

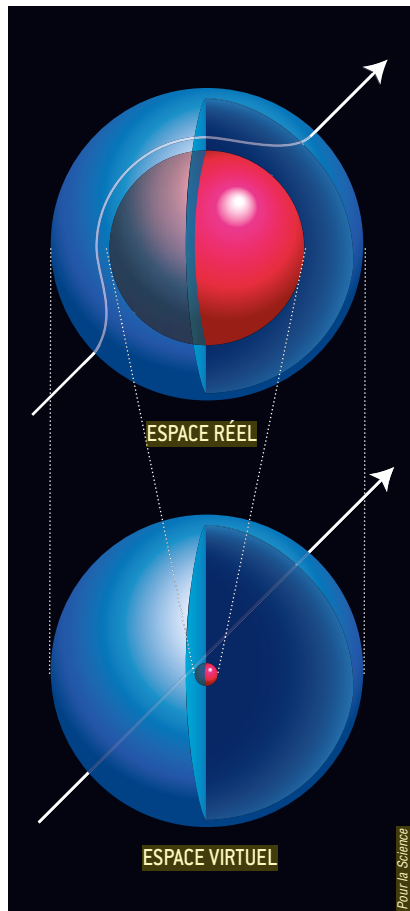
de coordonnées déforme les trajets des ondes, de façon à réaliser la situation souhaitée : par exemple contourner la région à dissimuler. Cependant, ce retour à l'espace réel modifie aussi ϵ et μ , c'est-à-dire que leurs valeurs varient dans l'espace selon un certain motif. Nous voyons que pour déformer comme on le souhaite les trajectoires des ondes électromagnétiques, il suffit de « sculpter » le matériau selon le motif en ϵ et μ indiqué par la transformation géométrique de J. Pendry.

Et cela fonctionne ! En mai 2006, cinq mois après avoir publié leur méthode, J. Pendry et ses collègues ont fabriqué grâce à elle une cape d'invisibilité, où ils ont fait ainsi disparaître de la vue (dans le domaine des micro-ondes) un cylindre plat de cuivre de trois centimètres de rayon.

Pour obtenir sa cape d'invisibilité, J. Pendry a choisi une transformation géométrique qui revient à comprimer une boule en une coquille sphérique, délimitée par deux sphères concentriques. Dans l'espace virtuel, le matériau est une boule homogène pointée (c'est-à-dire dont le centre est exclu) ; dans l'espace réel, il correspond à une boule évidée d'un noyau sphérique, où on loge l'objet à cacher (voir la figure 2).

Dans l'espace virtuel, les ondes électromagnétiques traversent la boule en ligne droite sans être perturbées par le point central. Dans l'espace réel, elles contournent le noyau, à la manière de l'eau d'une rivière s'écoulant sans turbulences autour d'un rocher (voir la figure 3). Autrement dit, elles sont insensibles à l'objet placé dans le noyau, qui est comme transparent.

Que se passe-t-il à l'intérieur de la cape ? Un observateur situé dans la région

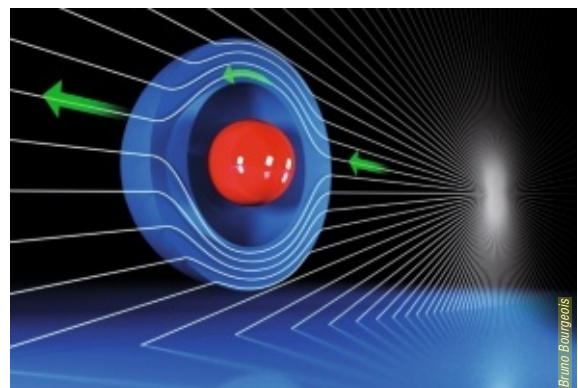
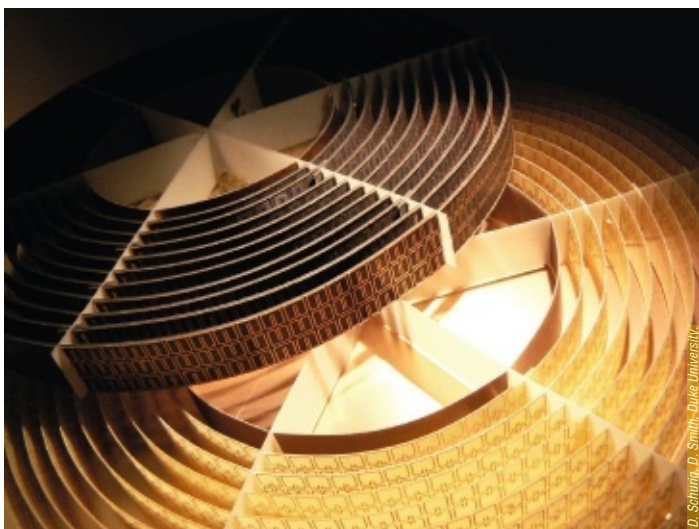


2. DANS UN ESPACE VIRTUEL, on considère un volume sphérique dont le centre (*en rouge*) est exclu. Une transformation géométrique lui associe, dans l'espace réel, une coquille sphérique dont les dimensions extérieures sont conservées, mais celles du cœur notablement augmentées. Certaines caractéristiques du milieu, homogènes dans l'espace virtuel, deviennent anisotropes, ce qui a pour conséquence que les ondes électromagnétiques (*flèches blanches*) contournent le cœur de la coquille.

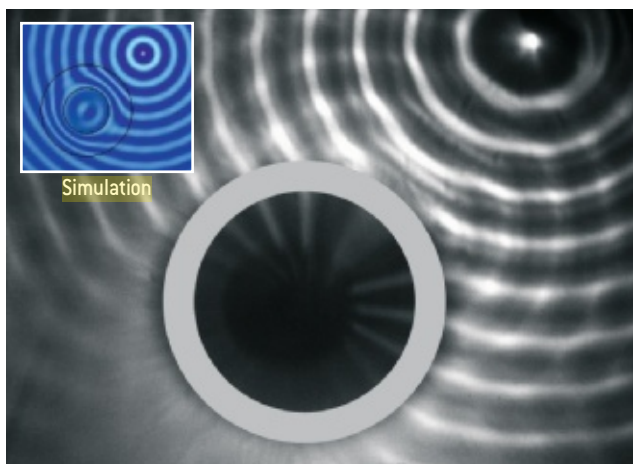
centrale est coupé du monde extérieur. Plongé dans le noir le plus complet, il ignore ce qui se passe en dehors de la cape : il se trouve dans une sorte de trou noir optique. C'est ce que confirment les simulations numériques. Elles montrent aussi que les ondes qui contournent le noyau d'invisibilité se reforment derrière lui avec la même phase que celle qu'elles auraient eue si elles s'étaient propagées dans le vide.

En fait, la cape d'invisibilité de J. Pendry fonctionne seulement à deux dimensions et dans le domaine des micro-ondes. À quoi ressemble-t-elle ? Le cylindre de cuivre qu'elle fait disparaître est entouré d'une structure cylindrique creuse d'apparence hétérogène, dont le rayon extérieur est de six centimètres. Si l'on y regarde de plus près, cet anneau est constitué lui-même de dix cylindres concentriques à la surface desquels sont imprimées des petites boucles en cuivre : des résonateurs en forme d'anneaux fendus. C'est cet ensemble qui constitue le métamatériau et qui forme la cape d'invisibilité. Notons que son emploi suppose aussi celui d'un guide d'ondes afin de prépositionner le champ électrique à la verticale.

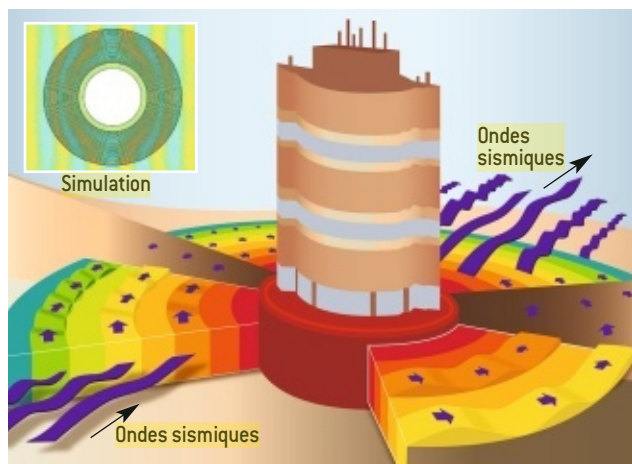
Peut-on étendre le principe de la cape de J. Pendry au domaine du visible ? Oui, mais il faut en pratique franchir de nombreux obstacles. La sensibilité des métamatériaux à la longueur d'onde gêne la réalisation d'une cape efficace à plus d'une longueur d'onde. Il faudra ensuite passer à trois dimensions. Enfin, la réalisation de résonateurs à anneaux fendus de taille au moins dix fois inférieure à la longueur



3. LA CAPE D'INVISIBILITÉ DE J. PENDRY (*ci-contre à gauche*) détourne les ondes centimétriques ou micro-ondes, comme sur le schéma ci-dessus. Cette propriété résulte de la présence de minicircuits de taille inférieure à la longueur d'onde et de l'architecture en anneaux concentriques.



4. CETTE CAPE ANTIVAGUES (au premier plan, masquée par un disque car elle brille au flash) stabilise et aplatit un train incident de vaguelettes (en haut à droite). En mer, de tels dispositifs pourraient protéger des plateformes pétrolières ou des portions de côte.



5. UNE CHAPE ANTISISMIQUE est une cape d'invisibilité pour les ondes dites de Rayleigh. Elle est structurée de façon que ces ondes de surface – les plus destructrices lors d'un séisme – contournent son centre, donc épargnent les fondations du bâtiment.

d'onde visée reste pour l'heure un défi technique : dans le cas du spectre visible, il faudrait des motifs de quelques dizaines de nanomètres seulement...

Malgré ces obstacles, les avancées théoriques et techniques ont été si rapides que certains physiciens prévoient l'élaboration de capes d'invisibilité dans le domaine visible d'ici une dizaine d'années. Aux longueurs d'onde radio, les applications porteraient sur le développement de boucliers ou casques protecteurs électromagnétiques. Des capes d'invisibilité pourraient isoler les appareils sensibles du rayonnement électromagnétique ambiant dans les carlingues des avions ou les hôpitaux. On peut aussi imaginer des casques protecteurs contre les ondes des téléphones portables...

La transposition de ces principes à la réalisation de capes acoustiques, sismiques ou déviant les vagues de la mer est aussi possible. Ainsi, notre équipe marseillaise a récemment réalisé une petite structure déviant les vagues. Elle est constituée d'un disque métallique évidé et de 20 centimètres de diamètre, divisé en secteurs concentriques et radiaux. Nous avons vérifié son efficacité au cours d'une expérience en cuve à ondes, et constaté que la structure rend en effet la surface liquide étale en son centre. Une telle structure, à une échelle bien plus grande bien sûr, pourrait protéger des plateformes pétrolières ou certaines zones côtières contre les tsunamis (voir la figure 4).

Une cape sismique est aussi envisageable. Avec Alexander Movchan, de l'Uni-

versité de Liverpool, au Royaume-Uni, nous avons proposé une solution en nous concentrant sur les plus destructrices des ondes associées aux tremblements de terre : les ondes de Rayleigh, qui sont un type particulier d'onde de flexion (le sol fléchit en surface). Ces recherches ont produit une chape, qui, placée dans les fondations d'un immeuble, le protégerait en grande partie des effets d'un séisme (voir la figure 5). Les ondes de flexion contourneraient le centre de la chape et continueraient leur chemin sans traverser le bâtiment à protéger.

Lentille parfaite

Grâce au principe mis au point par J. Pendry et ses collègues, la réalisation d'une lentille parfaite est aussi envisageable. On nomme ainsi une lentille qui ne déforme pas l'image, ne l'inverse pas et qui a une résolution infinie (l'image d'un point est strictement un point). Les lentilles convergentes convexes usuelles, d'indice de réfraction supérieur à celui du vide ($n = 1$), forment sur le plan image une image inversée, et où deux points distants de moins d'une demi-longueur d'onde environ ne peuvent être distingués. Cette limite ultime de résolution est due à la diffraction de la lumière incidente sur l'objet imagé. On la croyait infranchissable avant l'avènement de la lentille parfaite.

La lentille parfaite théorique consiste en une couche parfaitement plate d'indice de réfraction négatif. Rappelons que l'indice optique ou l'indice de réfraction d'un

matériau est le rapport des vitesses de la lumière dans le vide et dans le matériau : $n = c/v$. Toutefois, la vitesse v de propagation de la lumière dans un milieu est intimement liée à la perméabilité magnétique μ et à la permittivité électrique ϵ par la relation $\mu\epsilon v^2 = 1$, ou, ce qui revient au même, $n = \pm c\sqrt{\mu\epsilon}$.

Sauf rares exceptions, les milieux optiques naturels ont tous une perméabilité et une permittivité positives, et en conséquence un indice de réfraction n positif et supérieur à 1. Toutefois, vers 1968, le physicien russe Victor Veselago s'est intéressé au cas des matériaux ayant une perméabilité et une permittivité négatives. Il a montré que les lois de l'optique impliquent que les matériaux correspondants – qui sont, en pratique, des métamatériaux – ont un indice négatif (c'est-à-dire $n = -c\sqrt{\mu\epsilon}$). L'étude de la réfraction négative était née, et avec elle celle de la « lentille plate de Veselago » : une simple lame d'indice négatif égal à -1 .

C'est une fois de plus J. Pendry qui, en 2000, en proposa la réalisation. Il avait en effet montré qu'une alternance périodique de fils métalliques et de résonateurs à anneaux fendus présentait une permittivité négative pour les basses fréquences et une perméabilité négative autour de certaines fréquences dites de résonance. Il réalisait ainsi en pratique, mais pour certaines fréquences seulement, le milieu optique imaginé par V. Veselago.

Là encore, la méthode géométrique générale expliquée plus haut permet de se représenter facilement les effets de la