

- Graphène, nanotube... les avatars du carbone
- Les plastiques autocicatrisants
- Le grand prix de nanoformule 1
- Les composants électroniques de demain

Les nouvelles
capes d'invisibilité

Le magazine thématique de l'actualité scientifique

N° 79 Avril-Juin 2013

Les paradoxes de la matière

L'univers quantique
Les métamatériaux
Le nanomonde

DOSSIER HORS-SÉRIE

M 01930 - 79 - F: 6,95 € - RD



Belgique : 8,20 € - Canada /S : 11,50 CAD - Guadeloupe/St Martin /S : 8,25 € - Guyane /S : 8,25 € - Luxembourg : 7,80 € - Maroc : 90,00 DH - Martinique /S : 8,25 € - Nlle Calédonie Wallis /A : 2120 F.CFP - Nlle Calédonie Wallis /S : 1170 F.CFP - Polynésie Française /A : 2120 F.CFP - Polynésie Française /S : 1170 F.CFP - Portugal : 7,90 € - Réunion /S : 8,25 € - Suisse : 15 CHF

Les experts en escamotage

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

Sébastien GUENNEAU et Stefan ENOCH sont chercheurs à l'Institut Fresnel (CNRS UMR 7249, Université d'Aix-Marseille et École centrale de Marseille).

Ross MCPHEDRAN est professeur au Centre d'excellence CUDOS, 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 sensibles à la longueur d'onde et ne fonctionnent en général que sur un spectre étroit.

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 expliquerons comment ils déduisent ces structures de transformations reliant l'espace réel à un espace virtuel, où une partie est supprimée. Puis nous évoquerons plusieurs de ces structures, nommées métamatériaux, et leurs applications.

Qu'est-ce qu'un métamatériau ? Pour répondre, décrivons le cas le plus spectaculaire : celui des métamatériaux optiques. Pour une onde lumineuse monochromatique, le champ électromagnétique réalise un cycle d'oscillation pour chaque longueur d'onde parcourue. Ses interactions avec un matériau seront donc 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 alors 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 plus grandes distances. La plupart des matériaux naturels et artificiels sont de ce type : ils sont dits isotropes. Toutefois, dans certains matériaux naturels dits anisotropes, la structure microscopique crée des directions privilégiées pour la lumière. C'est le cas des matériaux biréfringents, dont l'indice de réfraction optique diffère selon la direction.

L'anisotropie des matériaux naturels peut être imitée artificiellement 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 page ci-contre). Cette dernière lui confère des propriétés, dites effectives, qui dépendent de la direction.

Invisibilité par réfraction

Aujourd'hui, les physiciens savent donner 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, de l'Université Duke, ont donné en 2006 une méthode générale.

Avant de l'expliquer, rappelons que la propagation du champ électromagnétique dans le vide ou dans un matériau transparent est décrite par les équations de Maxwell. Elles gouvernent le comportement dans le temps et l'espace des composantes indissociables du champ électromagnétique, 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 définie par deux grandeurs, la permittivité diélectrique ϵ et la perméabilité magnétique μ liées respectivement au champ électrique et au 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.

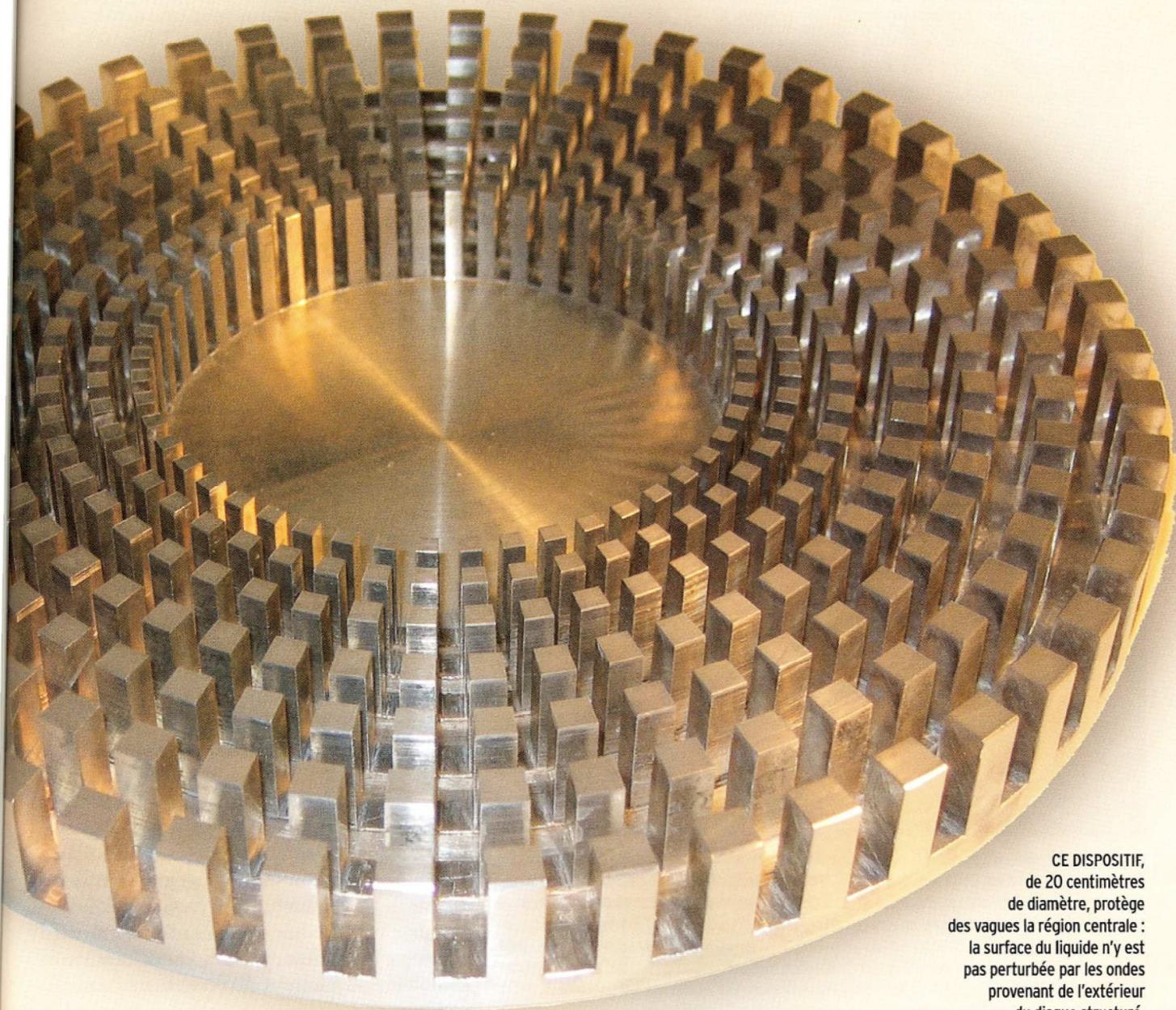
L'entreprise serait ardue si J. Pendry n'avait mis au point une méthode mathématique qui la ramène à la recherche d'une transformation géométrique, un changement de métrique. Ce terme désigne un changement de la définition de la distance entre deux points, qui se traduit par un changement des coordonnées spatiales. Les équations de Maxwell restent les mêmes, mais ϵ et μ sont modifiées, ce qui crée des directions privilégiées et 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 trois lignes et d'autant de colonnes

(soit neuf nombres) nommé tenseur. Oublions ce détail technique et retenons 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 celle des calculs usuels en électromagnétisme.

Du désir à la réalité

Pour obtenir un milieu anisotrope structuré, J. Pendry définit d'abord son objectif, par exemple, une situation où les ondes contournent une certaine région de l'espace. Par un changement de métrique, il passe dans un espace virtuel où son désir est réalisé : par exemple que cette région soit réduite à un point. Il impose que ϵ et μ y soient constantes, de sorte



CE DISPOSITIF, de 20 centimètres de diamètre, protège des vagues la région centrale : la surface du liquide n'y est pas perturbée par les ondes provenant de l'extérieur du disque structuré.

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 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 qui deviennent des tenseurs dont les neuf coefficients varient dans l'espace selon un certain motif. Ainsi, pour déformer à loisir les trajectoires des ondes électromagnétiques, les physiciens démiurges doivent fabriquer 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 une cape d'invisibilité: ils ont fait disparaître de la vue (dans le domaine des micro-ondes) un cylindre plat de cuivre de trois centimètres de rayon. Pour obtenir cette cape d'invisibilité, la transformation géométrique requise 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

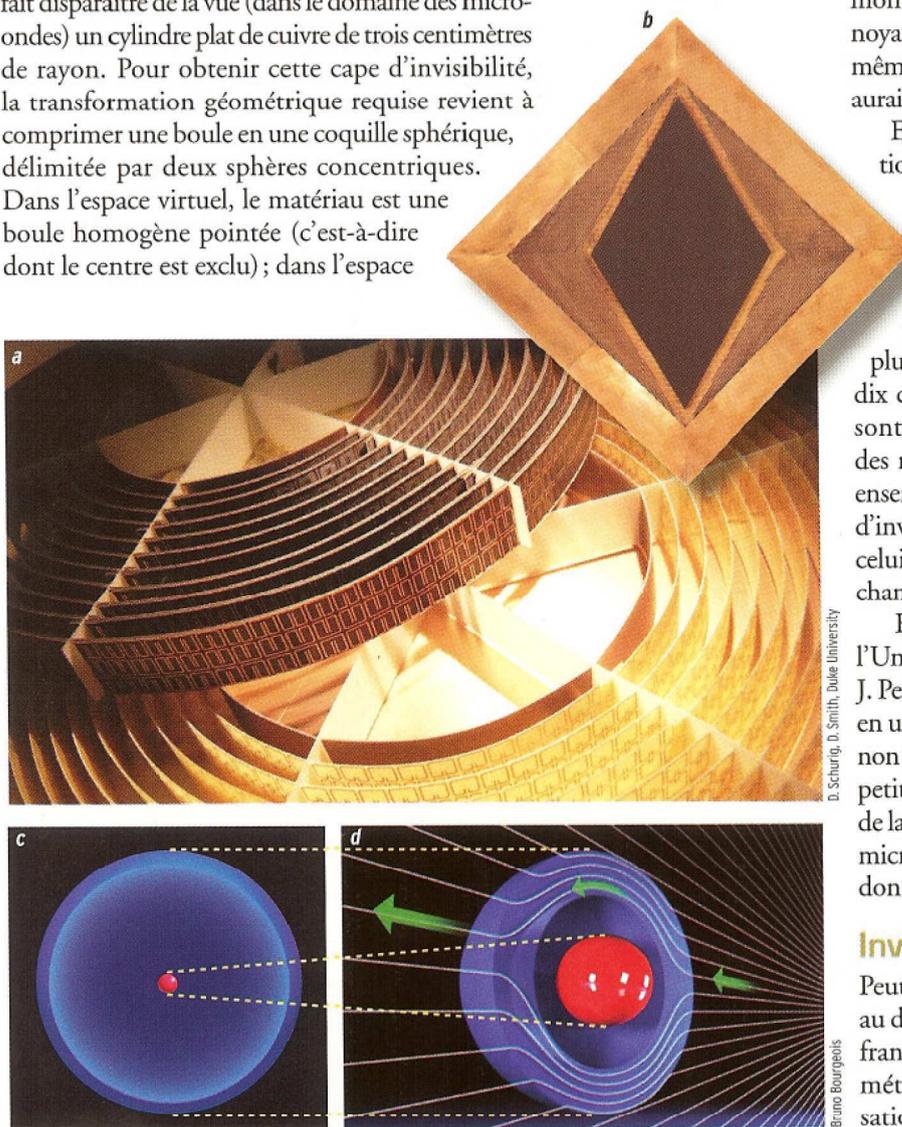
réel, il correspond à une boule hétérogène évidée d'un noyau sphérique, où on loge l'objet à cacher (voir la figure ci-dessous).

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 façon de l'eau d'une rivière s'écoulant sans turbulences autour d'un rocher. En d'autres termes, l'objet placé dans le noyau est comme transparent.

Que se passe-t-il à l'intérieur de la cape? Un observateur situé dans la région 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 est 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 et la même amplitude que celles qu'elles auraient eues 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 est de six centimètres. Vu 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. Cet ensemble, qui forme le métamatériau, est 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.

En 2012, Nathan Landy et David Smith, de l'Université Duke, ont amélioré le dispositif de J. Pendry. Une des nouveautés consiste notamment en un nouvel agencement, en forme de diamant et non plus circulaire (voir la figure ci-contre). Ainsi, les petites réflexions qui compromettaient l'efficacité de la première version sont dorénavant écartées: les micro-ondes ont bien été dirigées autour de l'objet, donnant l'impression d'une parfaite transparence



LES CAPES D'INVISIBILITÉ de J. Pendry (a, son diamètre est d'environ 12 centimètres) et de D. Smith (b) détournent les micro-ondes. Cette propriété résulte, d'une part, de la présence de circuits dont la taille est inférieure à la longueur d'onde et, d'autre part, de l'architecture en anneaux concentriques. Sa conception est fondée sur l'idée suivante: dans un espace virtuel, on considère un volume sphérique dont le centre (c, 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 entraîne le contournement du cœur de la coquille (d) par les ondes électromagnétiques (flèches blanches).

Invisible dans le visible ?

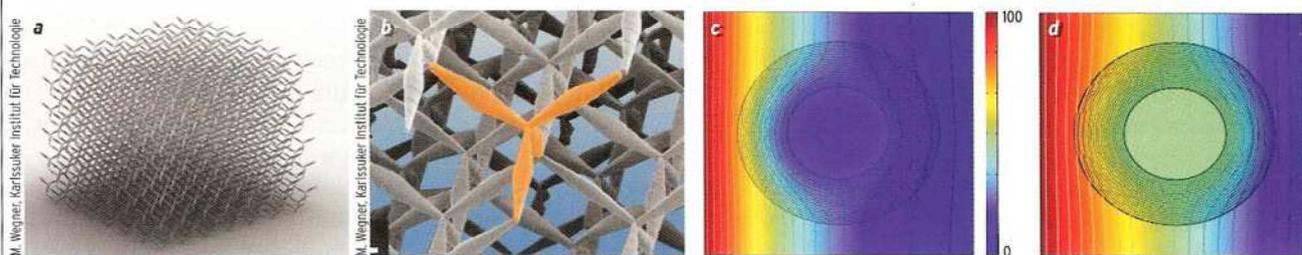
Peut-on étendre le principe de la cape de J. Pendry au domaine du visible? Oui, mais on doit d'abord franchir de nombreux obstacles. La sensibilité des métamatériaux à la longueur d'onde gêne la réalisation d'une cape efficace à plus d'une longueur d'onde. On doit ensuite passer à trois dimensions. Enfin, l'élaboration de résonateurs à anneaux fendus de taille au moins dix fois inférieure à la longueur d'onde visée reste pour l'heure un défi technique: dans le cas du spectre visible, des motifs complexes de quelques dizaines de nanomètres seulement sont nécessaires...

INVISIBILITÉ MÉCANIQUE ET THERMIQUE

Les paramètres négatifs atteints dans les métamatériaux électromagnétiques ont aujourd'hui leur pendant en mécanique. Le groupe de Martin Wegener, de l'Institut de technologie de Karlsruhe, en Allemagne, a élaboré et caractérisé en 2012 une structure complexe dont le taux de remplissage dans l'air est de l'ordre de un pour cent. Son agencement lui confère une propriété singulière, l'auxétisme, qui est définie par un coefficient de Poisson négatif. Ce coefficient, le plus souvent compris entre 0 et 0,5, décrit la propension de la matière à se contracter dans une direction perpendiculaire à celle de l'effort appliqué. Encore peu étudiés, les matériaux auxétiques ont un coefficient de Poisson compris entre 0 et -1 qui se traduit par une expansion de la matière dans la direction perpendiculaire à l'effort appliqué. Le métamatériau construit, de moins d'un millimètre de côté (a), est un réseau de mailles élémentaires dont le motif (b, en orange) se cisaille, c'est-à-dire se plie, pour toutes les forces qui ne sont pas appliquées selon les diagonales du cube. Ce métamatériau peut s'étendre simultanément dans toutes les directions, ce qui lui confère un

indice de Poisson négatif. De tels matériaux pourraient avoir des applications notamment dans le bâtiment, car leur structure les rend particulièrement résistants, et pour la fabrication de lentilles et de capes d'invisibilité pour les ondes de pression et de cisaillement. On note que les systèmes d'ouverture de certains parapluies sont des structures auxétiques !

En 2012, un autre type de métamatériau a été mis au point : il permet le contrôle des flux thermiques. Le principe d'une cape thermique a été proposé à l'Institut Fresnel en 2012, puis démontré expérimentalement dans le régime permanent par un groupe à Harvard, et plus récemment dans le régime transitoire par le groupe de M. Wegener. Ainsi, une cape thermique constituée d'un agencement de 20 couches de matériaux de diffusivités contrastées protège la zone en son centre du flux de chaleur diffusé par une source chaude (située à gauche sur la figure c), tout en préservant la rectitude des isothermes (lignes verticales) à sa sortie en régime transitoire (c). En régime permanent (d), la protection thermique est moins marquée, mais le contrôle du flux est préservé.



Malgré ces obstacles, les avancées théoriques et techniques sont 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, en 2008, notre équipe a confectionné 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 (voir la figure page 67). 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 plus grande – pourrait protéger des plateformes pétrolières ou certaines zones côtières contre les tsunamis.

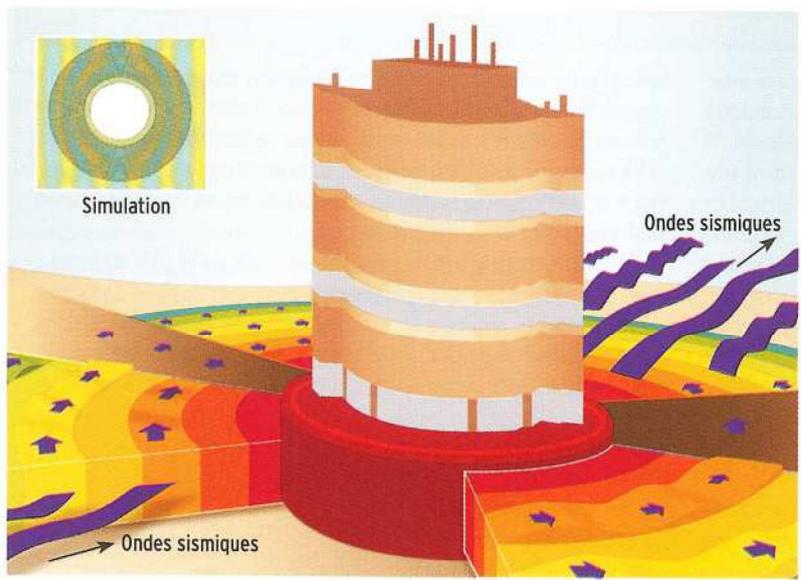
Une cape sismique est aussi possible. En 2009, avec Alexander Movchan, de l'Université de Liverpool, au Royaume-Uni, nous avons proposé une

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 conduit à l'élaboration d'une chape, qui, placée dans les fondations d'un immeuble, le protégerait en grande partie des effets d'un séisme. Les ondes de flexion contourneraient le centre de la chape et continueraient leur chemin (voir la figure page suivante).

En 2012, l'équipe d'ingénierie sismique de Stéphane Brûlé et d'Emmanuel Javelaud, de la Société Ménéard, a effectué les deux premiers tests de contrôle d'ondes de Rayleigh par des métamatériaux sismiques de taille décimétrique dans les régions grenobloise et lyonnaise.

Les lentilles parfaites

Grâce au principe mis au point par J. Pendry et ses collègues, la réalisation d'une lentille parfaite est aussi envisageable (voir *À la recherche de la superlentille*, par J. Pendry, page 72). 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 n d'un matériau est le rapport de la vitesse c de la lumière dans le vide et de celle v 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 $\epsilon\mu v^2 = 1$, ou, ce qui revient au même, $n = \pm c\sqrt{\epsilon\mu}$.

Sauf de 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

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

s'est intéressé au cas des matériaux ayant une perméabilité et une permittivité négatives. Il a montré que les matériaux correspondants - qui sont, en pratique, des métamatériaux - ont un indice négatif, c'est-à-dire $n = -c\sqrt{\epsilon\mu}$. L'étude de la réfraction négative était née.

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. D. Smith concrétisa l'idée de son collègue anglais en annonçant la même année la fabrication du milieu optique imaginé par V. Veselago, mais pour certaines fréquences seulement.

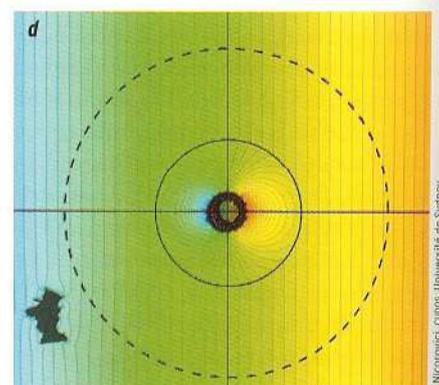
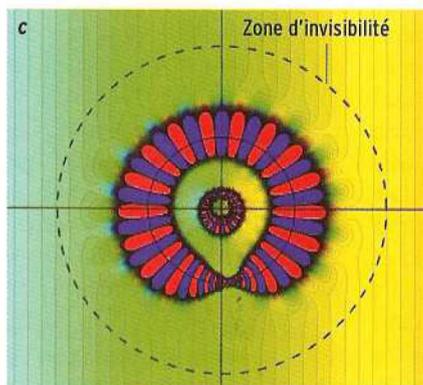
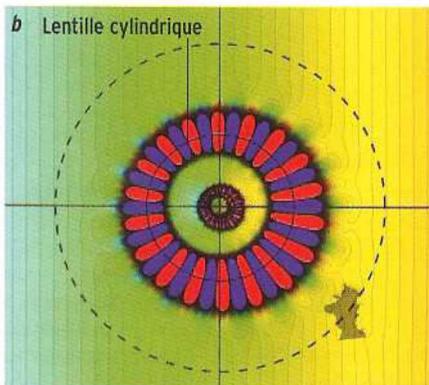
De concept théorique, la lentille de V. Veselago était donc devenue une curiosité de laboratoire ne fonctionnant qu'à partir des résonateurs de J. Pendry et pour une longueur d'onde fixe... Pourtant, depuis la proposition de J. Pendry, plusieurs équipes ont mis au point des prototypes de lentilles parfaites dans le domaine des ondes centimétriques. La principale difficulté pour descendre dans le domaine du visible est que les métaux, pierre angulaire des métamatériaux, sont fortement absorbants aux longueurs d'onde optiques, ce qui limite la résolution de la lentille.

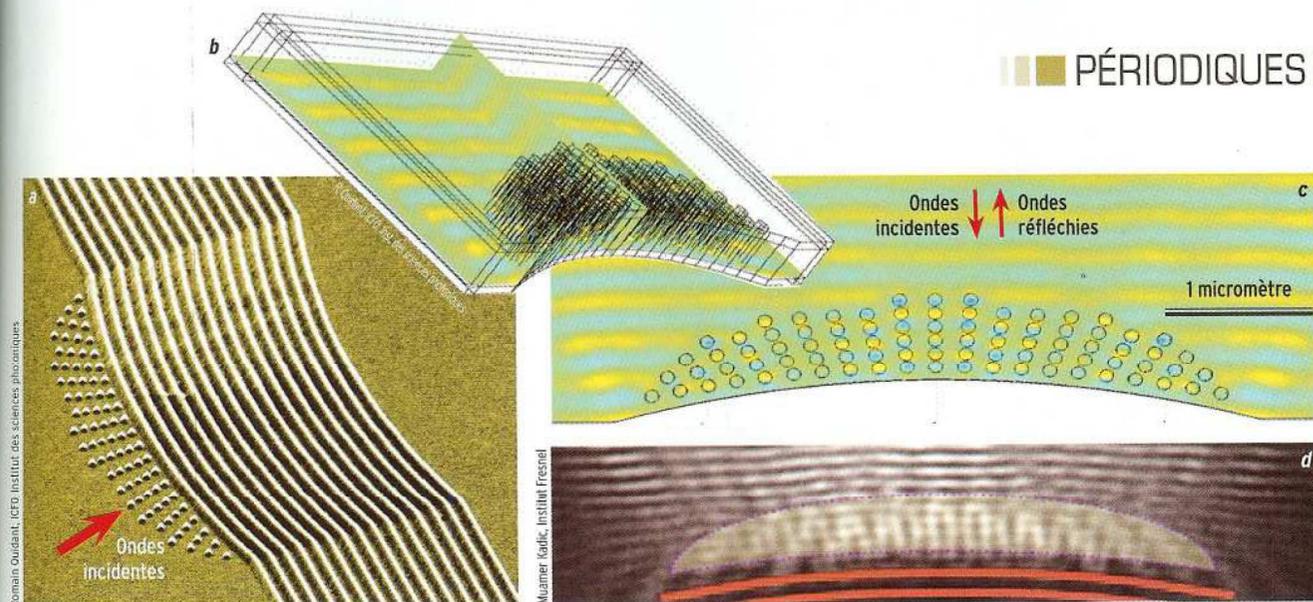
La course aux lentilles

Toutefois, en 2005, l'équipe de Xiang Zhang à l'Université de Los Angeles a démontré expérimentalement une résolution supérieure à un cinquième de longueur d'onde à travers un métamatériau constitué d'un mince film d'argent pris en sandwich entre deux couches de semi-conducteur, pour une fréquence du domaine visible. Depuis lors, une course effrénée à



CETTE LENTILLE cylindrique métallique (a, une moitié vue de l'intérieur) fonctionne par réaction, c'est-à-dire que les dipôles atomiques dont elle est constituée réagissent à la présence des dipôles de l'objet d'une façon qui le rend invisible dans une certaine zone. La simulation numérique montre les champs électriques (b, les lobes rouges et bleus) dus à cette réaction dans trois situations : quand l'objet (ici, une figurine) s'approche de la zone d'invisibilité (cercle en pointillés, b), quand elle y est (c) et quand elle en sort (d). On voit que le champ n'est pas perturbé en dehors de la zone d'invisibilité.





UN RÉSEAU PLASMONIQUE constitué de plots de 200 nanomètres de diamètre gravés sur une surface métallique (a) fournit un exemple d'invisibilité par réaction. L'arrivée d'ondes électromagnétiques en proche infrarouge (flèches rouges) crée des ondes électroniques de surface nommées plasmons. Comme

le montrent la simulation numérique (b et c) et les mesures (d), ces plasmons absorbent l'onde incidente et, grâce aux stries gravées à l'arrière qui font office de miroir, la restituent intacte - malgré la courbure du miroir. En l'absence du réseau plasmonique, l'onde incidente aurait été déformée.

la réalisation de lentilles parfaites s'est engagée, avec des résolutions atteignant aujourd'hui un vingtième de longueur d'onde dans le proche infrarouge.

Outre la lentille plate, Nicolae Nicorovici, de l'Université de Sydney, Graeme Milton, de celle d'Utah, et l'un d'entre nous (R. McPhedran) ont proposé en 2005 un principe de lentille cylindrique produisant un nouvel effet d'invisibilité. Ils ont étudié le comportement insolite d'une excitation lumineuse au voisinage d'un cylindre de permittivité négative (mais pas obligatoirement d'indice négatif). Ce dispositif se comporte à la façon d'une lentille parfaite dont le grossissement est dû à sa courbure : une image virtuelle agrandie est créée en avant de la lentille. En outre, le dispositif fonctionne aussi comme une cape d'invisibilité : sous certaines conditions (pour certaines longueurs d'onde), il réagit à la présence des champs magnétiques et des dipôles électriques atomiques d'un objet et efface ainsi le champ électromagnétique associé à ce dernier (voir la figure page ci-contre, en bas). Le principe fonctionne aussi avec tout grand ensemble de dipôles atomiques, mais à une longueur d'onde précise et pour une cape homogène de permittivité négative ou d'indice de réfraction égal à -1 .

Invisibilité par réaction

Pour comprendre cette forme d'invisibilité, on peut à encore utiliser la méthode géométrique de J. Pendry. Considérer un indice négatif revient à replier une portion de l'espace pour la faire disparaître. Dans le cas présent, le repliement se fait vers l'extérieur, de sorte que le dipôle électrique ou la myriade de dipôles atomiques dont est formé un objet disparaissent non pas derrière cette cape d'invisibilité, mais devant... Le dispositif n'a pas encore été fabriqué, mais il pourrait en principe rendre presque invisible tout objet dont la réponse électromagnétique serait analogue à celle d'un ensemble de dipôles. Sa réali-

sation, qui requiert un indice de réfraction proche de -1 , est à l'étude à l'Institut Fresnel qui bénéficie d'une chambre anéchoïque pour les micro-ondes.

Quels types d'invisibilité avons-nous obtenus ? La cape d'invisibilité de J. Pendry et la lentille de V. Veselago sont deux cas d'invisibilité par réfraction. La première a pour effet de créer un indice de réfraction anisotrope positif et la seconde un indice de réfraction isotrope négatif. Quant à la lentille parfaite cylindrique, supposée être caractérisée par un indice de réfraction proche de -1 , elle crée une invisibilité par réaction. Ce type d'invisibilité par réaction peut aussi être réalisé par des métamatériaux à la surface des métaux. De tels tapis d'invisibilité (voir la figure ci-dessus), dont la réaction consiste alors en la création de plasmons (des ondes électroniques de surface) qui vont absorber l'onde électromagnétique incidente, puis la restituer de sorte qu'un miroir courbe réfléchit la lumière comme un miroir droit, ouvrent une voie inédite vers la plasmonique de transformation (voir *Les promesses de la plasmonique*, par H. Atwater, page 58).

En 2012, des avancées significatives ont par ailleurs été effectuées dans la production de métamatériaux mécaniques et thermiques (voir l'encadré page 69). Les premiers s'étendent dans une direction d'espace quand on les étire dans les autres (ce qui leur confère un module de Poisson négatif). Les seconds autorisent un contrôle des flux de chaleur par le biais d'une diffusivité hétérogène anisotrope.

Nous voyons que les types d'invisibilité tendent à se multiplier et s'étendent à tous les types d'ondes. D'une façon générale, c'est l'art de la conformation à volonté du champ électromagnétique qui ne cesse de s'enrichir d'année en année. Il se fonde sur l'invariance de forme des équations fondamentales de la physique, et définit un nouveau paradigme en physique des ondes : celui de la physique transformationnelle. ■

livre

• U. LEONHARDT et T. PHILBIN, *Geometry and Light : The Science of Invisibility*, Dover publication, 2010.

articles

• N. LANDY et D. SMITH, *A full-parameter unidirectional metamaterial cloak for microwaves*, in *Nature Materials*, vol. 12, pp. 25-28, 2012.

• M. KADIC et al., *On the practicability of pentamode mechanical metamaterials*, in *Appl. Phys. Lett.*, vol. 100, 191901, 2012.

• S. GUENNEAU et al., *The colors of cloaks*, in *Journal of Optics*, vol. 13, 024014, 2011.

• A. NICOLET, *Les capes d'invisibilité et l'optique transformationnelle*, in *Images de la Physique 2010*, CNRS, 2010.

• J. PENDRY et al., *Controlling electromagnetic fields*, in *Science*, vol. 312, pp. 1780-1782, 2006.

• A. ALU et N. ENGHETA, *Achieving transparency with plasmonic and metamaterial coatings*, in *Physical Review E*, vol. 72, 016623, 2005.