

Méta-matériaux et invisibilité (partie 1)

Sébastien GUENNEAU¹, Ross McPHERAN², Claude AMRA¹ et Stefan ENOCH¹

¹Institut Fresnel, UMR CNRS 7249, Ecole Centrale Marseille,

Aix-Marseille-Université, Campus Universitaire Saint-Jérôme, 13390 Marseille

²CUDOS, School of Physics, University of Sydney, Sydney, New South Wales 2006, Australia

L'invisibilité, et à travers elle le contrôle de la lumière, est un thème récurrent de la mythologie avec notamment la Kunée d'Hadès (casque qui rend son porteur invisible, offert par les cyclopes au dieu grec des Enfers), de la littérature fantastique et de la science-fiction anglo-saxonne qui fraye avec les forces maléfiques dans la célèbre trilogie de John Ronald Reuel Tolkien (l'anneau à détruire, quand il est passé au doigt du héros Frodo, le rend invisible), sans oublier la célèbre invisibilité voulue puis subie de Jack Griffin, l'homme invisible de Herbert George Wells. L'invisibilité acquiert ses lettres de noblesse dans la littérature jeunesse anglaise avec le chat du Cheshire qui apparaît et disparaît à loisir devant les yeux d'Alice Liddell, la jeune égérie du romancier britannique Lewis Carroll, et la littérature française n'est pas en reste avec l'« excellent homme nommé Dutilleul qui possédait le don singulier de passer à travers les murs » dans le Passe-muraille de Marcel Aymé. Cette pléthore de références qui appartiennent à l'imaginaire collectif a assuré un engouement immédiat pour les publications de travaux scientifiques récents sur un contrôle accru de la trajectoire des ondes [1].

Trois exemples emblématiques sont le phénomène de réfraction négative prédit par le physicien moscovite Victor Veselago en 1968, qui permet de focaliser des ondes à travers une lentille plate [2] ; les tamis à photons qui sont des plaques avec des perforations de quelques dizaines de nanomètres au travers desquels l'équipe du physicien norvégien Thomas Ebbesen (université de Strasbourg) a montré en 1998 que la lumière peut se frayer un chemin ; les capes d'invisibilité proposées par les physiciens britanniques Sir John Pendry [1] (Imperial College de Londres) et allemand Ulf Leonhardt (université de Saint-Andrews) dans lesquelles les ondes suivent des trajectoires courbes à l'instar des géodésiques de la lumière au voisinage des corps massifs célestes dans la théorie de la relativité générale d'Einstein.

Nous allons par la suite évoquer différentes façons de rechercher l'invisibilité, et ceci grâce au truchement de la physique transformationnelle qui associe des transformations de l'espace (ou changements de coordonnées) aux propriétés optiques de matériaux que l'on ne rencontre pas à l'état naturel : les méta-matériaux [2]. La force de ce formalisme mathématique qui s'appuie sur l'invariance de certaines équations de la physique

[3,4], nous permettra par ailleurs de jeter des ponts avec d'autres types d'ondes : acoustiques, hydrodynamiques et mécaniques [5]. On pourra ainsi aborder la pertinence de trois types d'invisibilité et s'interroger sur la possibilité d'imaginer de nouveaux camouflages ou de nouvelles protections, même si l'état de l'art est encore loin de répondre à certains enjeux sociétaux spécifiques (séismes, tsunami, ...). Enfin, nous évoquerons le thème de recherche émergent de la thermodynamique transformationnelle, qui a pour but un contrôle accru des flux de chaleur, même s'il n'en est encore qu'à ses balbutiements. Dans tous les cas nous tâcherons de citer certaines des expériences qui ont déjà validé ces principes.

Invisibilité par conservation d'impédance (indice de réfraction = 1)

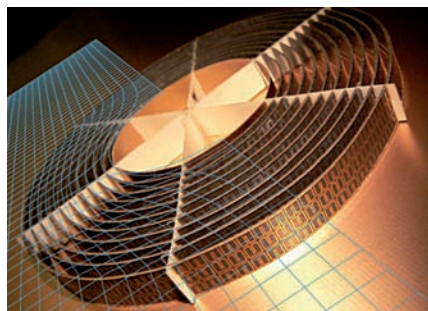
La communauté des opticiens est en effervescence depuis une douzaine d'années, avec la parution d'articles aux titres toujours plus évocateurs adressant la possibilité de dissimuler ou rendre parfaitement transparents des objets en les « habillant » de méta-matériaux spécifiques.

Nader Engheta de l'université de Pennsylvanie et Andrea Alu de l'université d'Austin (USA) furent parmi les premiers à intéresser les médias en suivant la voie tracée par Jack Griffin. Ils proposèrent dès 2005 un méta-matériau qui rend l'indice de réfraction d'un objet proche de 1 sous certaines conditions [2]. Ce procédé requiert une connaissance a priori des propriétés électromagnétiques de l'objet à dissimuler et s'apparente à une résonance de type Fano, qui désigne de manière générale les interférences quantiques entre deux phénomènes physiques dans un milieu, où l'un des phénomènes a un spectre discret en énergie et l'autre un spectre continu. Cette étrangeté optique a surtout intéressé les journaux spécialisés, jusqu'à ce qu'une équipe anglo-américaine se prête au jeu.

Invisibilité par réfraction (permittivité, perméabilité tenseurs définis positifs)

Invisibilité aux ondes centimétriques

John Pendry a jeté les bases théoriques de l'invisibilité par réfraction avec ses collègues David Schurig et David Smith de



Duke University

Figure 1. Prototype de cape d'invisibilité pour les micro-ondes conçue et réalisée en 2006 par J. Pendry, D. Smith et D. Schurig. Un objet placé au centre du système de couches concentriques d'anneaux fendus dont la taille croît avec la distance au centre (le diamètre du dispositif vaut une douzaine de centimètres) est invisible à des micro-ondes d'une certaine fréquence se propageant dans le plan formé par la structure.

l'université Duke aux États-Unis, dans une publication parue dans la revue *Science* en mai 2006 [1]. John Pendry est le théoricien tandis que ses collègues sont les artisans, spécialistes dans l'ingénierie des matériaux. Cinq mois plus tard, dans leur laboratoire américain, l'équipe menée par le physicien britannique faisait « disparaître » aux ondes centimétriques, un cylindre de cuivre de quelques millimètres de diamètre. Ce résultat expérimental a fait l'objet d'une deuxième publication dans le magazine *Science* en novembre 2006, même si les longueurs d'ondes concernées ne font pas partie du spectre visible... ceci pour rappeler que le cylindre est bien discernable pour l'œil humain, ainsi que la cape qui l'entoure !

L'introduction des méta-matériaux

Ce tour de passe-passe pour les micro-ondes s'appuie sur un dispositif expérimental en guide d'ondes : un champ électromagnétique s'y propage en polarisation rectiligne entre deux plaques parallèles et horizontales. Au centre du dispositif, un cylindre de cuivre vertical de trois centimètres de rayon est entouré d'un cylindre creux d'apparence hétérogène dont le rayon extérieur est de six centimètres. Si l'on y regarde de plus près (*figure 1*), cet anneau est constitué lui-même de dix cylindres concentriques sur lesquels sont imprimés sur la surface, des petites bou-

cles en cuivre, les fameux anneaux fendus (*split ring resonators*) introduits par John Pendry en 1999 pour créer des structures diélectriques présentant un magnétisme artificiel : les méta-matériaux. Il y en a des dizaines, de trois millimètres de large environ, mais dont la taille varie d'une rangée à l'autre. Pour planter le décor, le lecteur peut se représenter le champ électromagnétique par un trièdre direct (r, θ, z) comme à la *figure 1*, dont la composante électrique est une flèche verticale suivant z . La composante magnétique est quant à elle une flèche horizontale suivant θ et la direction de propagation de l'onde est une flèche horizontale suivant r pointée vers un cylindre pris en sandwich entre deux plaques (*figure 1*). Les conditions de l'expérience d'invisibilité de l'équipe de Pendry sont donc bien éloignées de celles de la littérature que nous avons évoquée plus haut !

Insistons encore sur le fait que le cylindre creux n'a pas grand-chose à voir avec l'idée que l'on se fait de la cape d'Harry Potter ou d'un revêtement camouflant qui imiterait les couleurs de l'environnement. Remarquons que le cylindre n'est pas absorbant, sinon il serait détecté par la présence d'une région obscure dans le paysage environnant. De nombreux groupes scientifiques travaillant avec des fonds publics ou privés ont développé une expertise importante sur ce thème depuis plusieurs années. Citons par exemple pour la Russie le légendaire Sukhoi Design Bureau. On notera qu'une problématique similaire se retrouve dans le domaine des sonars pour les sous-marins et navires.

Un système passif qui modifie la perception

Quelle est donc l'astuce du tour de passe-passe de Pendry ? Notons que le système est passif et fonctionne sans alimentation. Il ne s'agit donc pas d'une illusion d'optique de plus, telle que celle proposée par une équipe de l'université de Tokyo en 2003 qui s'appuie sur un système optique actif qui consiste à filmer le paysage derrière l'objet et à renvoyer son image à un observateur par un jeu de miroirs.

Il s'agit en fait d'une invisibilité au sens commun de la perception, dans la mesure où l'observateur détecte une scène qui est identique à celle qui existerait en l'ab-

sence de l'objet qui a été camouflé. En conséquence l'objet n'est pas vu (pas plus que la cape qui l'habille), et l'observateur ne se doute pas de sa présence (ce qui est à l'évidence différent d'un objet caché dans une boîte non camouflée).

La technique mathématique mise en jeu pour atteindre ces résultats est un classique de la relativité générale ou des astrophysiciens. Mais ici ce sont les méta-matériaux et plus précisément les tenseurs de permittivité ϵ et de perméabilité μ qui vont subir les effets de la courbure de métrique, et non l'espace-temps (*voir encadré*).

Un comportement qui varie avec la fréquence

Quel chemin empruntent donc les ondes dans cette configuration ? Elles contournent la cape à la manière de l'eau autour du rocher dans le cours d'une rivière (*figure 2*). Mais il y a plus, dans la mesure où les ondes qui contournent la cape se reforment en sortie sans déphasage par rapport à une onde qui ne serait pas détournée.

De façon plus générale, la cape sera constituée d'un matériau anisotrope très hétérogène mettant en jeu des phénomènes d'interférence complexes. Au niveau macroscopique, tout se passe comme si la cape était constituée d'un matériau homogène aux propriétés exotiques. Dans certaines configurations l'indice de réfraction (réel) dit effectif de cette cape pourra prendre des valeurs inférieures à 1 (voire

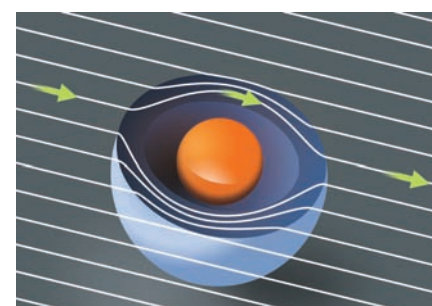


Figure 2. Invisibilité par réfraction qui consiste à dévier (réfracter) les rayons lumineux pour qu'ils contournent l'objet à dissimuler et reprennent en aval du dispositif (ici une coque sphérique bleue de métamatériau entourant l'objet orange) leurs directions initiales comme si l'obstacle à la lumière n'avait pas existé.

Transformation géométrique pour cape d'invisibilité par réfraction

Les tenseurs de permittivité ϵ et de perméabilité μ participent de la réponse électromagnétique d'un objet soumis respectivement à un champ électrique ou à un champ magnétique. Dans le vide, leur produit vaut $\epsilon\mu = \epsilon_0\mu_0 = 1/c^2$ où c est la célérité de la lumière. Dans une matière transparente isotrope, ce produit vaut $\epsilon\mu = \epsilon_0\mu_0 n^2$ où n est l'indice de réfraction. Cet indice est d'ordinaire supérieur à 1, pour rappeler que la lumière se propage plus lentement dans un milieu dense.

Qu'en est-il maintenant d'un milieu anisotrope qui présente des directions préférentielles ? Les permittivité et perméabilité sont alors des tenseurs et leur produit $\epsilon^{ik} \mu^{kj} = \epsilon \mu_0 (g^{ij})^2$, $i, j, k = 1, 2, 3$, est un tenseur que l'on peut représenter par un tableau de 9 chiffres à deux entrées. Ici, nous adoptons la sommation d'Einstein sur l'indice répété k . Le tableau à deux entrées g^{ij} est appelé tenseur métrique. Dans notre configuration et avec des coordonnées cartésiennes x, y, z , on a $g^{ij} = \delta_{ij}$, qui vaut 1 si $i = j$ et 0 sinon ; le tableau contient ainsi 3 chiffres identiques non nuls suivant sa diagonale.

Dans le cas de la figure 2, John Pendry utilise un système de coordonnées sphériques (r, θ, φ) qu'il applique sur un nouveau système de coordonnées (r', θ', φ') afin d'étirer la métrique suivant une direction radiale :

$$\begin{aligned} r' &= R + r (R'-R)/R' \\ \theta' &= \theta \\ \varphi' &= \varphi \end{aligned}$$

Les variables θ, φ qui correspondent aux longitudes et latitudes sur un globe terrestre restent inchangées. Seule la variable radiale (sur un axe qui passe par le centre du globe terrestre) subit une transformation. Cette transformation géométrique projette une sphère pleine de rayon R' sur une sphère creuse de rayon intérieur R et de rayon extérieur R' , tout en laissant invariant le reste de l'espace (voir figure 2). Elle évide en quelque sorte une région centrale de la sphère, de rayon R . Si l'on considère un maillage de l'espace métrique, cette transformation a pour effet de grossir un point en une sphère et de resserrer localement la métrique dans la sphère évidée, de telle sorte que le nombre total de mailles dans la boule pleine initiale soit égal au nombre de mailles dans la boule creuse.

D'un point de vue mathématique, le changement de coordonnées appliqué à l'équation d'onde met en évidence des Jacobiennes dont vont découler les propriétés du méta-matériau dans la couronne. Celles-ci sont alors données par les tenseurs de permittivité et de perméabilité dont les seuls éléments non nuls sont portés par la diagonale dans la base sphérique :

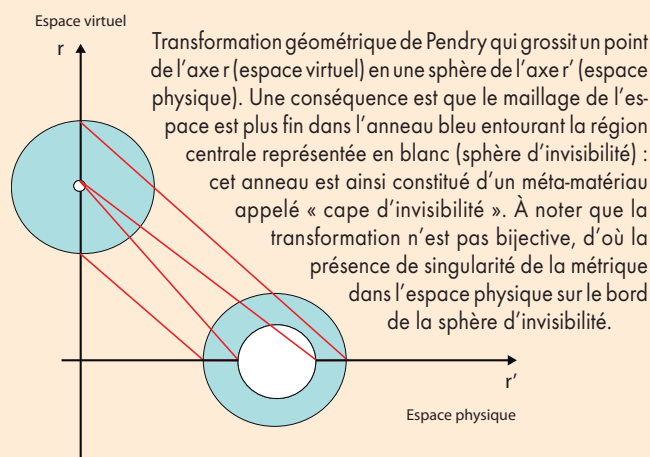
$$\begin{aligned} \epsilon^{11} \mu^{11} &= \epsilon_0 \mu_0 (g^{11})^2 = \epsilon_0 \mu_0 [R'/(R'-R)]^2 [(r'-R)^2/r]^2 \\ \epsilon^{22} \mu^{22} &= \epsilon_0 \mu_0 (g^{22})^2 = \epsilon^{33} \mu^{33} = \epsilon_0 \mu_0 [R'/(R'-R)]^2 \\ \epsilon^{ik} \mu^{kj} &= 0 \text{ pour } i, k, j \text{ non tous égaux} \end{aligned}$$

Ainsi la réfraction de la cape d'invisibilité inventée par John Pendry est décrite par un tableau à deux entrées constitué de 9 coefficients dont 3 sont a priori non nuls dans la base sphérique. À noter que les matériaux à l'état naturel ne confèrent pas ce type de tenseur métrique, c'est en général la structuration de la matière (méta-matériau) qui palliera ce manque.

Notons que les valeurs du produit de la permittivité et de la perméabilité sont radiales (ne dépendent que du rayon r'). La singularité du tenseur g^{ij} de la métrique apparaît pour $r' = 0$, valeur pour laquelle le produit $\epsilon^{11} \mu^{11}$ est infini, et correspond à une vitesse de phase nulle dans cette direction. Par ailleurs pour $r' = R'$, le produit $\epsilon^{11} \mu^{11}$ vaut $1/c^2$ de sorte que l'indice de réfraction sur la sphère de rayon $r' = R'$ est celui de l'air. Cette conservation d'impédance assure qu'il n'y a pas de réflexion à l'interface entre l'air et la cape d'invisibilité. Les rayons pénètrent cette cape sans réflexion puis y sont progressivement déviés en évitant la sphère d'invisibilité avant de se reconstruire en aval. Du point de vue optique électromagnétique, cela ne signifie pas nécessairement que la densité d'énergie ou le champ évanescents soit nul dans la sphère d'invisibilité.

Quant aux produits $\epsilon^{22} \mu^{22}$ et $\epsilon^{33} \mu^{33}$, ils sont constants et égaux mais différent du produit $\epsilon^{11} \mu^{11}$, ce qui traduit le fait que la réfraction est différente suivant les directions de l'espace : le milieu correspondant est donc anisotrope.

Afin de réduire l'anisotropie forte du méta-matériau dans la cape d'invisibilité, Ulf Leonhardt [3] a proposé une transformation qui porte non seulement sur la variable radiale r , mais aussi sur les variables θ, φ , de telle sorte que $\epsilon^{11} \mu^{11} = \epsilon^{22} \mu^{22} = \epsilon^{33} \mu^{33}$. Une telle transformation qui conduit à un milieu isotrope (mais toujours hétérogène) est connue sous le nom de transformation conforme.



négatives) quand la fréquence est en résonance avec les anneaux fendus qui constituent l'ossature de la cape. En pratique, l'absorption et l'impossibilité de travailler à une seule longueur d'onde évitent tout paradoxe ou bizarrerie : l'effet « magique » du méta-matériau ne se produit qu'autour d'une fréquence et les métaux constituant les résonateurs sont for-

tement dissipatifs aux longueurs d'ondes optiques. Il y aura bien un retard (faiblement) mesurable induit par le déphasage entre le front d'onde qui contourne la cape et celui qui se propage en espace libre.

On peut aussi s'interroger sur le sort de l'observateur situé dans la région centrale, qui subit la déchirure de l'espace mé-

trique. Contrairement au personnage de fiction Harry Potter, il est a priori isolé si la cape agit comme une cavité parfaite, dont aucun rayon ne sort. Toutefois et comme déjà signalé, ceci n'est exact qu'à une fréquence donnée qui dépend de l'épaisseur de la cape et de la taille de ses petites boucles métalliques : il faut que les longueurs d'onde considérées excitent

les résonances internes des anneaux fendus, et il faut de plus que la cape soit assez épaisse pour jouer son rôle (pour les réalisations pratiques, on parlera donc plutôt de chape d'invisibilité).

Des obstacles restent à franchir

La théorie est donc là. En pratique, de nombreux obstacles demeurent. En premier lieu, les méta-matériaux sont très sensibles à la longueur d'onde. Cette forte dispersion rend étroite la fenêtre utile, et l'invisibilité large-bande (achromatique) paraît inaccessible. Elle interdit par ailleurs de négliger les pertes. À noter également que toutes les expériences ont été réalisées selon une géométrie à 2 dimensions, négligeant les aspects volumiques. Enfin, dessiner des anneaux fendus d'une taille au moins dix fois plus petite que la longueur d'onde visée reste un verrou technologique, selon la longueur d'onde visée. La communauté suit de près les avancées récentes pour des structures différentes opérant dans le visible : les équipes concurrentes de Vladimir Shalaev de l'université Purdue (USA) et d'Alexander Grigorenko de l'université de Manchester (Royaume-Uni) fabriquent des petites barres métalliques incorporées dans une matrice de verre pour la première, et un réseau de petits plots d'or pour la seconde. Pour l'instant elles ont simplement observé de la réfraction négative.

Chape contre les ondes hydrodynamiques et sismiques

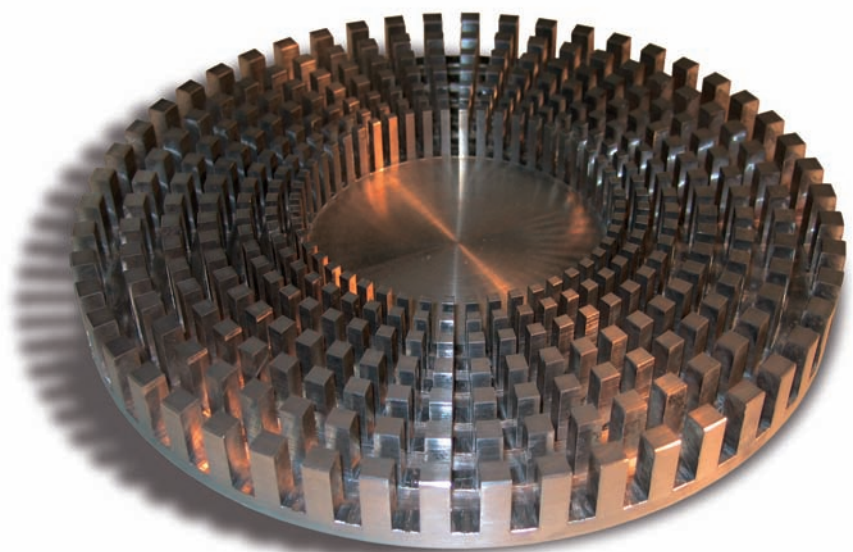
Les mêmes techniques de transformation d'espace peuvent être utilisées pour rechercher des capes protectrices, une notion souvent associée à l'invisibilité. Cela signifie qu'au-delà de la problématique de reconstruction, on peut s'intéresser à la valeur du champ dans la sphère d'invisibilité : dans un grand nombre de cas on verra ainsi coexister des propriétés d'invisibilité et de protection. Les figures 3a et 3b illustrent cette recherche dans les cas de l'hydrodynamique et de la sismique.

Cas des ondes hydrodynamiques

Les équations du physicien écossais James-Clerk Maxwell décrivant la propa-

gation d'une onde électromagnétique dans un matériau sont équivalentes, sous certaines hypothèses liées à la géométrie et la polarisation, à celles décrivant une vague (linéaire) à la surface d'un liquide peu visqueux. Partant de ce constat, notre équipe marseillaise a exploré une voie différente qui consiste à contrôler la propagation des ondes de surface par anisotropie. Le résultat est un méta-matériau

constitué d'une couronne métallique divisée en secteurs présentant une forte anisotropie suivant la direction tangente aux cercles concentriques la constituant. L'avantage de cette approche est qu'elle n'est pas fondée sur des propriétés résonnantes des structures et est donc moins sensible à la fréquence et facile à mettre en œuvre. L'expérience menée en cuve à onde démontre effectivement que l'on peut



N. Fong, Massachusetts Institute of Technology

Figure 3a. Prototype de méta-matériau pour les vagues réalisé par M. Farhat, S. Enoch et S. Guenneau à l'Institut Fresnel et A. Movchan à l'université de Liverpool. Immersée à la surface d'un liquide, cette chape d'invisibilité de 20 centimètres de diamètre protège la région centrale d'un certain type de vagues (faiblement perturbatif, 10-15 Hz) ; la surface du liquide n'y est quasiment pas modifiée par les vaguelettes provenant de l'extérieur du disque structuré. Cette chape a par ailleurs été validée expérimentalement pour les ondes de pression acoustiques dans l'air à des fréquences autour de 5 kHz.

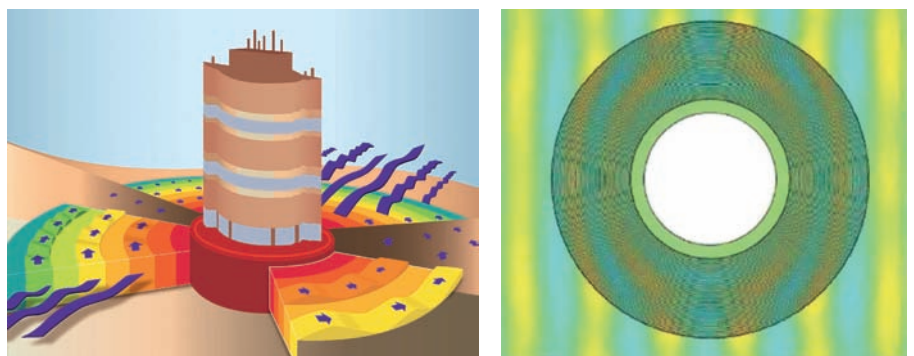


Figure 3b. Prototype de méta-matériau pour les ondes sismiques proposé par M. Farhat, S. Enoch et S. Guenneau à l'Institut Fresnel de Marseille et A. Movchan à l'université de Liverpool. Cette structure en feuillet de quelques mètres de profondeur et d'une centaine de mètres de diamètre protège un bâtiment central d'un certain type d'ondes mécaniques (ondes de flexion de Rayleigh) se propageant à la surface de la Terre (typiquement entre 0,1 et 50 Hz). À gauche : vue d'artiste infographie CNRS. À droite : simulation numérique (vue de dessus).

contrôler les ondes se propageant à la surface d'un liquide, pourvu que celui-ci soit judicieusement choisi en raison de sa faible capillarité (et toxicité-méthoxy-nonafluorobutane). Les vaguelettes agitant la surface du liquide interagissent avec les plots et s'annulent au centre du disque en raison d'interférences destructrices. Le calme règne ainsi dans cette zone, comme si elle avait été rendue invisible à l'agitation extérieure. Toutefois cette expérience est spécifique d'un liquide particulier, d'une gamme de fréquences particulière, et sa transposition à grande échelle en haute mer n'est pas à l'ordre du jour... même si l'on peut conceptualiser une meilleure protection de plateformes off-shore grâce à des pylônes judicieusement installés, voire une protection côtière résultant du détournement des vagues vers les régions non habitées.

Cas des ondes sismiques

Dans le cas de séismes, les ondes de pression sont couplées aux ondes de cisaillement, ce qui complique substantiellement la conception d'une cape (mécanique) dans les solides : les équations de l'élasticité du mathématicien français Navier ont le mauvais goût de ne pas être invariantes par transformation géométrique, et conduisent à des tenseurs à quatre indices (des tableaux de coefficients à quatre entrées). Néanmoins, en collaboration avec Alexander Movchan de l'université de Liverpool, au Royaume-Uni, nous avons proposé une structure en feuillet (voir *figure 3b*) qui permettrait d'atténuer les ondes parmi les plus dévastatrices (les ondes dites de flexion). Ces recherches font l'objet du dépôt d'un brevet international entre le CNRS, Aix-Marseille Université et l'université de Liverpool : une telle cape, placée autour des fondations d'un immeuble, réduirait sensiblement, et pour certaines fréquences, les dégâts d'un séisme (qui serait néanmoins tout aussi dévastateur pour les immeubles environnants).

Cas des ondes acoustiques

Nous n'avons pas abordé le cas des chapes acoustiques, mais les mêmes analogies demeurent sous certaines approximations. Nous reviendrons sur ce point à

la fin de l'article avec une structure réalisée à l'université Duke. Notons que le groupe de Nicholas Fang au MIT a proposé en 2011 une « chape de silence » pour des ondes ultrasonores se propageant dans l'eau qui est en tous points similaire à la chape à vagues de la *figure 3a*. Le même groupe a par ailleurs validé ce dernier concept expérimentalement pour les ondes de pression dans l'air et pour des fréquences acoustiques autour de 5 kHz en 2012, avec la même chape à vagues.

Une invisibilité liée au mode de détection

On retiendra à ce stade, suite à ces différentes chapes pour différents types d'onde, que la notion d'invisibilité doit être considérée eu égard à un mode spécifique de détection (optique, acoustique, mécanique, hydrodynamique...). Cela signifie que l'observateur, muni de son capteur spécifique, aperçoit la même scène indépendamment de la présence ou de l'absence de l'objet camouflé (ce qui, rappelons-le, est différent de cacher l'objet dans une boîte visible). L'objet est ainsi rendu invisible au mode de détection, mais encore faut-il préciser la « configuration » de l'invisibilité. Pour faire simple on peut considérer un système contenant un objet (à rendre invisible), avec une entrée (qui permet l'éclairement ou l'excitation) et une sortie (réception par l'observateur). Le jeu de l'invisibilité consiste à faire en sorte, grâce à l'introduction d'une « cape » au voisinage de l'objet à camoufler, que les signaux de détection en sortie soient identiques à ceux qui auraient existé en l'absence de l'objet camouflé. Il faut donc disposer, pour camoufler l'objet, d'une cape d'invisibilité. Selon la situation et le mode de détection, cette cape peut être propre ou non à l'objet, et la notion de protection peut être associée à celle d'invisibilité. Enfin l'ensemble ne fonctionnera a priori que pour une gamme de fréquences spécifique, voire pour des conditions d'entrée ou de sortie spécifiques (directions et polarisations pour l'optique).

On ne saurait oublier de préciser que l'existence d'une cape conférant ces propriétés doit être démontrée, ce qui va dépendre du type d'équation (parabolique, hyperbolique, elliptique...) régissant la

grandeur détectée. Et lorsque cette existence est prouvée d'un point de vue conceptuel, encore faut-il pouvoir approcher les propriétés de la cape avec un milieu artificiel ; ce dernier point est en général atteint avec un méta-matériau, résultat d'une structuration de la matière, ou de la construction et juxtaposition de motifs élémentaires en grand nombre. Lorsque toutes ces conditions sont réunies pour réaliser l'expérience d'invisibilité (mono-fréquentielle, monodirectionnelle), on peut alors s'intéresser à son caractère large-bande (achromaticité pour l'optique) ou à sa sensibilité à l'incidence.

Enfin il faut ajouter que les techniques de transformation d'espace ne sont pas restreintes à l'invisibilité. D'une façon bien plus large, elles autorisent une autre façon d'appréhender la conception de systèmes pour le contrôle des écoulements des flux (transfert d'énergie). On a ainsi pu voir émerger, au-delà des capes d'invisibilité/protection, des concentrateurs et des rotateurs.

Les capes et chapes d'invisibilité guident les ondes autour d'une zone en créant un trou dans la métrique de l'espace, mais est-il possible d'atteindre un contrôle encore plus radical de leurs trajectoires ? Nous verrons dans la seconde partie de cet article, à paraître dans le prochain numéro de Photoniques, ce que réalise la réfraction négative, qui peut être associée à un repliement de l'espace sur lui-même.

Références

- [1] J. Pendry *et al.*, Controlling electromagnetic fields, *Science*, 312, 1780-1782 (2006)
- [2] S. Anantha Ramakrishna, T.M. Grzegorzczuk, *Physics and Applications of Negative Refractive Index Materials* (CRC Press and SPIE Press, 2008)
- [3] U. Leonhardt, T. Philbin, *Geometry and light: The science of invisibility* (Dover publication, 2010)
- [4] A. Nicolet, Les capes d'invisibilité et l'optique transformationnelle, *Images de la Physique 2010* (Éditions CNRS, 2010) http://www.cnrs.fr/publications/imagesdelaphysique/Auteurs2010/06_Capes_invisibilite.htm
- [5] S. Guenneau *et al.*, Les ondes sous l'emprise des métamatériaux, *Pour La Science*, 409, 58-63 (novembre 2011)