ondelettes qui ont été diffusées sur les obstacles et qui emprun-

tent les multiples trajectoires possibles entre les tiges.

Dans la deuxième partie de l'expérience, nous avons retourné temporellement ces signaux et utilisé un hydrophone pour mesurer l'onde reçue là où elle avait été initialement émise. Le réseau renvoya un signal étalé sur 200 microsecondes environ, à travers la forêt de tiges, mais le signal récupéré à la source fut une impulsion d'une durée voisine d'une microseconde, comme celle qui avait été initialement émise. Nous avons également fait l'expérience sans les tiges. Aussi étonnant que cela paraisse, le retournement fut meilleur avec les tiges : le faisceau retourné temporellement se focalisait en une tache six fois plus petite avec les tiges que sans elles. En effet, les multiples réflexions à l'intérieur de la forêt de tiges redirigent vers le miroir une partie de l'onde initiale qui, sans ces obstacles, passerait à côté du réseau de transducteurs. Après l'opération de retournement temporel, l'ensemble de ce milieu diffusant se comporte à la manière d'une lentille convergente, comme si le miroir avait une ouverture six fois plus grande, et donc une résolution six fois meilleure.

Ces expériences ont montré que le phénomène de retournement temporel est stable. D'une part, les résultats étaient bons, alors que les signaux enregistrés étaient échantillonnés par des convertisseurs analogique-numérique, qui introduisaient des erreurs de numérisation. D'autre part, après de petits mouvements du réseau et des tiges d'une petite fraction de la longueur d'onde (0,5 millimètre), le retournement temporel donnait encore de bons résultats. En revanche, dans une expérience similaire avec des particules, le résultat serait désastreux, car chaque particule suit un trajet bien défini, et une petite erreur de vitesse ou de position initiale suffit pour que la particule manque un obstacle et que sa trajectoire ultérieure soit complètement altérée. Avec les ondes qui se propagent dans toutes les directions, l'amplitude est beaucoup plus stable, puisqu'elle résulte des interférences de toutes les trajectoires possibles.

Retournement temporel sur silicium

Quel serait le résultat si l'on réduisait à un le nombre de transducteurs de retournement temporel? Comment

pourrait-on rediriger toute l'information concernant une source vers un unique transducteur de retournement temporel? Nous avons enfermé la source et le transducteur dans une cavité «ergodique», aux parois parfaitement réfléchissantes. Une table de

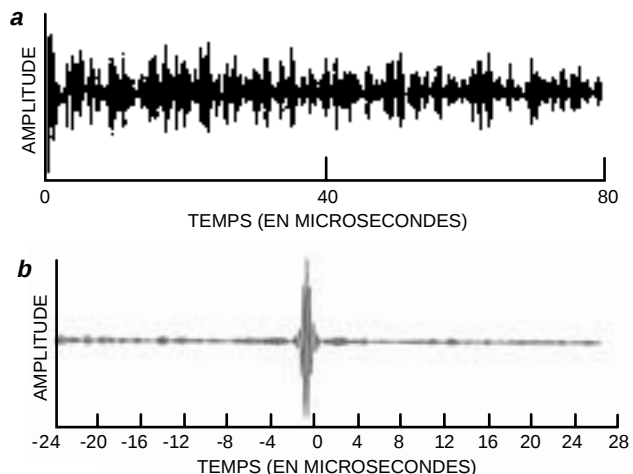
billard serait ergodique si ses bords étaient incurvés comme dans un stade: quelle que soit la direction initiale du tir, une boule finirait par passer en tout point de la table. De la même manière, dans une cavité ergodique, à condition d'attendre suffisamment longtemps,

toutes les ondes sonores émises par la source arrivent au transducteur.

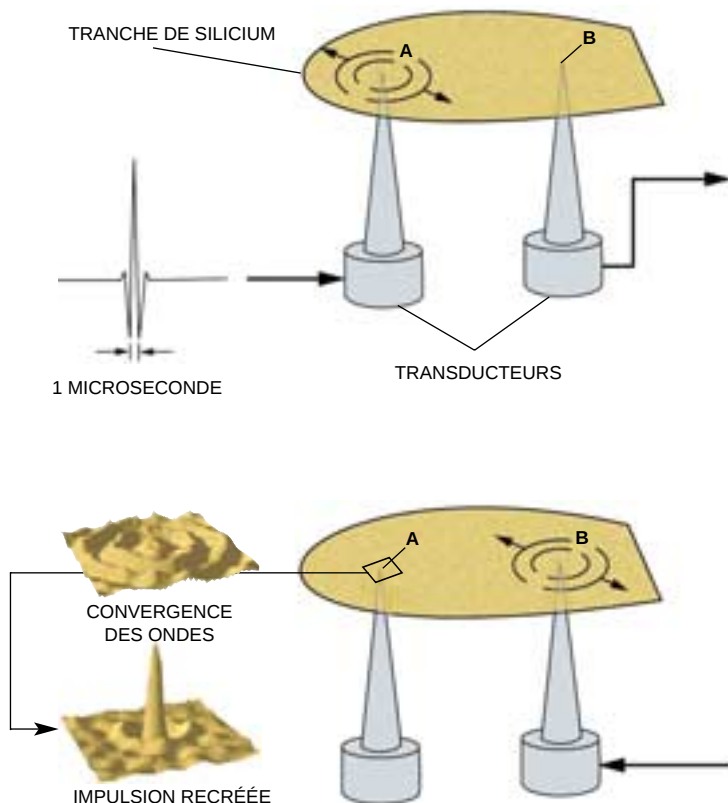
Voici trois ans, avec Carsten Draeger, nous avons mis en évidence un retournement temporel sur des ondes élastiques qui se propageaient à la surface d'un disque de silicium tronqué



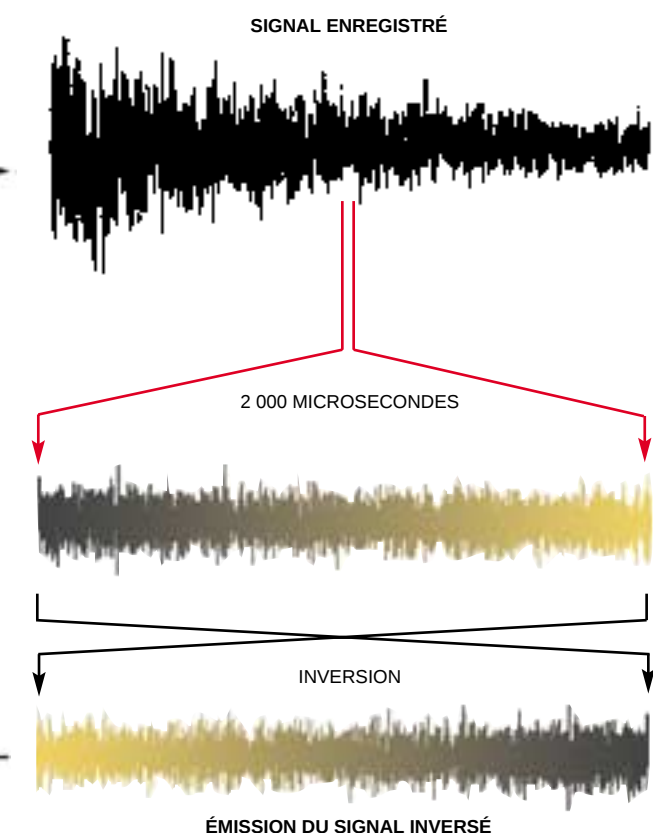
2. UNE PARTIE DE FLIPPER CHAOTIQUE à ondes acoustiques se joue lorsqu'une impulsion ultrasonore d'une durée d'une microseconde est émise dans l'eau par un transducteur (à gauche sur la photographie) : les ondes ricochent en tous sens au milieu de 2 000 tiges de métal réparties au hasard, avant d'atteindre un miroir à retournement temporel constitué de 96 transducteurs (à droite sur la photo-



graphie). Chaque élément du miroir reçoit un signal ultrasonore apparemment chaotique (on en voit une partie en (a)), d'une durée très supérieure à celle de l'impulsion initiale. Lorsque le miroir renvoie les signaux chaotiques, inversés et synchrones, ils ricochent en marche arrière à travers le labyrinthe de tiges et se combinent pour redonner une impulsion bien nette (b) sur le transducteur de gauche.



3. UN UNIQUE TRANSDUCTEUR suffit à retourner temporellement une onde dans une «cavité» fermée. Un transducteur source émet une impulsion en un point A d'une petite tranche de silicium (en haut). Un transducteur situé en B enregistre les réverbérations chaotiques de l'impulsion, qui subit des centaines de



réflexions successives sur les bords de la tranche de silicium. Le transducteur placé en B réémet ensuite une petite partie de ce signal inversé (en bas). Après de nombreuses réflexions, les différentes composantes de ce signal se recombinaient pour recréer la brève impulsion initiale en A.

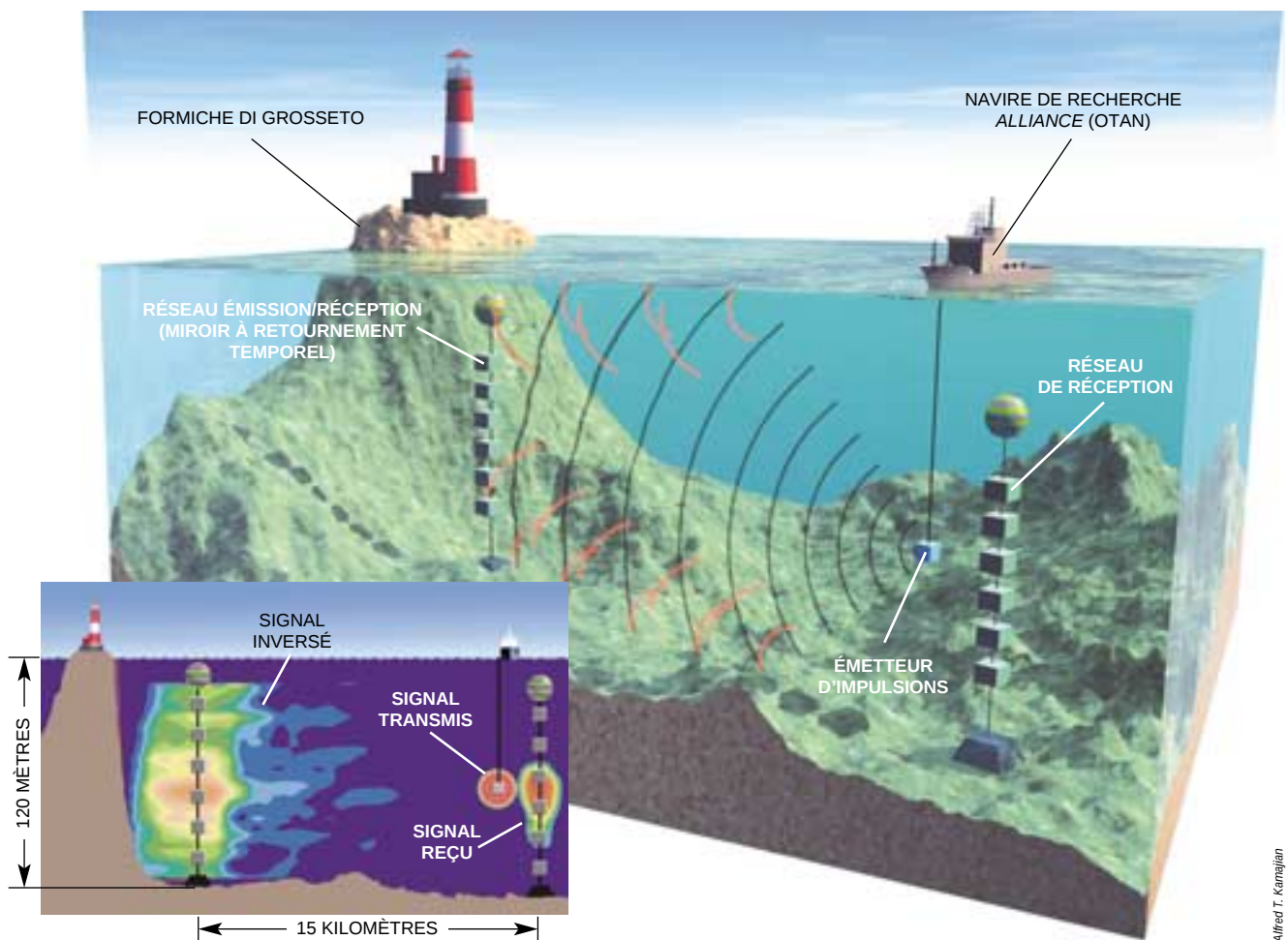
en utilisant un transducteur unique (voir la figure 3). Le transducteur source placé en un point A émettait une onde de surface circulaire, d'une microseconde de durée. Le transducteur de retournement temporel, situé au point B, enregistrait alors un signal chaotique pendant plus de 50 millisecondes (soit 50 000 fois la durée de l'impulsion initiale), correspondant à une centaine de réflexions successives de l'impulsion initiale sur le bord du disque. Nous avons ensuite retourné temporellement deux millisecondes du signal enregistré et avons réémis ce signal au moyen du transducteur situé en B. À l'aide d'un interféromètre optique, nous observions les déplacements verticaux que les ondes élastiques engendraient à la surface du silicium, autour du point A.

Nous avons alors assisté, au point A, à une remarquable restitution de l'impulsion originale, focalisée dans l'espace

sur un rayon d'environ une demi-longueur d'onde et dans le temps sur une durée de l'ordre d'une microseconde. En utilisant les réflexions sur les bords, le champ d'onde retourné temporellement a convergé en provenance de toutes les directions vers l'origine, et a produit une tache circulaire. La forme de l'onde retournée enregistrée en B, d'une durée de deux millisecondes (correspondant à la superposition de près de 2 000 oscillations), est le code permettant de focaliser exactement sur le point A à partir du point B. Ce principe pourrait servir de base à un système cryptographique où l'on engendrerait des impulsions en différents points de la cavité à partir de différents codes provenant de B.

Les miroirs à retournement temporel peuvent également être utiles dans les communications acoustiques sous-marines. Les performances des

systèmes classiques sont médiocres, en eau peu profonde, car le son s'y réfléchit entre le fond et la surface, de sorte qu'une seule impulsion donne de multiples échos sur le récepteur, comme dans la cavité ergodique. Cependant, les «parois» d'un chenal sous-marin ne sont pas ergodiques, et un miroir à retournement temporel doit comporter plusieurs transducteurs. Des chercheurs de l'Institut Scripps, de l'Université de San Diego, et du Centre de recherche sous-marine SACLANT, en Italie, ont récemment construit un miroir à retournement temporel de 20 éléments qu'ils ont testé, au large des côtes italiennes (voir la figure 4) : ce miroir focalisait des ondes sonores jusqu'à une distance de 30 kilomètres, dans 120 mètres d'eau. Comme dans l'expérience avec des tiges de fer, la tache focale du faisceau retourné était bien inférieure à celle que l'on



4. LES COMMUNICATIONS SOUS-MARINES seraient améliorées par l'utilisation du retournement temporel. L'efficacité de cette technique a été testée dans des eaux d'une profondeur de 120 mètres, près de l'île d'Elbe, au large de l'Italie. Une impulsion sonore a été émise à partir de l'emplacement de la cible. Déformé par la réfraction et par les multiples réflexions (en rouge) sur la surface et sur le fond, le signal a été enregistré jus-

qu'à 30 kilomètres de la source par un réseau de transducteurs. Le signal retourné et renvoyé par le réseau était bien focalisé sur la cible. Sur le cartouche (en bas à gauche), les contours de couleur indiquent l'intensité du signal sonore. L'impulsion de départ (disque rouge) arrive très déformée sur le miroir à retournement temporel, mais quand celui-ci renvoie le signal retourné, on obtient une impulsion bien focalisée sur le réseau récepteur (à droite).

Alfred T. Kamajian



5. LA POROSITÉ DE LA BOÎTE CRÂNIENNE engendre une forte dissipation de l'énergie ultrasonore, d'où la grande difficulté de la focalisation des ultrasons sur les tumeurs du cerveau. Néanmoins, un miroir à retournement temporel muni d'un algorithme de correction de dissipation permet d'obtenir des taches focales très fines à l'intérieur du crâne.

obtient avec les sonars classiques (une amélioration de la résolution d'un facteur 50 a été observée). Philippe Roux et moi-même avons réalisé des expériences similaires en utilisant des guides d'ondes ultrasonores, où se produisent de multiples réflexions. La focalisation de l'onde retournée dans l'espace et dans le temps engendre une impulsion acoustique très puissante, avec laquelle on peut créer une onde de choc.

Parmi les nombreuses applications envisageables des miroirs à retournement temporel, l'une des plus intéressantes est l'échographie : après l'émission d'une brève impulsion, on détecte les échos renvoyés par des cibles. Ainsi on explore le corps humain, on obtient des images des fonds marins (pour la détection de mines, de sous-marins ou d'objets enfouis), on teste des pièces mécaniques (contrôles non destructifs, à la recherche de fissures ou de défauts). Dans tous ces cas, une détection de bonne qualité requiert un faisceau acoustique très fin. Or, beaucoup de milieux de propagation distordent les faisceaux et dégradent la focalisation. En imagerie médicale, par exemple, les ultrasons traversent de la graisse, des os et des muscles avant d'atteindre des cibles comme des tumeurs ou des calculs rénaux. Comment corriger la déformation des faisceaux ultrasonores sans connaître la manière dont ils sont distordus ? Le miroir à retournement temporel pallie ces difficultés.

L'échographie ultrasonore

Dans un premier temps, une partie du réseau de transducteurs envoie une brève impulsion à travers le milieu afin d'«illuminer» la région à étudier. Si une cible est présente dans le milieu, elle réfléchit l'onde, et le réseau enregistre, retourne temporellement et réémet cette onde réfléchie. Le retournement temporel garantit que cette onde retournée se focalisera sur la cible, malgré les distorsions engendrées par le milieu traversé.

Lorsque la région à étudier ne contient qu'une cible, cette technique d'auto-focalisation est très efficace. En revanche, avec plusieurs cibles réfléchissantes, le problème est plus délicat. On sélectionne alors une cible en répétant la procédure plusieurs fois. Imaginons le cas simple où le milieu comporte deux cibles de réflectivités différentes. L'écho de l'impulsion initiale engendré par la cible la plus brillante a une amplitude supérieure à celle de l'écho provenant de la cible la moins réfléchissante. Par conséquent, le premier signal retourné temporellement focalise une onde de plus forte amplitude sur la plus réfléchissante des deux cibles. L'écho de ces ondes fait ressortir encore davantage la cible la plus brillante, et, après quelques itérations, on obtient un signal qui se focalise préférentiellement sur cette cible. Des techniques plus complexes, mises au point par

Claire Prada-Julia, permettent de sélectionner la cible la moins réfléchissante.

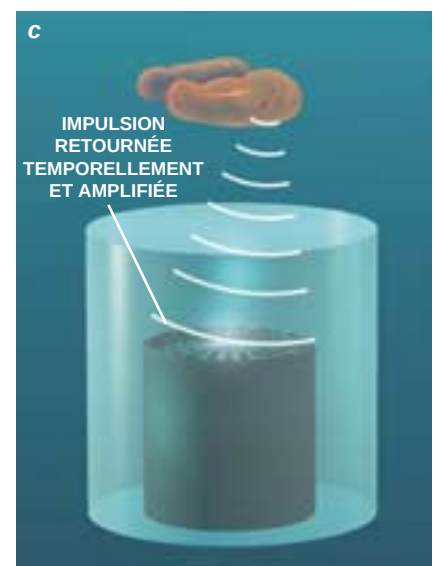
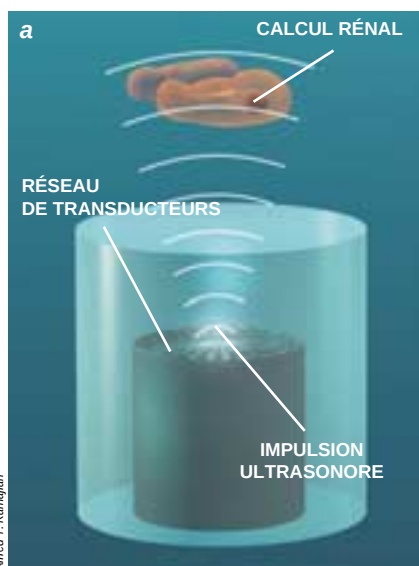
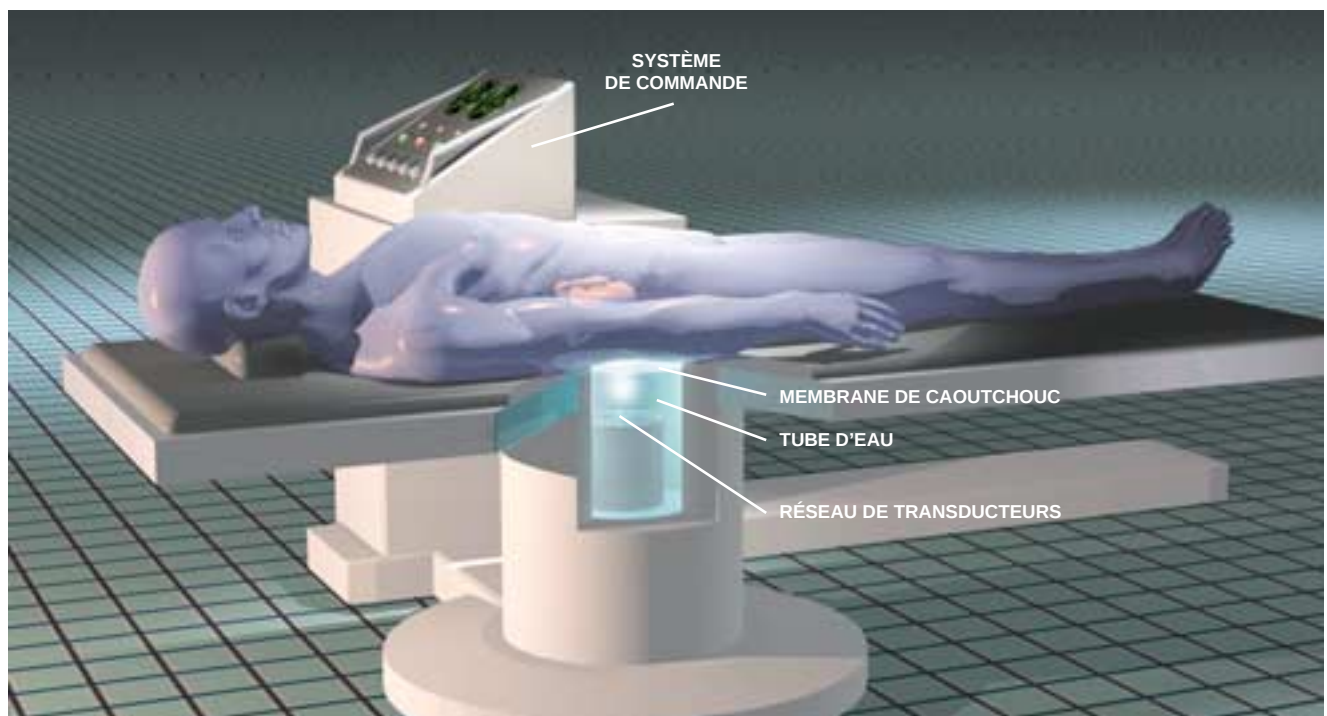
De toutes les applications médicales du retournement temporel, la destruction des calculs rénaux et biliaires est la plus avancée (voir la figure 6). Par des techniques classiques d'imagerie par ultrasons ou par rayons X, on localise avec précision de tels calculs, mais les tissus environnants empêchent une focalisation suffisante des ondes ultrasonores pour pulvériser efficacement les calculs. De

surcroît, les calculs bougent avec la respiration, et sont donc difficiles à suivre. Seuls 30 pour cent des tirs atteignent le calcul, qui n'est détruit que par plusieurs milliers de tirs.

Les techniques de retournement temporel des ultrasons optimisent les tirs : après plusieurs itérations de l'opération de retournement temporel, le faisceau ultrasonore se focalise sur la zone la plus réfléchissante du calcul. On peut alors renvoyer vers la cible une onde retournée de forte puissance, qui se focalise sur le cal-

cul et le détruit. Ce processus peut être répété pour suivre en temps réel les mouvements du calcul. Jean-Louis Thomas, François Wu et moi-même avons mis au point un miroir à retournement temporel de 20 centimètres de diamètre destiné à cette application. La procédure de focalisation et de poursuite sur des calculs a été testée avec succès dans deux hôpitaux.

L'hyperthermie par ultrasons est une autre application médicale prometteuse. Dans cette technique, on chauffe des tissus malades à l'aide d'ul-



6. LES CALCULS RÉNAUX peuvent être pulvérisés par des ultrasons, grâce à la propriété de focalisation automatique des miroirs à retournement temporel. Une impulsion ultrasonore émise par une partie d'un réseau d'émetteurs (a) est réfléchi et déformée par le calcul (b).

Cet écho, retourné temporellement et fortement amplifié, traverse les tissus et organes intermédiaires, se focalise sur le calcul (c) et le détruit. En itérant l'opération, on améliore la focalisation sur le calcul malgré ses mouvements, dus à la respiration du patient.

trasons de forte intensité : les températures supérieures à 65 °C détruisent des tissus biologiques en quelques secondes. Des appareils faisant appel aux techniques classiques pour focaliser les ultrasons existent déjà sur le marché, mais leur application est restreinte aux tissus statiques, comme les tumeurs cancéreuses de la prostate. Les mouvements du cœur et de la respiration limitent les applications abdominales et cardiaques. Emad Ebbini et ses collègues de l'Université du Michigan mettent au point des réseaux à focalisation automatique pour surmonter le problème. Avec Mikael Tanter et Jean-Louis Thomas, nous étudions l'hyperthermie du cerveau. Nous voulons focaliser les ondes au travers de la boîte crânienne, qui réfracte et disperse considérablement le faisceau d'ultrasons. De surcroît, le crâne est un matériau poreux : il dissipe une partie de l'énergie de l'onde en chaleur et brise la symétrie par retournement temporel des équations de propagation de l'onde. Nous avons mis au point une technique de focalisation qui corrige ces effets de dissipation avant l'opération de retournement temporel. Grâce à cette technique, nous envoyons un faisceau d'ultrasons au travers du crâne, qui se focalise sur une tache de 1,5 millimètre (voir la figure 5).

Nous avons également utilisé des miroirs à retournement temporel pour la détection de défauts dans des pièces. Lorsque les défauts sont petits, que la forme de la pièce est complexe ou que le matériau est hétérogène, la détection des défauts est délicate. Habituellement, on immerge la pièce à tester et les transducteurs dans une piscine, mais les faisceaux sont déviés par réfraction au passage de l'interface entre l'eau et le solide, ce qui complique la détection de petits défauts. De surcroît, dans les solides, les ondes ultrasonores engendrent des ondes variées, de types et de polarisation différentes. Nous avons montré que les techniques de focalisation à l'aide de miroirs à retournement temporel compensent automatiquement tous ces effets. Dans le cadre d'une collaboration avec la SNECMA (Société nationale d'étude et de construction de moteurs d'aviation), nous avons mis au point, avec F. Wu, un miroir à retournement temporel formé de 128 transducteurs capable de détecter des défauts de faible contraste dans des alliages de

titane utilisés dans les moteurs d'avion. Le titane possède une microstructure hétérogène, qui engendre un bruit échographique gênant, parce qu'il masque l'écho résultant des défauts. Par l'itération du retournement temporel, nous avons détecté des défauts de 0,4 millimètre dans des billettes de titane de 250 millimètres de diamètre, avec un rapport signal sur bruit bien meilleur que classiquement.

Maintenant que la technique de retournement temporel des ondes acoustiques est bien maîtrisée en laboratoire, un travail d'application s'impose. Le retournement d'un «allô» est amusant, mais le principe de la focalisation du «olla» au niveau de la bouche du locuteur peut également servir à engendrer des hologrammes acoustiques : le réseau de transducteurs peut, par exemple, être programmé pour focaliser simultanément le son «bonjour» près d'une personne, et «hello» près d'une autre.

D'autres ondes que les ondes sonores peuvent également être retournées temporellement. Des ingénieurs explorent les applications de ces techniques au radar pulsé, en utilisant les ondes électromagnétiques. Un autre type d'onde intervient en mécanique quantique : les fonctions d'onde quantiques qui décrivent la matière. Lorsque la fonction d'onde d'un électron heurte la frontière entre un conducteur et un supraconducteur, on assiste à une réflexion qui s'apparente au retournement temporel. À quels tours de magie assisterions-nous si l'on parvenait à retourner des ondes quantiques!

Mathias FINK est directeur du Laboratoire ondes et acoustique à l'École supérieure de physique et de chimie industrielles de la ville de Paris (ESPCI) et professeur à l'Université Paris VII (Denis Diderot).

D. ROYER et E. DIEULESAINT, *Ondes élastiques dans les solides*, tome 1, Masson, 1996.

M. FINK et C. PRADA, *Ultrasonic Focusing with Time-Reversal Mirrors*, *Advances in Acoustic Microscopy* Serie, sous la direction de A. Briggs et W. Arnold, Plenum Press, 1996.

M. FINK, *Time-Reversed Acoustics*, in *Physics Today*, vol. 50, n° 3, pp. 34-40, mars 1997.

M. FINK, *Ultrasound Puts Materials of the Test*, in *Physics World*, vol. 11, n° 2, pp. 41-45, février 1998.
