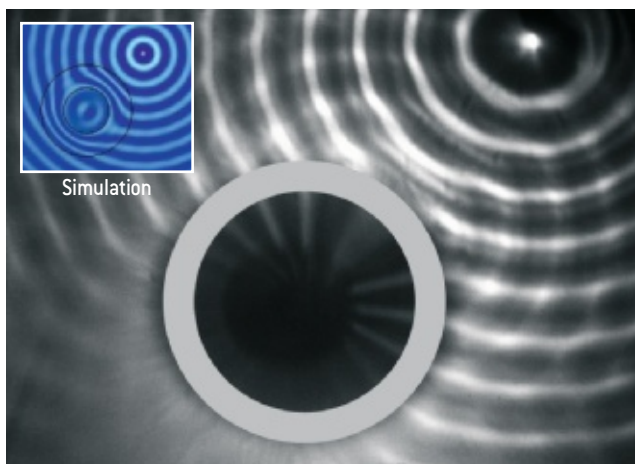
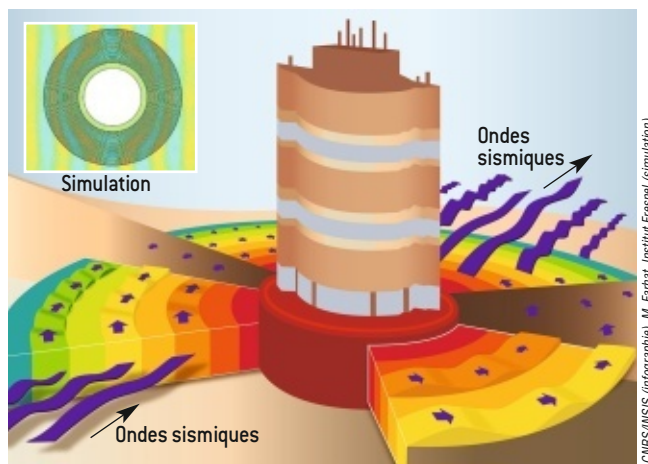




4. CETTE CAPE ANTIVAGUES (au premier plan, masquée par un disque car elle brille au flash) stabilise et aplatit un train incident de vaguelettes (en haut à droite). En mer, de tels dispositifs pourraient protéger des plateformes pétrolières ou des portions de côte.



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 .

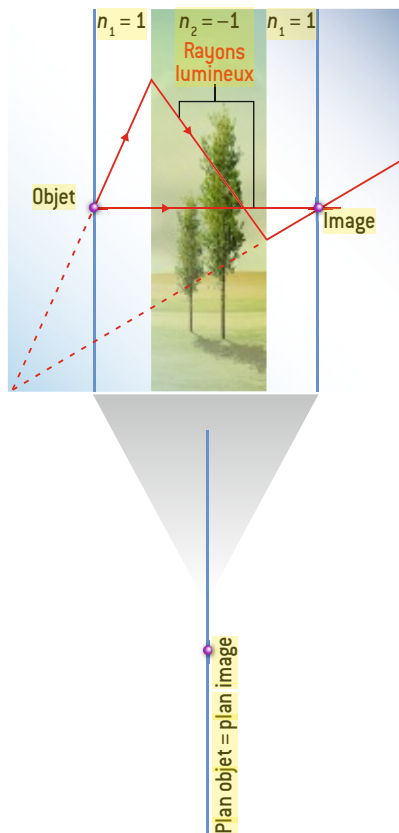
C'est une fois de plus J. Pendry qui, en 2000, en proposa la réalisation. Il avait en effet montré qu'une alternance périodique de fils métalliques et de résonateurs à anneaux fendus présentait une permittivité négative pour les basses fréquences et une perméabilité négative autour de certaines fréquences 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



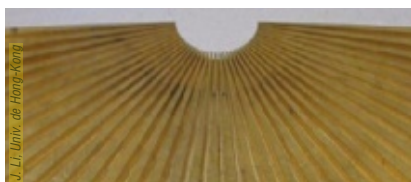
6. LA LENTILLE PARFAITE consiste en une lame d'indice optique égal à -1 . La réfraction atypique qui en résulte fait que l'image d'un point objet est le point symétrique par rapport au plan médian de la lentille (en haut). Tout se passe comme si la lumière continuait son chemin en ligne droite en l'absence 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.

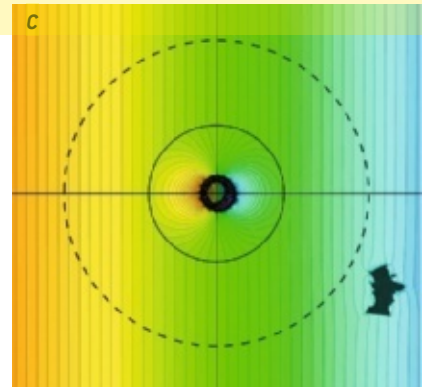
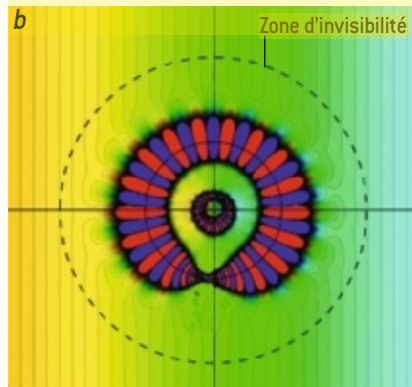
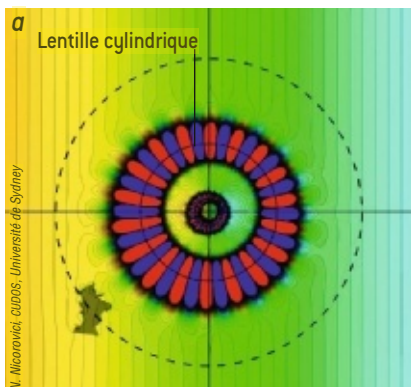
Course à la réalisation de lentilles parfaites

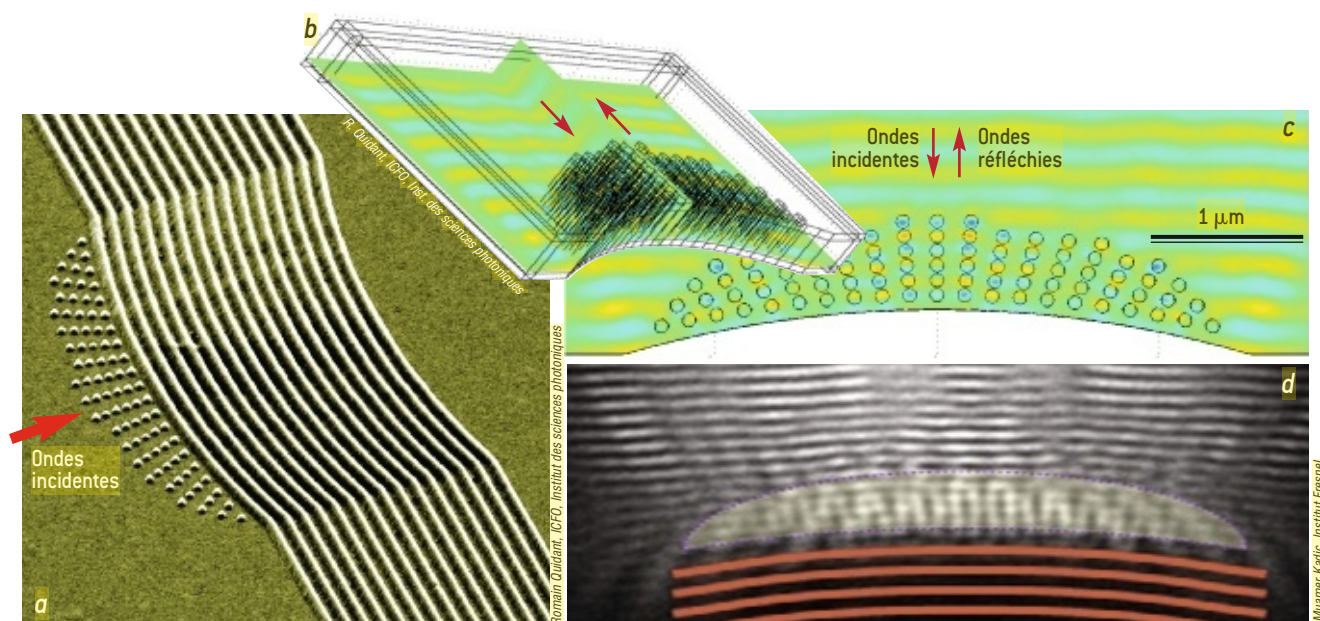
Toutefois, en 2005, l'équipe de Xiang Zhang à l'Université de Los Angeles a démontré expérimentalement une résolution supérieure à un cinquième de longueur d'onde à travers un métamatériau constitué d'un mince film d'argent pris en sandwich entre deux couches de semi-conducteur, pour une fréquence du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