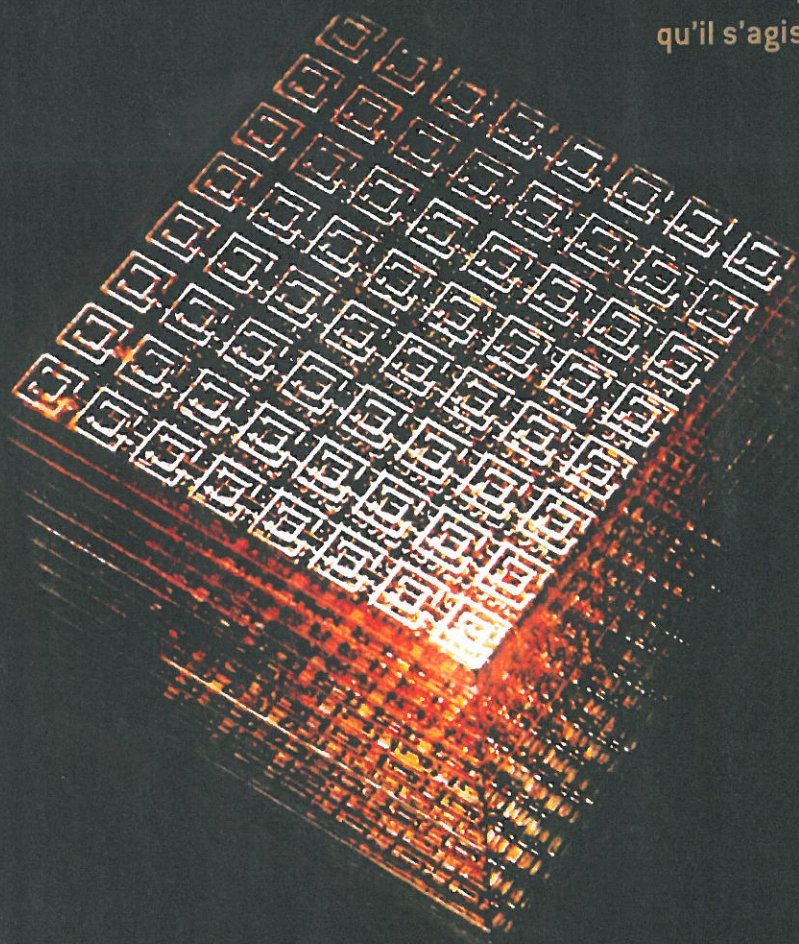


Les ondes sous l'emprise des **métamatériaux**

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

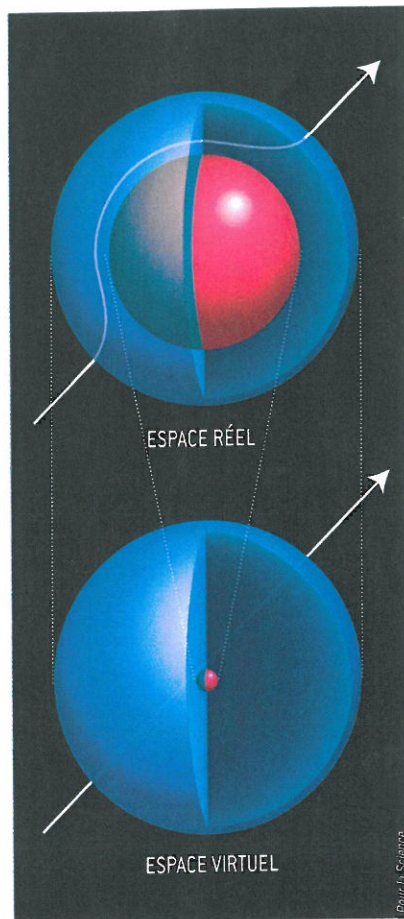
de coordonnées déforme les trajets des ondes, de façon à réaliser la situation souhaitée : par exemple contourner la région à dissimuler. Cependant, ce retour à l'espace réel modifie aussi ϵ et μ , c'est-à-dire que leurs valeurs varient dans l'espace selon un certain motif. Nous voyons que pour déformer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

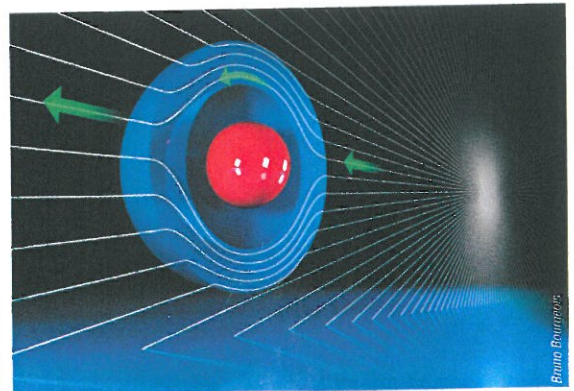
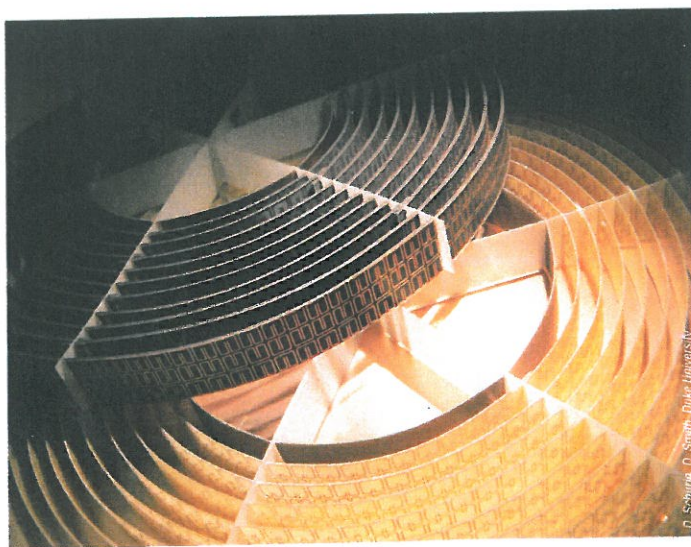


2. DANS UN ESPACE VIRTUEL, on considère un volume sphérique dont le centre (en rouge) est exclu. Une transformation géométrique lui associe, dans l'espace réel, une coquille sphérique dont les dimensions extérieures sont conservées, mais celles du cœur notablement augmentées. Certaines caractéristiques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

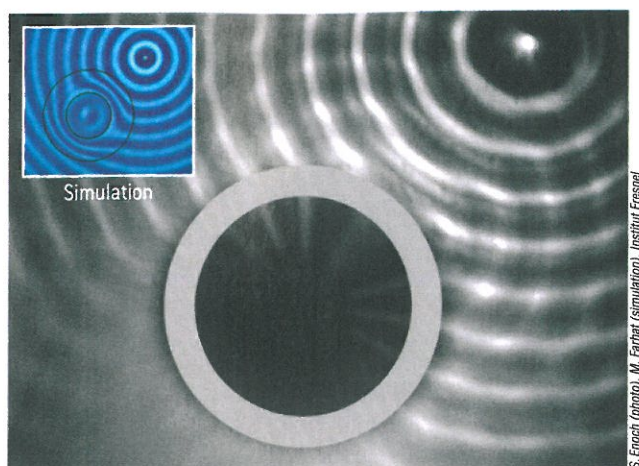
centrale est coupé du monde extérieur. Plongé dans le noir le plus complet, il ignore ce qui se passe en dehors de la cape : il se trouve dans une sorte de trou noir optique. C'est ce que confirment les simulations numériques. Elles montrent aussi que les ondes qui contournent le noyau d'invisibilité 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.

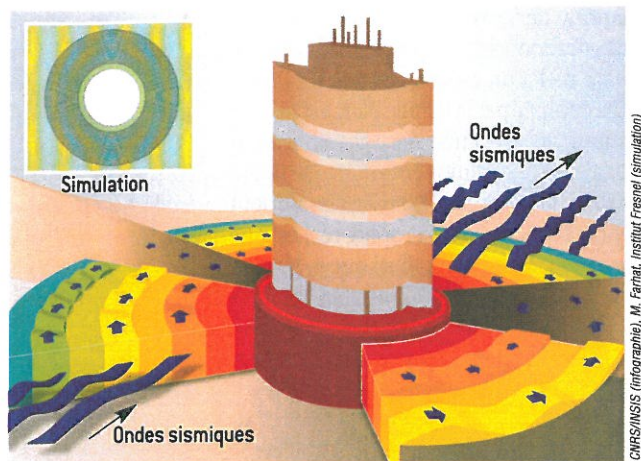
Peut-on étendre le principe de la cape de J. Pendry au domaine du visible ? Oui, mais il faut en pratique franchir de nombreux obstacles. La sensibilité des métamatériaux à la longueur d'onde gêne la réalisation d'une cape efficace à plus d'une longueur d'onde. Il faudra ensuite passer à trois dimensions. 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.



4. CETTE CAPE ANTIVAGUES (au premier plan, masquée par un disque car elle brille au flash) stabilise et aplatit un train incident de vaguelettes (en haut à droite). En mer, de tels dispositifs pourraient protéger des plateformes pétrolières ou des portions de côte.



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

d'onde visée reste pour l'heure un défi technique : dans le cas du spectre visible, il faudrait des motifs de quelques dizaines de nanomètres seulement...

Malgré ces obstacles, les avancées théoriques et techniques ont été 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, notre équipe marseillaise a récemment réalisé 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. 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 bien plus grande bien sûr, pourrait protéger des plateformes pétrolières ou certaines zones côtières contre les tsunamis (voir la figure 4).

Une cape sismique est aussi envisageable. Avec Alexander Movchan, de l'Uni-

versité 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 produit une chape, qui, placée dans les fondations d'un immeuble, le protégerait en grande partie des effets d'un séisme (voir la figure 5). Les ondes de flexion contourneraient le centre de la chape et continueraient leur chemin sans traverser le bâtiment à protéger.

Lentille parfaite

Grâce au principe mis au point par J. Pendry et ses collègues, la réalisation d'une lentille parfaite est aussi envisageable. 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 d'un

matériau est le rapport des vitesses de la lumière dans le vide et 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 $\mu\epsilon v^2 = 1$, ou, ce qui revient au même, $n = \pm c\sqrt{\mu\epsilon}$.

Sauf 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 s'est intéressé au cas des matériaux ayant une perméabilité et une permittivité négatives. Il a montré que les lois de l'optique impliquent que les matériaux correspondants – qui sont, en pratique, des métamatériaux – ont un indice négatif (c'est-à-dire $n = -c\sqrt{\mu\epsilon}$). L'étude de la réfraction négative était née, et avec elle celle de la « lentille plate de Veselago » : une simple lame d'indice négatif égal à -1 .

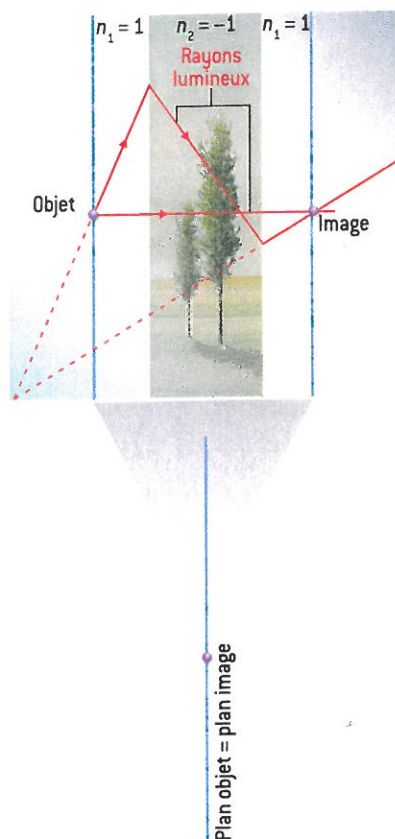
C'est une fois de plus J. Pendry qui, en 2000, en proposa la réalisation. Il avait en effet montré qu'une alternance périodique de fils métalliques et de résonateurs à anneaux fendus présentait une permittivité négative pour les basses fréquences et une perméabilité négative autour de certaines fréquences dites de résonance. Il réalisait ainsi en pratique, mais pour certaines fréquences seulement, le milieu optique imaginé par V. Veselago.

Là encore, la méthode géométrique générale expliquée plus haut permet de se représenter facilement les effets de la

lentille de V. Veselago. Le changement de coordonnées choisi fait passer de l'espace réel à un espace virtuel où la tranche occupée par la lentille plate est réduite à un plan: c'est une sorte de repliement de l'espace sur lui-même qui a été opéré lors du passage dans l'espace virtuel, dont la conséquence dans l'espace réel est que μ et ϵ sont négatives, ainsi que n . Notons qu'ici μ et ϵ restent de simples nombres sous l'effet de cette transformation géométrique qui n'introduit pas de direction privilégiée, donc d'anisotropie.

L'effet optique de ce repliement d'espace est de confondre le plan objet et le plan image (voir la figure 6), ce qui explique qu'il n'y ait pas d'inversion d'image et que la résolution soit infinie. En effet, dans l'espace virtuel, tout point objet étant son propre point image, il en résulte dans l'espace réel que tout point est transformé en un point et uniquement en ce point. Notons par ailleurs que la lentille parfaite de V. Veselago est aussi une sorte de cape d'invisibilité, puisque tout ce qui se trouve dans l'épaisseur de la lentille est invisible.

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



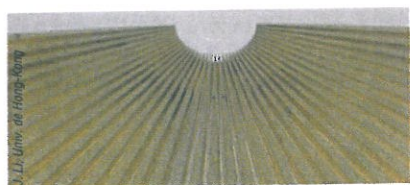
6. LA LENTILLE PARFAITE consiste en une lame d'indice optique égal à -1 . La réfraction atypique qui en résulte fait que l'image d'un point objet est le point symétrique par rapport au plan médian de la lentille (en haut). Tout se passe comme si la lumière continuait son chemin en ligne droite en l'absence de lentille, c'est-à-dire comme si l'espace occupé par la lentille avait été réduit à un plan par le changement de métrique (en bas). Initialement théorique, ce concept connaît aujourd'hui plusieurs réalisations à partir de métamatériaux.

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 parfaite de J. Pendry et V. Veselago.

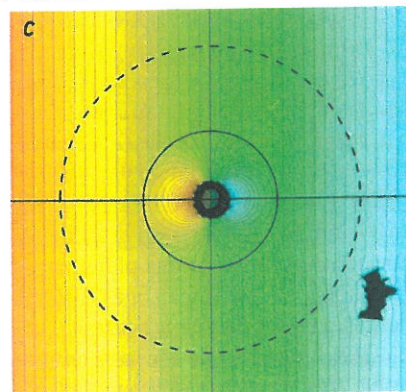
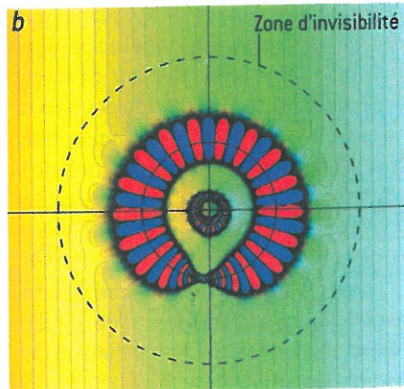
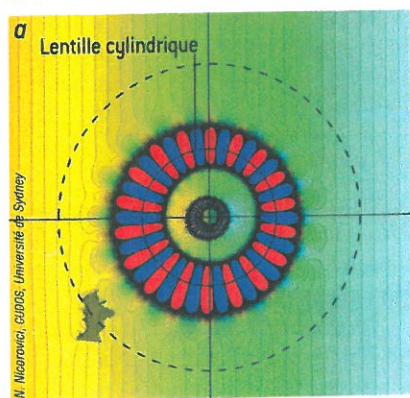
Course à la réalisation de lentilles parfaites

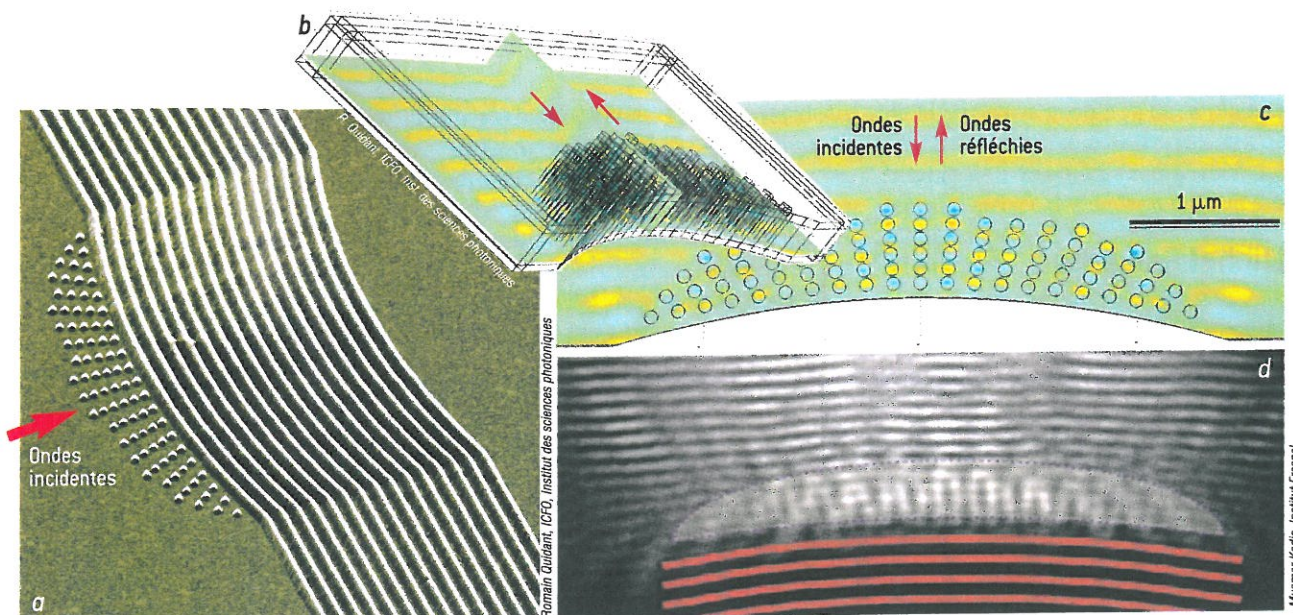
Toutefois, en 2005, l'équipe de Xiang Zhang à l'Université de Los Angeles a démontré expérimentalement une résolution supérieure à un cinquième de longueur d'onde à travers un métamatériau constitué d'un mince film d'argent pris en sandwich entre deux couches de semi-conducteur, pour une fréquence du domaine visible. Depuis lors, une course effrénée à 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 de V. Veselago, 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. Cette équipe a étudié le comportement insolite d'une excitation lumineuse au voisinage d'un cylindre de permittivité négative (mais pas obligatoirement d'indice négatif). Elle a montré que ce dispositif se comporte comme une lentille parfaite dont le grossissement



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





8. UN RÉSEAU PLASMONIQUE constitué de points gravés sur une surface métallique (a) fournit un autre exemple d'invisibilité par réaction. L'arrivée d'ondes électromagnétiques (flèche rouge) 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 qui, en l'absence du réseau plasmonique, l'aurait déformée.

est dû à sa courbure : comme avec une lentille convexe, une image virtuelle agrandie est créée en avant de la lentille. Et elle a montré que 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 7). 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 là encore utiliser la méthode géométrique de J. Pendry. Comme ce dernier l'a fait remarquer, 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 réalisé, mais il pourrait en principe rendre presque invisible tout objet dont la réponse électromagnétique serait analogue à celle d'un ensemble de dipôles. Sa réalisation, qui

demande un indice de réfraction proche de -1 , reste pour le moment un défi technique.

Quels types d'invisibilité avons-nous présenté à ce stade ? 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 (produit de la permittivité et de la perméabilité, qui sont ici deux ensembles de neuf nombres positifs) 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 structures en échiquier dont les cases alternent des indices positifs et négatifs : la réaction consiste alors en la création de plasmons (des ondes électroniques de surface) qui vont absorber l'onde électromagnétique incidente, puis la restituer en arrière du dispositif, les cases d'indice négatif permettant un repliement de l'espace sur lui-même.

Nous voyons que les types d'invisibilité tendent à se multiplier et s'étendent à tous les types d'ondes. D'une manière 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 modèle en physique des ondes : celui de la physique transformationnelle.

✓ BIBLIOGRAPHIE

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

S. Guenneau et al., *Negative refraction in 2-D checkerboards by mirror anti-symmetry and 3-D corner lenses*, *New Journal of Physics*, vol. 7, p. 164, 2005.

F. Zolla et al., *Electromagnetic analysis of cylindrical invisibility cloaks and the mirage effect*, *Optics Letters*, vol. 32, pp. 1069-1072, 2007.

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

Ulf Leonhardt et Thomas Philbin, *Geometry and Light: The Science of Invisibility*, Dover publication, 2010.

A. Alu et N. Engheta, *Achieving transparency with plasmonic and metamaterial coatings*, *Physical Review E*, vol. 72, 016623, 2005.