

Académie des sciences

Séance solennelle de réception des Membres élus en 2003
15 juin 2004

De l'imagerie médicale au renversement du temps Mathias Fink

Après la découverte des rayons X et de la radiologie, il a fallu attendre une longue période, jusque dans les années 70, pour que d'autres techniques d'imagerie médicale plus spectaculaires et plus performantes se développent.

C'est à travers un parcours relativement chaotique que j'ai participé à cette aventure. Jeune physicien du solide et en même temps passionné d'archéologie, je me suis demandé à la fin de ma thèse de 3e cycle : comment marier mon intérêt pour la physique et pour l'archéologie dans ma future carrière ? Ma rencontre avec Pierre Alais, qui s'intéressait à l'époque à l'holographie acoustique, fut décisive. Holographie rimait avec imagerie du relief et l'espoir de pouvoir réaliser des images acoustiques à trois dimensions d'objets enfouis me poussa à rejoindre son équipe. En fait, très vite, l'impossibilité de trouver le moindre financement pour développer un outil propre à l'archéologie nous amena à explorer d'autres milieux opaques à la lumière comme le corps humain.

Les techniques de l'holographie optique étaient très populaires et l'idée de les étendre au domaine des ultrasons était tentante. Nous avons réalisé un dispositif très original qui utilisait une rétine ultrasonore unique au monde comportant près de 100 000 transducteurs. Notre déception fut grande devant les images très médiocres que nous obtenions sur toutes les pièces anatomiques. Il a fallu nous rendre à l'évidence, l'utilisation d'ondes ultrasonores monochromatiques sur laquelle reposait le principe de l'holographie s'avérait un très mauvais choix pour observer des structures aussi complexes que l'intérieur d'un organe. Malgré la très bonne résolution spatiale, le contraste de nos images était détestable. A la même époque, d'autres équipes exploraient une piste apparemment moins sophistiquée : celle de l'échographie qui utilisait, au lieu de signaux monochromatiques, des signaux très brefs et qui donnaient un bien meilleur contraste. Par contre, la résolution spatiale de ces images était très mauvaise. Comment concilier ces deux techniques en apparence contradictoires ? Ce fut l'objet de mon travail de thèse d'Etat, pendant lequel nous avons réalisé le premier échographe donnant en temps réel des images médicales à haute résolution. Il a fallu bâtir une théorie de la diffraction de ces signaux très brefs qui permettait de rendre compte de la qualité de ce type d'images. En prenant un certain recul pendant ma rédaction de thèse, je compris la portée universelle d'un concept qui permettait d'unifier toutes les méthodes d'imagerie proposées : celui du renversement temporel des ondes.

En effet, après l'interaction d'une onde avec un objet, on observe uniquement les ondes qui divergent de l'objet. Associer à cet objet son image, ce n'est rien d'autre que transformer chacune de ces ondes divergentes en une onde convergente. Les lentilles font plus ou moins bien cette opération mais une opération de renversement du temps est bien plus efficace. Elle est possible uniquement dans la mesure où les ondes, qui se propagent habituellement sans se dissiper, sont réversibles. J'imaginai alors un dispositif ultrasonore à

retournement temporel qui utiliserait des matrices de transducteurs piézoélectriques et des mémoires électroniques qu'on pouvait relire en "verlan". Un tel dispositif pourrait donner plusieurs milliers d'images par seconde du corps humain sans aberration. C'était malheureusement trop tôt. Les composants électroniques nécessaires à notre dispositif étaient encore introuvables et l'Apple 2 ne sortirait qu'un an plus tard. Il a fallu attendre dix ans pour que la loi de Moore nous permette de disposer de composants assez rapides.

Le projet fut oublié et je m'attaquai à d'autres problèmes, comme celui de la cohérence des signaux ultrasonores qui provenaient de la microstructure aléatoire des organes. Comment exploiter ce bruit ultrasonore ? C'est un travail que j'ai développé en étroite collaboration avec Philips.

Entre-temps, les composants électroniques progressaient et un article paru dans Scientific American sur les miroirs à conjugaison de phase optique me rappela à mes élucubrations sur le retournement temporel. Je réussis à convaincre l'ANVAR de financer la construction d'un tel prototype pour réaliser un lithotripteur capable de détruire les calculs rénaux avec une grande précision. C'était l'écho du calcul rénal qui était retourné temporellement et amplifié pour détruire le calcul, et ceci quelle que soit la nature des tissus présents sur le parcours. Une analyse détaillée de ce procédé nous permit de développer une méthode très générale de détection de cibles en milieu complexe et une deuxième application de ce procédé fut développée dans la foulée avec le financement de la SNECMA. Il s'agissait de détecter la présence de défauts de très petites tailles dans les moteurs d'avion. Une autre application médicale que nous avons développée ces dernières années porte sur la thérapie du cerveau. Un miroir à retournement temporel utilisant 300 transducteurs a été testé le mois dernier sur une vingtaine de brebis *in vivo* à l'Institut Montsouris. Nous avons montré qu'on pouvait nécroser les tissus du cerveau à distance à travers le crâne avec une précision millimétrique. Enfin, dans un mode diagnostique, la réalisation d'un miroir à retournement temporel permettant de faire 5000 images par seconde du corps humain nous a permis de filmer pour la première fois dans le corps humain la propagation des ondes de cisaillement dont les célérités sont de l'ordre du m/s. On a ainsi accès à un type d'images très nouvelles qui remplacera de façon très quantitative et très précise la palpation médicale.

La technologie des miroirs à retournement temporel maîtrisée, nous aurions pu nous limiter uniquement aux problèmes médicaux, mais ma formation de physicien me poussa à revenir sur des problèmes beaucoup plus fondamentaux.

Peut on faire revivre à une onde sa vie passée ? Que se passe-t-il si le milieu de propagation devient très complexe ? Si les phénomènes de diffusion multiple détruisent complètement la cohérence de l'onde ? Si l'onde se propage dans une cavité réverbérante de géométrie chaotique ? Les premières expériences que nous fîmes au laboratoire avec Arnaud Derode, Philippe Roux et Carsten Draeger nous montrèrent un résultat étonnant. Plus le milieu de propagation était complexe et chaotique, plus il était facile de faire une expérience de renversement du temps. Un tel résultat est en totale contradiction avec ce qui se passerait dans une expérience de retournement temporel effectuée sur une particule. Les ondes sont beaucoup plus robustes que les particules et elles profitent des géométries chaotiques. A la limite d'un milieu complètement ergodique, un miroir à retournement temporel formé d'une unique antenne ponctuelle permet de remonter le temps d'une façon très précise et la taille de la tache focale ne dépend plus du tout de la taille de l'antenne. La nouveauté dans ces expériences, comparées à celles conduites en optique, provient de la très grande bande passante des signaux que nous manipulons. De nombreux mathématiciens, conduits par

George Papanicolaou à Stanford, participèrent à l'élaboration de cette théorie. Cet effet spectaculaire, qui fait qu'une antenne à retournement temporel de petite taille immergée dans un environnement complexe se comporte comme si elle avait la taille du milieu se révéla vite avoir de très nombreuses applications, dans des domaines aussi variés que l'acoustique sous-marine, les télécommunications en milieu urbain, la domotique. Nous avons, par exemple, récemment réalisé une antenne électromagnétique à retournement temporel dans la bande WiFi qui peut, en exploitant la réverbération, focaliser des messages sur des zones de quelques décimètres. De nombreuses équipes s'intéressent à la télécommunication par retournement temporel qui a un bel avenir devant elle.

Pour conclure cet exposé j'ai eu la joie, il y a un mois, de présenter à un congrès d'archéologie sous-marine en Turquie une étude sur le retournement temporel acoustique appliqué à l'archéologie. Plusieurs équipes travaillent déjà sur ce domaine et je pense que les applications de la science sont infiniment variées et qu'une approche de la science pluridisciplinaire et sans frontières doit pouvoir encore attirer de nombreux jeunes.