

Cela revient à dire que cette unique antenne à 200 degrés de liberté fréquentiels est capable de focaliser un signal à large spectre avec la même qualité que 200 antennes réparties dans l'espace qui fonctionneraient avec une unique fréquence (monochromatique).

Ainsi, une seule antenne exploitant une large diversité de fréquences, et donc beaucoup de degrés de liberté fréquentiels, est suffisante pour focaliser un rayonnement ayant traversé un milieu diffusant. À chaque point de l'espace correspond un signal temporel unique. Une fois connu l'ensemble des signaux correspondant à tous les points d'une zone, on peut soit focaliser sur chacun des points, soit utiliser cette banque de signaux pour localiser des sources quelconques ou pour faire l'image d'une source complexe à partir du signal enregistré par une unique antenne.

Cavités et autres pièges

Le succès des techniques de retournement temporel vient du fait qu'il existe de nombreuses situations dans la vie courante où l'on observe le même type d'effet que dans les milieux diffusants. C'est le cas chaque fois qu'une onde se propage dans un milieu entouré de parois réfléchissantes. On est alors dans une situation analogue à celle qui se produit dans un kaléidoscope, où un petit objet semble se répéter de façon périodique selon certaines directions. De même, pour un observateur situé au sein d'une cavité réfléchissante ou à l'intérieur des parois d'un guide d'ondes, chaque transducteur

d'un petit miroir à retournement temporel apparaît comme accompagné d'une multitude de transducteurs virtuels créés par les parois réfléchissantes. On a ainsi l'impression d'avoir un grand miroir à retournement temporel formé de beaucoup de transducteurs.

En 2002, William Kuperman et ses collègues de l'Institut américain de recherche SCRIPPS ont observé cet effet spectaculaire en mer. Ils ont conçu un miroir acoustique à retournement temporel de 98 mètres de longueur, formé de 29 transducteurs fonctionnant autour d'une fréquence centrale de trois kilohertz (soit à une longueur d'onde de 50 centimètres). Ils l'ont immergé au large de l'île d'Elbe dans une zone où la profondeur est de l'ordre d'une centaine de mètres. En modulant le signal envoyé par le miroir à retournement temporel, ils ont focalisé un message sonore à dix kilomètres de distance qui n'était capté que par un plongeur situé à l'emplacement de la tache focale ! Cette technique a donné lieu à de nombreux développements dans le domaine des communications sous-marines et, récemment, une équipe japonaise a réalisé des communications sur plus de 1 000 kilomètres par retournement temporel.

Peut-on conserver une bonne focalisation en réduisant les 29 transducteurs du miroir à retournement temporel à un unique transducteur ? Pas si l'on reste dans la mer, qui se comporte comme un guide d'ondes acoustiques dans lequel les ondes sont réverbérées entre le fond de la mer et la surface de l'eau, mais peuvent « fuir » latéralement. En effet, un guide d'ondes

présente peu de degrés de liberté fréquentiels. La solution consiste à travailler avec une cavité fermée, où les ondes sont piégées. On sait qu'un champ ondulatoire enfermé dans une cavité peut toujours s'écrire comme la superposition d'un certain nombre de « modes de vibration » dont les fréquences sont parfaitement définies. Pour chaque mode, tous les points du milieu vibrent avec la même fréquence temporelle, mais avec des phases et des amplitudes différentes.

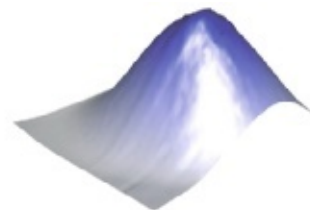
Certains points vibrent avec une certaine phase, d'autres en opposition de phase. Les points situés aux nœuds des modes ne vibrent pas du tout, alors que ceux situés aux ventres vibrent beaucoup. À chaque mode est associée une figure de vibration et la distance la plus petite entre un nœud et un ventre est égale à la demi-longueur d'onde des ondes acoustiques vibrant à la fréquence du mode. Par ailleurs, deux modes de fréquences différentes ont des figures d'oscillations indépendantes, qui sont les analogues de deux figures de tavelures décorrelées.

Si une source unique, située dans une cavité au point A, émet une impulsion brève à large spectre, elle peut exciter de nombreux modes de cette cavité, et un simple transducteur situé en un point quelconque B de la cavité peut servir de miroir à retournement temporel. Au point B, le transducteur mesure un signal, superposition de tous les modes produits par le point A, qui s'étale sur un temps très grand. Après retournement temporel, le signal est réémis dans la cavité et refocalise au point A. La refocalisation spatio-temporelle sera d'autant plus

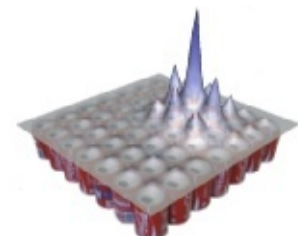


3. UN « CRISTAL » DE 49 CANETTES DE SODA peut osciller suivant 49 modes de vibration différents dont les fréquences s'étalent entre 340 et 420 hertz, alors qu'une canette isolée oscille à 420 hertz. Quand l'une des canettes reçoit un signal acoustique de quelques millisecondes, tous les modes du cristal sont excités et des transducteurs éloignés reçoivent la superposition de ces modes. Après retournement temporel, le signal se concentre sur l'unique canette où était située la source. La résolution atteint $\lambda/25$.

Tache focale sans les canettes



Tache focale avec les canettes



efficace que le nombre de modes excités par la source est grand. Quant à la dimension de la tache focale, elle est de l'ordre de la plus petite distance qui sépare un nœud d'un ventre des différents modes, c'est-à-dire de la demi-longueur d'onde des fréquences les plus élevées du spectre.

Une application de cette expérience touche la domotique : elle permet de transformer un objet solide quelconque (une table, une porte, un vase, un mur, etc.) en un clavier intelligent. Imaginons l'impact d'un doigt sur la surface d'un objet, qui, s'il n'est pas trop grand, se comporte comme une cavité. Il produit une onde élastique qui pénètre dans l'objet et s'y réverbère. L'enregistrement de cette signature sonore, sur un temps long, par un unique transducteur, contient toute l'information pour localiser la source de l'impact. Comme on l'a évoqué, un retournement temporel refocaliserait ce signal sur sa source. Pour réaliser un clavier tactile, on divise la surface de l'objet en points d'impact élémentaires dont on enregistre, dans une phase d'apprentissage, les signatures temporelles acoustiques. Puis, quand on tape à un endroit de l'objet, on compare la signature de cet impact à la banque des signatures mémorisées.

Cela revient à réaliser mathématiquement, dans l'ordinateur, l'opération de retournement temporel, et permet d'obtenir des objets tactiles très pratiques. Non seulement on peut réaliser des claviers à touches virtuelles, mais la technique est aussi applicable quand un doigt se déplace sur une surface. Le doigt crée, en glissant, un bruit de frottement qui permet de

suivre sa trajectoire : le doigt devient ainsi une souris d'ordinateur. Une jeune entreprise, *Sensitive Object*, créée par Ros Kiri Ing, un des chercheurs de notre laboratoire, a connu un grand succès et a été récemment rachetée par une grande société américaine, *Tyco-Electronics*, et développe de telles tablettes tactiles.

Des résonateurs couplés pour la super-résolution

Les exemples précédents montrent qu'un milieu diffusant ou des parois réfléchissantes permettent à une petite antenne de se transformer en une lentille spatio-temporelle capable de focaliser pendant un temps bref des signaux sur une dimension de l'ordre de la longueur d'onde. Est-il possible d'utiliser le même principe pour descendre au-dessous de la longueur d'onde ? On peut effectivement y parvenir, mais, pour ce faire, il ne faut pas que la source sur laquelle on veut focaliser le faisceau soit située dans un milieu homogène : c'est la source elle-même qui est placée dans un milieu hétérogène.

Ce milieu qui entoure la source doit créer un spectre de modes dont les échelles d'oscillations spatiales sont bien inférieures aux longueurs d'onde utilisées. Pour obtenir un tel résultat, il faut un milieu formé d'une collection de petits résonateurs fortement couplés entre eux. Ces résonateurs doivent avoir des dimensions beaucoup plus petites que la longueur des ondes qui les mettent en résonance. On

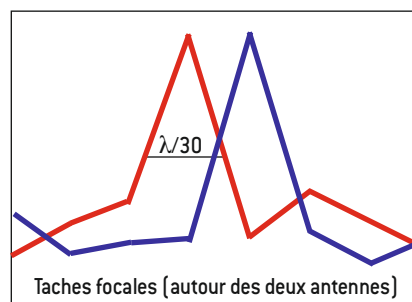
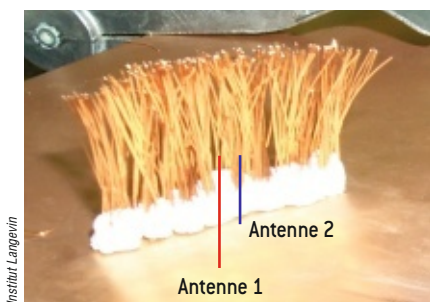
parle de résonateurs sublongueur d'onde qui, du fait de leur petite dimension, peuvent être disposés en nombre dans une zone petite comparée à la longueur d'onde. Ils sont répartis soit de façon désordonnée soit de façon périodique.

On réalise alors une structure (une sorte de métamatériau) qui ressemble à une grosse molécule formée d'atomes identiques couplés entre eux ou à un petit morceau de cristal. On sait qu'un atome se comporte comme un résonateur qu'excitent des photons de fréquences données. La longueur d'onde de ces photons excitateurs est bien supérieure à la taille de l'atome. Lorsqu'on étudie une molécule formée de plusieurs atomes couplés, on observe un spectre de modes de résonance plus riche que celui d'un atome particulier et, à chaque fréquence, correspond une structure spatiale spécifique d'oscillation des atomes (un mode de vibration des atomes).

L'échelle spatiale des oscillations de ces modes peut être aussi petite que la distance entre deux atomes voisins, qui, ici, est bien inférieure à la longueur d'onde. Dès lors, on comprend qu'une antenne à large bande (utilisée pour le retournement temporel) capable d'exciter de nombreux modes sublongueur puisse créer des concentrations de lumière ou d'énergie mécanique sur des taches focales dont la taille sera inférieure à la longueur d'onde. Plus le nombre de résonateurs couplés est grand, plus l'effet est spectaculaire.

Nous avons réalisé les premières démonstrations de ce principe dans le domaine des micro-ondes et des ondes acoustiques, avec Geoffroy Lerosey, Julien de Rosny, Fabrice Lemoult et Arnaud Tourin, à l'Institut Langevin. Dans la première expérience, nous nous sommes intéressés à la focalisation d'ondes électromagnétiques du type micro-ondes utilisées en télécommunication dans la bande Wi-Fi. La fréquence centrale d'utilisation est égale 2,4 gigahertz correspondant à une longueur d'onde de 12 centimètres.

La source de rayonnement utilisée est un petit fil de cuivre que l'on insère au sein d'une structure faite de centaines de petits fils de cuivre répartis latéralement de façon aléatoire, mais très proches les uns des autres. Ces fils ont tous la même longueur choisie pour résonner à 2,4 gigahertz. En se couplant entre eux, ils créent un spectre de modes collectifs très riches qui contient de nombreuses fréquences



4. DE NOMBREUX PETITS FILS DE CUIVRE (résonateurs électromagnétiques), de même taille, sont répartis de façon aléatoire sur un support. Leur couplage crée un ensemble très riche de modes collectifs d'oscillations. Ces modes sont excités par une impulsion électromagnétique émise par une petite antenne (rouge ou bleue) insérée au cœur de la structure. Une antenne située à grande distance reçoit un signal complexe, la superposition de tous les modes excités. Une opération de retournement temporel et de réémission permet de refocaliser l'onde sur sa source, mais avec une tache focale de taille millimétrique ($\lambda/30$, figure de droite), soit quatre millimètres. Cela signifie qu'une antenne éloignée peut envoyer des messages distincts focalisés sur chacune des deux antennes proches.