

gueur d'onde parcourue. Il est donc clair que ses interactions avec un matériau seront plus compliquées si la structure de ce dernier comporte des détails de taille inférieure à la longueur d'onde. Or, au sein d'un matériau optique usuel, chaque cube mesurant une longueur d'onde lumineuse de côté contient des milliards d'atomes ou de molécules. On peut donc en général considérer que les propriétés optiques d'un tel milieu sont constantes dans toutes les directions sur une longueur d'onde au moins et en pratique sur de bien plus grandes distances. La plupart des matériaux naturels et artificiels sont de tels matériaux : on les dit isotropes. Toutefois, il existe aussi des matériaux naturels dits anisotropes dont la structure microscopique crée des directions privilégiées. C'est le cas des matériaux biréfringents, dont l'indice de réfraction optique n'est pas le même dans toutes les directions.

L'anisotropie des matériaux naturels peut être imitée artificiellement en remplaçant les arrangements atomiques par des arrangements de dispositifs optiques de tailles inférieures à la longueur d'onde. Un métamatériau est donc un matériau dont certaines propriétés, optiques par exemple, ne résultent pas de sa composition chimique élémentaire, mais d'une architecture artificielle (voir la figure 1). Cette dernière lui confère des propriétés, dites effectives, qui dépendent de la direction.

## Invisibilité par réfraction

Aujourd'hui, les physiciens savent de mieux en mieux conférer à un matériau l'anisotropie nécessaire pour donner à une onde électromagnétique ou autre une conformation fixée. John Pendry, de l'*Imperial College* de Londres, David Schurig, de l'Université d'État de Caroline du Sud, et David Smith, alors à l'Université de San Diego, ont indiqué en 2006 la méthode générale pour y parvenir.

Avant d'expliquer l'idée de cette méthode, rappelons que la propagation du champ électromagnétique dans le vide ou dans un matériau transparent est décrite par les équations de Maxwell. Ces équations fondamentales de l'électromagnétisme décrivent de quelle façon se comportent dans le temps et l'espace les composantes indissociables du champ électromagnétique, à savoir le champ électrique et le champ magnétique.

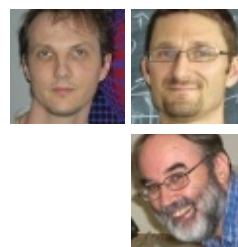
Toutefois, au sein d'un matériau transparent (et aux propriétés linéaires), la réaction de la matière aux champs électrique et magnétique modifie ces derniers de façon proportionnelle. Cette réaction est caractérisée par deux grandeurs, la permittivité diélectrique, notée  $\epsilon$ , pour ce qui est du champ électrique, et la perméabilité magnétique, notée  $\mu$ , pour ce qui est du champ magnétique. Elles caractérisent la « réponse » du matériau au champ électromagnétique. La stratégie de J. Pendry et de tous les concepteurs de métamatériaux consiste à contrôler les grandeurs  $\epsilon$  et  $\mu$  dans le volume occupé par le métamatériau et ainsi à modifier à volonté la propagation d'un champ électromagnétique dans la structure.

L'entreprise serait compliquée si J. Pendry n'avait trouvé une méthode mathématique pour la ramener à la recherche d'une transformation géométrique, un changement de métrique pour être plus précis. On désigne par ce terme un changement de la définition de la distance entre deux points, qui en pratique se traduit par un changement des coordonnées spatiales. Les équations de Maxwell gardent la même forme lorsqu'on fait des changements de coordonnées d'espace. En revanche,  $\epsilon$  et  $\mu$  sont modifiées, ce qui crée des directions privilégiées, donc un milieu anisotrope.

Puisque, dans un tel milieu, ces grandeurs dépendent de la direction,  $\epsilon$  et  $\mu$  ne sont plus représentées chacune par un seul nombre, mais par un tableau de  $3 \times 3$  nombres appelé tenseur. Toutefois, oublions ce détail technique et retenons seulement que, pour décrire l'anisotropie, les physiciens emploient un formalisme qui, au prix d'une complication de la nature mathématique de  $\epsilon$  et de  $\mu$ , leur permet de changer d'espace (et de coordonnées) tout en conservant la forme habituelle des équations de Maxwell, ainsi que la forme des calculs usuels en électromagnétisme.

Pour obtenir un milieu anisotrope structuré à volonté, J. Pendry définit d'abord ce qu'il souhaite : par exemple, une situation où les ondes contournent une certaine région de l'espace. Par changement de métrique, il passe dans un espace virtuel où est réalisé ce qu'il souhaite : par exemple que cette région soit réduite à un point. Il impose que  $\epsilon$  et  $\mu$  y soient constantes, de sorte que les ondes s'y propagent en ligne droite. Une fois obtenu cet espace virtuel où la permittivité et la perméabilité sont uniformes, le changement inverse

## LES AUTEURS



Sébastien GUENNEAU et Stefan ENOCH sont chercheurs du CNRS à l'Institut Fresnel de l'Université d'Aix-Marseille. Ross MCPHEDRAN est professeur à l'Université de Sydney, en Australie.

## L'ESSENTIEL

- ✓ Les métamatériaux sont des dispositifs conçus pour réfracter les ondes de façon contrôlée.
- ✓ Une méthode géométrique générale détermine, à partir des trajets recherchés pour les ondes, les propriétés que doit avoir le métamatériau.
- ✓ On a ainsi créé des capes d'invisibilité capables d'escamoter une partie de l'espace ainsi que des lentilles qui, en principe, ont une résolution parfaite.
- ✓ Ces métamatériaux sont toutefois très sensibles à la longueur d'onde et ne fonctionnent que sur un spectre étroit.

Mina H. Tanielian, Boeing Phantom Works

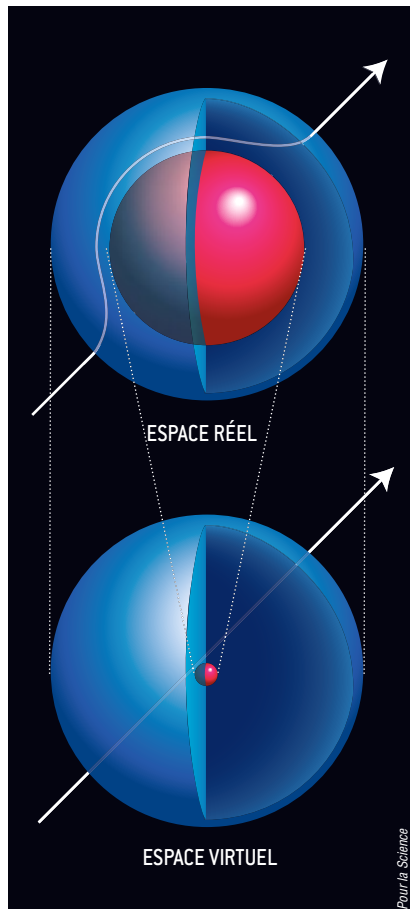
de coordonnées déforme les trajets des ondes, de façon à réaliser la situation souhaitée : par exemple contourner la région à dissimuler. Cependant, ce retour à l'espace réel modifie aussi  $\epsilon$  et  $\mu$ , c'est-à-dire que leurs valeurs varient dans l'espace selon un certain motif. Nous voyons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

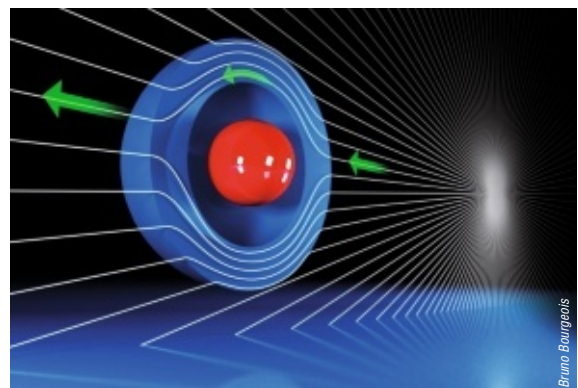
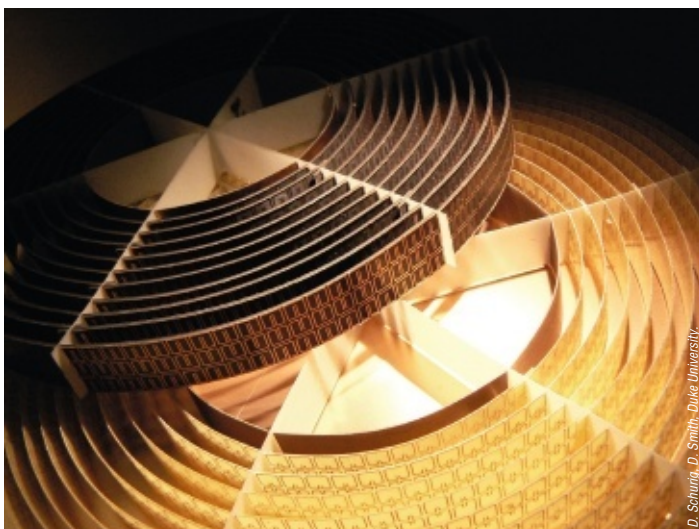


**2. DANS UN ESPACE VIRTUEL**, on considère un volume sphérique dont le centre (*en rouge*) est exclu. Une transformation géométrique lui associe, dans l'espace réel, une coquille sphérique dont les dimensions extérieures sont conservées, mais celles du cœur notablement augmentées. Certaines caractéristiques 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.