

ensemble d'images qu'un ordinateur combine pour former une image tridimensionnelle complète de l'objet.

Mais les rayons X sont relativement inefficaces pour distinguer les tissus mous. Les chercheurs ont donc commencé à développer de nouvelles techniques d'imagerie médicale fondées sur l'utilisation d'ondes différentes. Une inquiétude se fit jour immédiatement : et si certains objets n'étaient pas visualisables par ces techniques ? En d'autres termes, existait-il des objets invisibles pour ces techniques d'imagerie ? S'il existait par exemple des « tumeurs invisibles », alors toute technique utilisant des ondes pour explorer le corps humain présenterait de graves défauts.

L'invisibilité, mission impossible ?

Heureusement, des travaux théoriques de la fin des années 1980 ont montré que, en général, il n'existe pas d'objets invisibles. Un objet peut être complètement invisible lorsqu'il est éclairé d'une seule direction (par exemple, nombreux sont ceux qui se sont cognés sur une porte en verre parce que l'éclairage était tel que la porte devenait invisible), mais il semble impossible qu'un objet soit invisible pour toutes les directions d'éclairage.

Ce résultat a semblé régler définitivement la question, jusqu'à ce que, en 2006, deux études théoriques soient publiées dans la revue *Science*, l'une par Ulf Leonhardt, à l'université de Saint Andrews, en Écosse (et aujourd'hui à l'institut Weizmann, en Israël), et l'autre par John Pendry, de l'Imperial College de Londres, avec David Schurig et David Smith, de l'université Duke aux États-Unis. Ces deux articles proposaient des modèles théoriques de cape d'invisibilité fondés sur une technique nouvelle nommée optique transformationnelle.

De quoi s'agit-il ? Quand de la lumière passe d'un milieu à un autre, par exemple de l'eau à l'air, elle change de direction – on parle de réfraction. Cet effet est évident quand on observe une paille plongée dans un verre d'eau : la paille semble pliée à l'interface air-eau. L'idée clé de l'optique transformationnelle a consisté à remarquer que, dans de nombreux cas, courber des ondes lumineuses équivaut mathématiquement à déformer la géométrie de l'espace. Le principe consiste donc à concevoir la déformation spatiale

L'AUTEUR



Gregory J. GBUR est maître de conférences au département de physique et d'optique de l'université de Caroline du Nord à Charlotte, aux États-Unis.

Article publié avec l'aimable autorisation de la revue *American Scientist*.

souhaitée, en l'occurrence celle qui force les rayons lumineux à contourner la région à dissimuler, puis à en déduire le type de matériaux nécessaires pour produire le dispositif de camouflage.

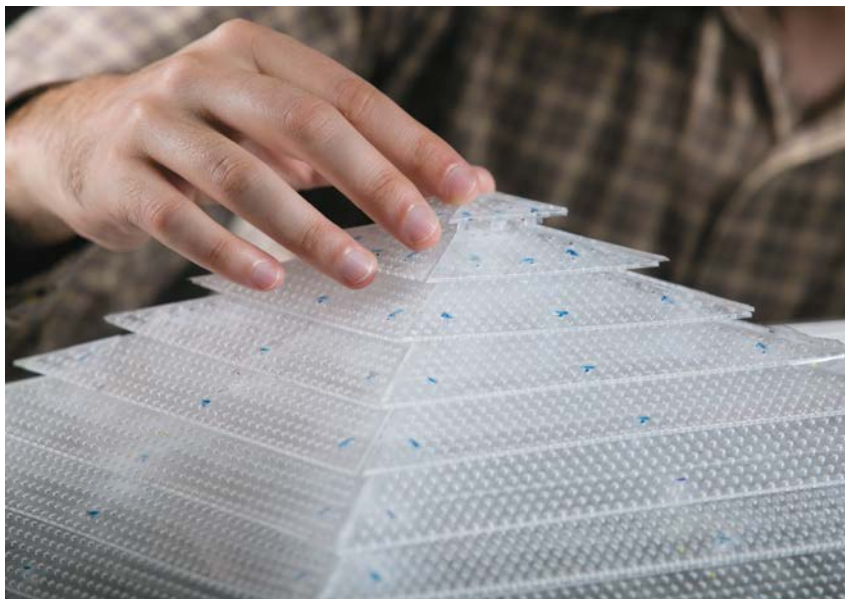
Comment ces dispositifs de dissimulation seraient-ils possibles alors que des recherches antérieures avaient apparemment prouvé l'impossibilité de l'invisibilité ? Les auteurs des deux études de 2006 résolvaient cette contradiction apparente de deux façons différentes. Ulf Leonhardt notait simplement que la non-existence de l'invisibilité « parfaite » n'exclut pas la possibilité d'une quasi-invisibilité : un objet invisible à 99 %, par exemple, serait sans doute acceptable pour la plupart des applications. Quant à John Pendry et ses deux coauteurs, ils faisaient observer que les preuves de non-existence ne prennent pas en compte des milieux matériels très particuliers que l'on ne trouve pas dans la nature, mais que l'on pourrait en principe fabriquer en laboratoire.

Les métamatériaux entrent en scène

Ces chercheurs pensaient à ce qu'on appelle à présent des « métamatériaux », des milieux formés par un assemblage de structures artificielles. Alors que la plupart des matériaux naturels ne réagissent qu'au champ électrique des ondes lumineuses, on pourrait mettre au point des métamatériaux présentant en outre une réponse magnétique. De plus, la plupart

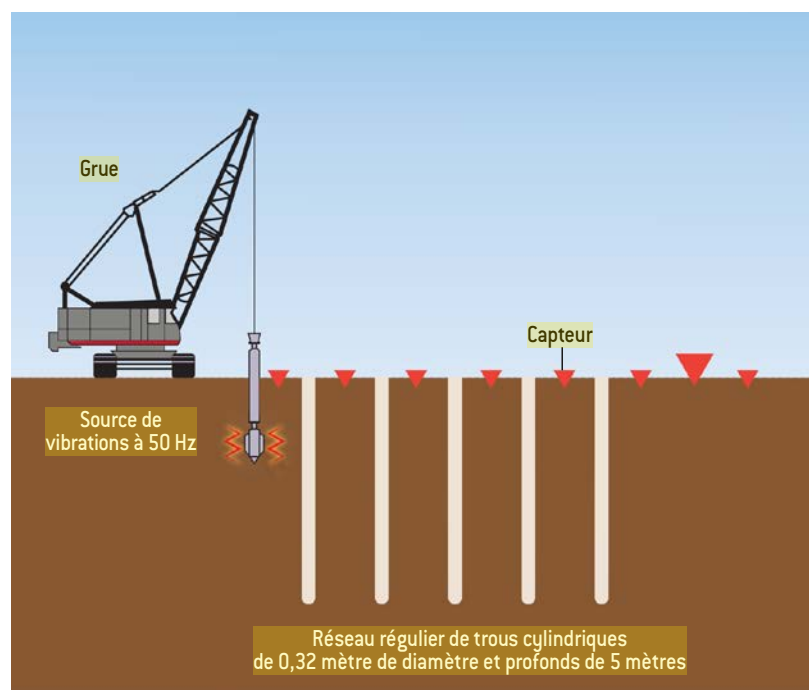
CE « TAPIS » ACOUSTIQUE

réalisé en 2014 à l'université Duke renvoie les ondes sonores vers un auditeur comme si elles n'avaient rencontré aucun obstacle, dissimulant ainsi l'objet qu'il recouvre. Steven Cummer et ses collègues ont effectué de longs calculs pour déterminer le positionnement précis de trous et de feuilles de plastique permettant de modifier la trajectoire des ondes sonores de façon appropriée.



École Pratt d'ingénierie, université Duke

PROTECTION ANTISISMIQUE



AVEC DES TROUS DE FORAGE PRÉCISÉMENT ESPACÉS, qui font varier la densité moyenne du sol d'un endroit à l'autre, on peut contrôler la vitesse, donc la direction, de propagation dans le sol d'une onde de vibration. Une expérience récente, schématisée ci-dessus et réalisée par Stéphane Brûlé, de l'entreprise Ménard, et ses collègues, a ainsi montré qu'un tel réseau dévie les ondes de surface produites par une source artificielle. Ce principe permettrait de protéger une structure contre des ondes sismiques.

D'après S. Brûlé et al., Phys. Rev. Lett., vol. 112, 133901, 2014.

des matériaux naturels sont isotropes, c'est-à-dire que la lumière s'y propage à la même vitesse quelle que soit sa direction. Les matériaux anisotropes, où la vitesse de la lumière dépend de la direction considérée, offrent une liberté supplémentaire pour concevoir de véritables dispositifs de dissimulation.

Se cacher des micro-ondes

Fin 2006, les chercheurs de l'Imperial College et de l'université Duke ont construit et testé un dispositif rudimentaire capable de cacher un objet vis-à-vis de micro-ondes. Depuis, divers concepts de dispositif de dissimulation ont été proposés, et un certain nombre d'entre eux ont été testés. Notamment, en 2014, l'équipe de l'université de Duke a fait la démonstration d'une cape d'invisibilité aux ondes acoustiques. Bien que ces dispositifs soient loin de pouvoir prétendre à une véritable invisibilité, ils illustrent la validité des concepts théoriques.

La dissimulation parfaite vis-à-vis des rayons lumineux se heurte cependant à

un certain nombre d'obstacles majeurs. Côté pratique, la construction de métamatériaux suppose que l'on soit capable de manipuler la structure de la matière à des échelles du même ordre que la longueur d'onde de la lumière (condition d'une forte influence sur l'onde). Comme la lumière visible a des longueurs d'onde de l'ordre du millionième de mètre, cette tâche n'est pas encore à notre portée.

Il y a par ailleurs, du côté théorique, un défi encore plus difficile à relever. Pour que la cape soit vraiment indétectable, la lumière doit mettre le même temps à traverser la cape qu'à passer à côté. Or la lumière passant à l'intérieur de la cape doit parcourir une distance supérieure pour éviter la région masquée, ce qui signifie qu'elle doit se propager plus vite que la lumière extérieure. Par conséquent, la lumière à l'intérieur de la cape doit voyager à une vitesse supérieure à celle de la lumière dans l'air, qui est presque identique à la vitesse de la lumière dans le vide, c . Il est possible de réaliser cet exploit pour une plage très étroite de fréquences sans dépasser c et violer la théorie de la relativité d'Einstein,

mais il semble impossible de le faire pour tout le spectre visible simultanément. En d'autres termes, on pourrait masquer une nuance donnée de rouge, mais l'objet resterait bien visible pour la lumière de toutes les autres couleurs.

Si l'on ne réalisera probablement pas de capes d'invisibilité optique parfaites, ou juste raisonnablement bonnes, et de taille correcte, de nombreux obstacles à la dissimulation vis-à-vis de la lumière visible disparaissent pour d'autres types d'ondes que la lumière. La vitesse de ces ondes, très inférieure, n'a pas, en pratique, de limite supérieure; de plus, les longueurs d'onde en jeu sont beaucoup plus grandes, ce qui les rend plus aisées à manipuler. Et si ce qui nous intéresse est de concevoir des dispositifs pour se protéger d'ondes destructrices, nous n'avons pas besoin d'atteindre la perfection. Une «cape d'invisibilité» réduisant l'impact d'une onde sismique sur un bâtiment ne serait-ce que d'un ordre de grandeur pourrait empêcher l'effondrement de ce dernier.

Boucliers souterrains

Les scientifiques ont proposé, pour se protéger des ondes, plusieurs dispositifs fondés sur l'idée de dissimulation par cape. Par exemple, on pourrait entourer un bâtiment d'une série de trous ou de piliers positionnés de manière très précise dans le sol, ce qui ferait varier spatialement la densité moyenne du sol et, par conséquent, la direction de propagation des éventuelles ondes sismiques destructrices, lesquelles dévièrent de façon à éviter la structure.

Avec des collègues, Sébastien Guenneau et Stefan Enoch, de l'institut Fresnel (CNRS/Aix-Marseille université/Centrale Marseille) ont testé cette idée. En 2012, un réseau de trous a été mis en place par l'équipe de Stéphane Brûlé, de l'entreprise Ménard, pour faire écran à un générateur d'ondes sismiques artificielles (voir la figure ci-dessus). Bien que le système ait simplement bloqué les ondes plutôt que de les guider, il a démontré que des structures souterraines pouvaient agir sur ce type d'ondes.

Il est également possible de créer des dispositifs de dissimulation pour les ondes sonores se propageant dans l'air ou dans l'eau. En 2011, Nicholas Fang et des collègues, à l'université de l'Illinois à Urbana-Champaign, ont fait la démonstration