

Méta

> Cet empilement d'anneaux de cuivre sculptés est ni plus ni moins qu'une cape d'invisibilité!

> REPÈRES

Depuis le xvii^e siècle, les règles de propagation des rayons lumineux dans les milieux transparents sont claires : Descartes et Snell ont montré qu'elle dépendait de l'indice de réfraction, soit le rapport entre les vitesses de la lumière dans le vide et dans le milieu transparent. Cet indice était forcément supérieur à 1, puisque rien ne va plus vite que la lumière dans le vide. Mais, il y a quelques années, les physiciens ont réussi à fabriquer d'autres types de matériaux, d'indice inférieur à 1, voire négatif, au comportement fascinant...

matériaux

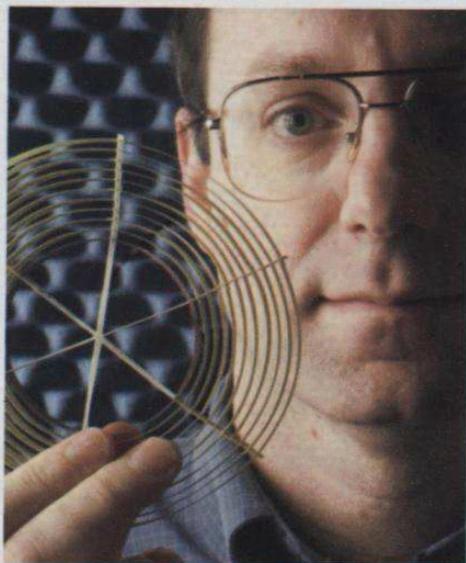
Le rêve d'invisibilité devient réalité

C'est une véritable prouesse: deux physiciens viennent de mettre au point un nouveau type de matériaux rendant les objets... invisibles! A quand la fameuse cape d'Harry Potter?

Par Cécile Michaut

L'annonce, publiée au milieu du mois d'octobre dans la très sérieuse revue *Science*, est fracassante: "Nous présentons ici la première réalisation pratique d'une cape d'invisibilité." Une cape d'invisibilité? Cette équipe de physiciens anglo-américains, dirigée par David Smith, de l'université Duke, au Etats-Unis, et par John Pendry, de l'Imperial College de Londres, aurait-elle réussi à confectionner cet objet fantasmagique digne de Siegfried, l'héroïque tueur de dragon de la mythologie nordique, ou de Harry Potter, le célèbre apprenti sorcier du

roman de Joanna Rowling? Eh bien, en un sens, oui! Qu'on en juge: une fois glissé un petit cylindre de cuivre dans la cape que David Smith a soigneusement tissée, celui-ci devient en partie invisible. Plus précisément, "la cape et l'objet combinés commencent à ressembler à un espace vide", notent les chercheurs dans leur publication. Et de fait, les mesures de la propagation des ondes aux alentours sont éloquentes: de même qu'un filet d'eau contourne un galet, les ondes électromagnétiques – c'est-à-dire la lumière – contournent le cylindre, →



< David Smith, de l'université Duke, brandit sa "cape d'invisibilité", efficace seulement dans deux dimensions... pour l'instant ?

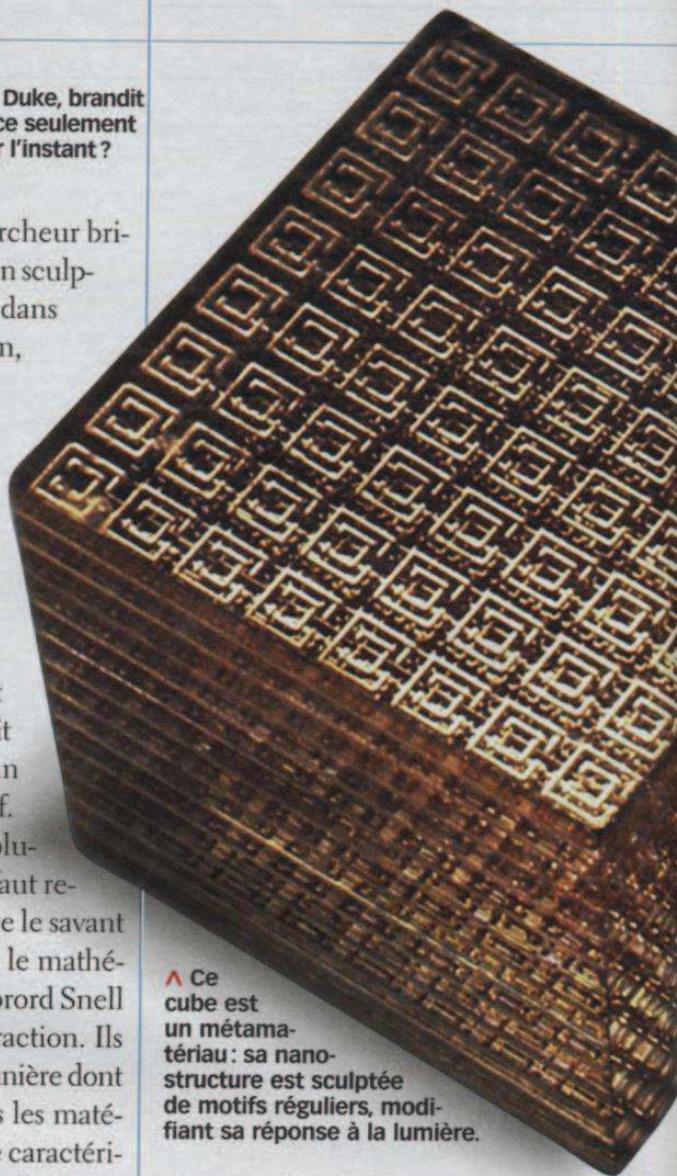
→ plutôt que de rebondir dessus ou d'être absorbées. Et le cylindre d'échapper ainsi au regard. Magique ! Et même si, pour l'heure, cette cape ne fonctionne que dans deux dimensions (c'est-à-dire en regardant l'objet à travers une fente) et seulement pour une petite bande de longueur d'onde loin du domaine visible (les micro-ondes), force est de reconnaître que le fantôme est en partie devenu réalité.

INDICE DE RÉFRACTION... NÉGATIF

Le secret de cet étonnant tour de passe-passe, ce sont de tout nouveaux matériaux artificiels aux propriétés décoiffantes, baptisés "métamatériaux". Leur particularité ? Une nanostructure sa-

travaux théoriques, le chercheur britannique montre alors qu'en sculptant des motifs réguliers dans un matériau choisi à dessein, on peut modifier sa réponse aux ondes électromagnétiques. Or, par ces travaux, John Pendry rejoignait ainsi sans le savoir les recherches d'un physicien soviétique, Victor Veselago, qui, dès 1966, avait décrit les propriétés qu'aurait un matériau possédant un indice de réfraction négatif.

Pour comprendre la révolution que cela constitue, il faut revenir au XVII^e siècle, lorsque le savant français René Descartes et le mathématicien hollandais Willebrord Snell établirent les lois de la réfraction. Ils avaient découvert que la manière dont la lumière se propage dans les matériaux transparents peut être caractérisée par un nombre : l'indice de réfraction. Il suffit ici de se rappeler que lorsque nous regardons une paille dans un verre d'eau, elle semble cassée à l'interface entre le liquide et l'air. Cette



▲ Ce cube est un métamatériau : sa nanostructure est sculptée de motifs réguliers, modifiant sa réponse à la lumière.

Le principe physique sous-jacent est assez simple. Pour qu'un matériau ait un indice négatif, il suffit de faire en sorte que soient négatives deux de ses caractéristiques physiques : la perméabilité magnétique – qui caractérise la manière dont un matériau réagit lorsqu'on lui applique un champ magnétique –, et la permittivité électrique – qui caractérise sa réponse à un champ électrique. Dans la nature, certains matériaux comme les métaux ont une permittivité négative, mais aucun n'a à la fois une perméabilité et une permittivité négatives. Qu'à cela ne tienne !

UN RÉSULTAT D'ABORD CONTESTÉ

Dans son analyse théorique, Victor Veselago s'est notamment aperçu qu'à l'intérieur de ces hypothétiques matériaux à indices négatifs, de nom-

Les physiciens se passionnent pour ces matériaux au comportement étonnant

vamment sculptée de façon à contrôler précisément ses propriétés électromagnétiques. *"Il y a dix ans, j'étais consultant à la société Marconi, qui m'avait demandé d'étudier l'absorption d'ondes radar par des matériaux contenant de fines couches de carbone,* raconte John Pendry, le pionnier de ce domaine. *Et c'est là que j'ai découvert qu'en faisant varier la structure du matériau au niveau microscopique, la propagation des ondes dans le matériau changeait."* Poussant plus avant ses

illusion d'optique, elle, est due au fait que les rayons lumineux se propagent plus vite dans l'air que dans l'eau. Cela parce que l'indice de réfraction de l'air est plus petit que celui de l'eau. Conséquence : les rayons lumineux sont déviés. Or, l'indice de réfraction du vide étant égal à 1, il se trouve que tous les matériaux naturels connus ont un indice de réfraction supérieur. Mais cela n'empêcha pas Victor Veselago d'imaginer les propriétés de matériaux d'indice inférieur à 1, nul et même négatifs.

À LA CLÉ, DES SUPER LÉNTILLES

Autre prouesse des métamatériaux : des lentilles révolutionnaires capables de contourner les limitations intrinsèques de l'optique. Des chercheurs du Max Planck Institut de Martinsried, en Allemagne, et de l'université d'Austin, au Texas, viennent en effet de prouver qu'un métamatériau à base de carbure de silicium multipliait par 4 la résolution d'un microscope optique : ils ont obtenu une image de 89 nanomètres (nm) de résolution en utilisant une lumière de 365 nm. Pour comprendre, il faut savoir que la résolution d'une image est limitée par la longueur d'onde de la lumière qui l'éclaire. Ainsi, à la lumière visible, on ne pourra distinguer que des éléments de plusieurs centaines de nanomètres. Comment contourner cette limite ? En amplifiant les ondes dites évanescentes, qui transportent une partie de l'information issue d'un objet. Mais, dans les matériaux classiques, l'intensité de ces ondes décroît fortement sur de très courtes distances. Du coup, l'information est perdue et l'image limitée en résolution. Dans les métamatériaux à indice négatif, au contraire, ces ondes entrent en résonance avec leur structure et sont donc amplifiées. Toute l'information est donc restituée. A la clé, des applications en microélectronique : améliorer la lithographie en affinant la gravure, augmenter la densité d'informations lues sur des disques laser...

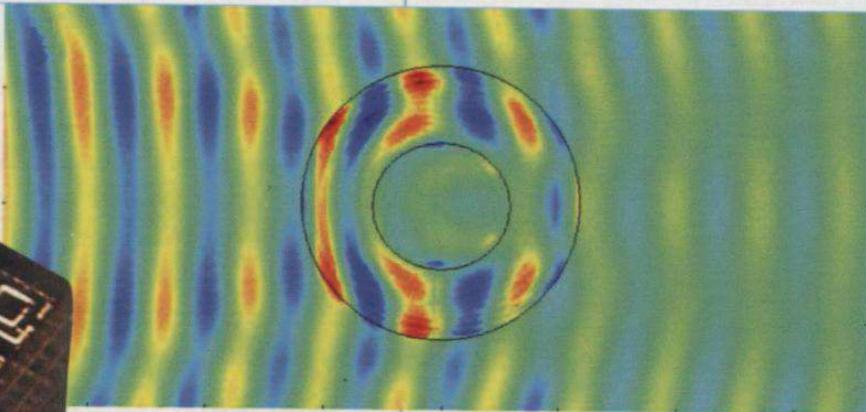
▲ Un cylindre de cuivre a été dissimulé derrière une "cape" en métamatériaux. Résultat : de la même façon qu'un filet d'eau contourne un galet, les ondes électromagnétiques – la lumière – évitent le cylindre. L'objet est alors invisible !

dice optique était ici effectivement négatif, dans une étroite bande de fréquence en micro-ondes. Un résultat si étonnant que certains physiciens le contestèrent pendant quelques mois, jusqu'à ce que l'avalanche de nouvelles mesures vienne à bout de leurs doutes. L'engouement devint alors immédiat et, depuis, les physiciens se passionnent pour ces matériaux qui, sans remettre en cause les lois de l'optique de Snell-Descartes, n'exhibent pas moins des comportements inconnus et étonnants : depuis la phase et l'énergie de l'onde se déplaçant en sens opposé jusqu'à l'effet Doppler inversé et aux rayons déviés de manière anormale, etc.

UNE RÉALISATION COMPLEXE

Aujourd'hui, plusieurs dizaines de laboratoires dans le monde travaillent dans ce domaine, des conférences sont consacrées aux métamatériaux tous les deux mois, des centaines d'articles paraissent. Il faut dire que "les métamatériaux offrent des possibilités dont nous n'osions même pas →

> A gauche, une image obtenue au microscope. L'ajout de lentilles en métamatériaux permet d'obtenir une meilleure résolution (à droite).

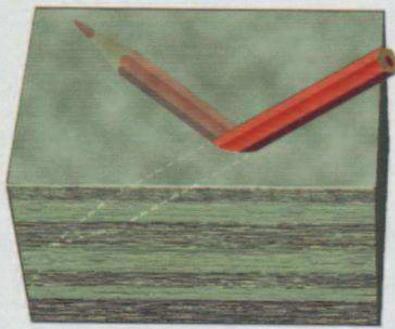
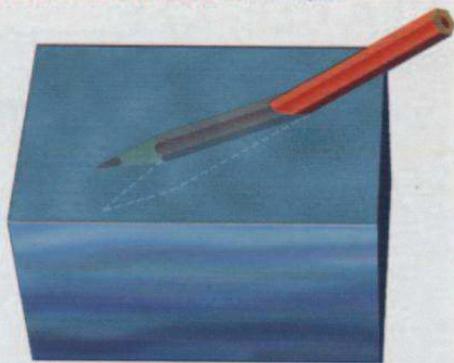


"Les possibilités offertes par les métamatériaux vont au-delà de nos rêves"

JOHN PENDRY, PHYSICIEN
À L'IMPERIAL COLLEGE DE LONDRES

breuses propriétés optiques sont inversées. En particulier, les rayons lumineux sont déviés dans un sens opposé à celui des matériaux classiques (voir infographie).

Veselago ayant tenté sans succès de fabriquer ces matériaux à l'aide de semi-conducteurs, ses travaux tombèrent plus ou moins dans l'oubli. Jusqu'à ce qu'en 2000, David Smith et Sheldon Schultz, en Californie, prennent connaissance des résultats de Pendry... et fassent le lien avec ceux de Veselago. Résultat : dès 2001, les deux physiciens américains parvenaient à fabriquer les premiers métamatériaux, en formant un empilement régulier de plots et d'anneaux en cuivre alternés de quelques millimètres sur un support isolant. Et vérifiaient que l'in-



Illusion d'optique. Lorsqu'on trempe un crayon dans l'eau, il apparaît légèrement brisé. En cause, l'indice de réfraction de l'eau qui est positif: la lumière s'y propage plus lentement que dans l'air. En revanche, si l'on enfonce le crayon dans un matériau à l'indice de réfraction négatif, il apparaîtrait totalement cassé en deux. Surprenant!

→ rêver, s'enthousiasme John Pendry. Désormais, les capacités des instruments optiques ne sont plus limitées par les lois de la diffraction, mais par notre aptitude à fabriquer ces matériaux capables de contrôler la lumière à chaque longueur d'onde. L'optique en est transformée.

Le problème, c'est que ces métamatériaux sont extrêmement complexes à réaliser: pour contrôler leurs caractéristiques optiques, les motifs doivent être périodiques et leurs dimensions de l'ordre du dixième de la longueur d'onde utilisée. Par exemple, si l'on souhaite qu'un métamatériau soit efficace dans le domaine visible, entre 400 et 800 nanomètres, les dimensions des fils et des anneaux disposés régulièrement doivent être inférieures à 40 nanomètres (soit 40 milliardièmes de mètre). Et ce, dans les trois dimensions. "On atteint les li-

fabriquer des motifs de 200 nanomètres, afin de s'approcher au moins de l'infrarouge. Sachant qu'il est évidemment plus facile de travailler dans le domaine des micro-ondes, qui exigent des sculptures moins fines: de l'ordre de quelques millimètres. Du coup, les progrès sont rapides et les applications nombreuses.

IL N'Y A PAS QUE L'INVISIBILITÉ...

Par exemple, les métamatériaux à indice de réfraction nul sont capables de focaliser les ondes, ce qui est fort utile pour fabriquer des antennes directives extrêmement efficaces dans le domaine radio. L'industriel Thales vient ainsi de mettre au point, en collaboration avec l'Institut d'électronique fondamentale, à Paris, une antenne ultracompacte dans le domaine de 10 à 14 GHz. Mais l'application qui excite le plus les physiciens

Maîtriser l'onde qui rend les objets indétectables: là est la performance!

mites des technologies de gravure par nanolithographie", explique André de Lustrac, qui dirige une équipe de recherche sur les métamatériaux à l'Institut d'optique fondamentale de l'université Paris XI à Orsay, dans l'Essonne. Certains tentent de simplifier la forme de structures pour faciliter cette fabrication. D'autres utilisent les technologies les plus avancées pour

concerne les métamatériaux à indice de réfraction négatif: ils ont d'ores et déjà permis de fabriquer des "superlentilles", capables de focaliser la lumière pratiquement sans aberration, et d'observer des objets avec une finesse inégalée (voir encadré).

Et puis, il y a bien sûr la fameuse cape d'invisibilité. Dans le principe, il s'agit de forcer les rayons lumineux à

contourner l'objet que l'on souhaite rendre invisible. Il faut donc fabriquer des métamatériaux d'indice variable, afin de courber progressivement la lumière autour de l'objet. Mais la principale difficulté n'est pas de fabriquer de tels matériaux: "Nous savons déjà fabriquer des matériaux à indice variable dans le domaine du proche infrarouge, à une longueur d'onde de 1,5 nanomètre environ, précise André de Lustrac. Ces matériaux, appelés cristaux photoniques, ont été développés avant les métamatériaux de Pendry." Le gros problème, c'est de maîtriser l'onde. "Il faut reconstituer l'onde en sortie du dispositif, telle qu'elle est à l'entrée, sinon l'objet caché par le matériau est détectable." Et c'est cette performance que réalise pour la première fois la cape de Smith et Pendry.

Les applications de l'invisibilité sont cependant moins prometteuses que les superlentilles. "Certes, on peut penser ici à l'invisibilité des avions vis-à-vis des radars, mais des techniques de furtivité bien plus simples existent déjà", observe André de Lustrac. De plus, il ne faut pas rêver: les capes d'invisibilité des physiciens modernes seront plus limitées que celle de Siegfried ou d'Harry Potter. Smith et ses collègues l'ont fait dans un plan et en micro-ondes, "mais cela sera autrement plus difficile dans le domaine visible et à trois dimensions", ajoute le physicien français. Et puis, ces dispositifs ne fonctionneront que pour une plage de longueurs d'ondes précise, petite par rapport à la taille du domaine visible (un Harry Potter invisible uniquement au rayonnement bleu ferait un bien piètre sorcier). Enfin, une personne cachée sous une telle cape serait certes invisible, mais aussi aveugle, puisque les ondes électromagnétiques la contourneraient sans l'atteindre! Siegfried et Harry Potter risquent donc bien de garder une longueur d'avance.