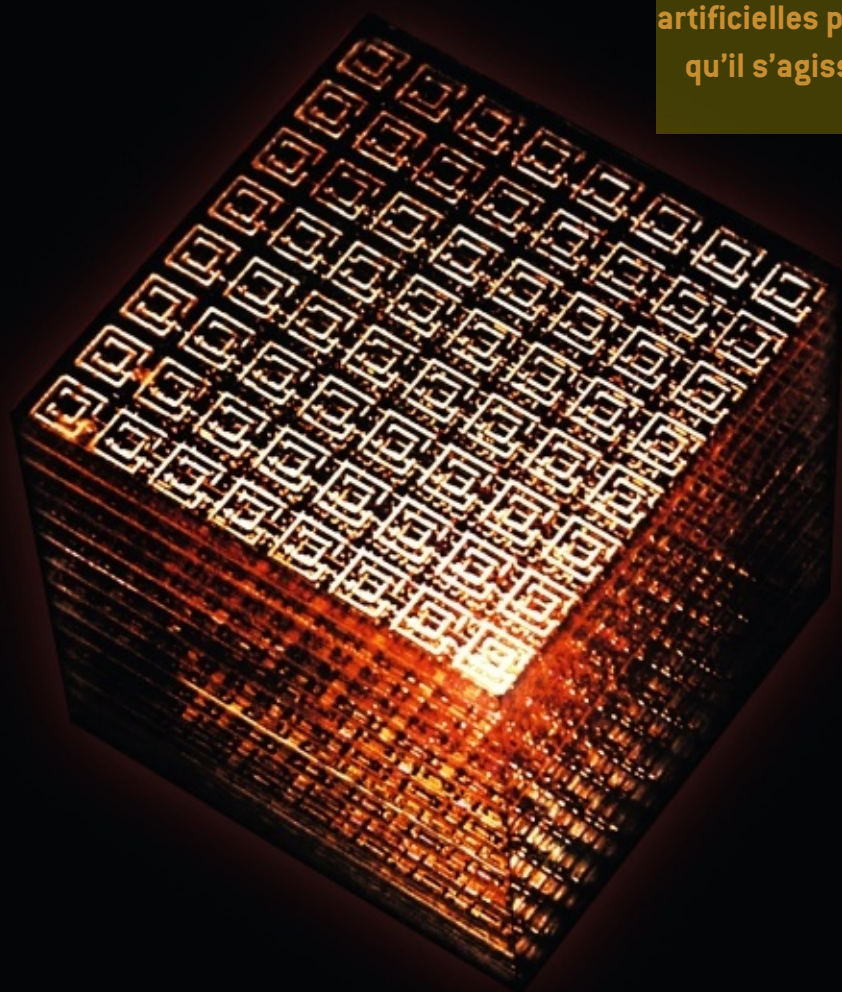


Les ondes sous l'emprise des **métamatériaux**

Sébastien Guenneau, Stefan Enoch et Ross McPhedran

Les physiciens élaborent des structures artificielles pour conformer à volonté les ondes, qu'il s'agisse de lumière, de vagues sur la mer ou encore d'ondes sismiques.



1. CE DISPOSITIF est une lentille quasi parfaite pour certaines ondes qu'il transmet sans les déformer. Cet effet résulte de l'agencement calculé de petits circuits élémentaires, des anneaux de cuivre fendus.

Les Grecs anciens avaient imaginé un casque rendant le dieu des enfers invisible: la Kunée d'Hadès. Depuis se succèdent les légendes et les fictions où des « capes d'invisibilité » confèrent à celui qui s'en revêt le pouvoir de disparaître à la vue. Or les physiciens parviennent aujourd'hui à conformer les ondes de façon à escamoter une partie de l'espace. Ils emploient pour cela des structures composées de motifs élémentaires ayant une taille inférieure à la longueur d'onde incidente. Nous allons expliquer comment les chercheurs déduisent ces structures de transformations reliant l'espace réel à un espace virtuel, où une partie de l'espace d'origine a été supprimée. Puis nous évoquerons plusieurs de ces structures que l'on nomme des métamatériaux.

Qu'est-ce exactement qu'un métamatériau? Le mieux est de répondre à cette question dans le cas le plus spectaculaire: celui des métamatériaux optiques. Pour une onde lumineuse monochromatique, le champ électromagnétique réalise un cycle d'oscillation pour chaque lon-

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.

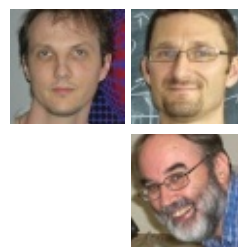
Toutefois, au sein d'un matériau transparent (et aux propriétés linéaires), la réaction de la matière aux champs électrique et magnétique modifie ces derniers de façon proportionnelle. Cette réaction est caractérisée par deux grandeurs, la permittivité diélectrique, notée ϵ , pour ce qui est du champ électrique, et la perméabilité magnétique, notée μ , 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 ϵ et μ 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, ϵ et μ sont modifiées, ce qui crée des directions privilégiées, donc un milieu anisotrope.

Puisque, dans un tel milieu, ces grandeurs dépendent de la direction, ϵ et μ ne sont plus représentées chacune par un seul nombre, mais par un tableau de 3×3 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 ϵ et de μ , 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 ϵ et μ 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.

Minas H. Tanielian, Boeing Phantom Works