

Des travaux que nous avons menés chez l'animal ont montré que l'amplitude de la RATC à des niveaux sonores élevés est très informative: elle augmente proportionnellement au nombre de fibres du nerf auditif dotées d'une connexion viable avec des cellules ciliées internes. De même, dans une récente étude épidémiologique inspirée par nos travaux, les chercheurs ont utilisé une variante de la RATC chez un groupe d'étudiants anglais présentant des audiogrammes normaux et ont observé des amplitudes plus faibles de la réponse chez ceux qui ont mentionné avoir été exposés de façon répétée au bruit intense de discothèques et de concerts.

À la recherche de traitements potentiels pour la perte auditive cachée, nous nous demandons à présent si l'on peut inverser la dégénérescence induite par le bruit, en traitant les neurones survivants avec des substances chimiques conçues pour faire croître de nouvelles fibres nerveuses et pour rétablir ainsi des connexions avec les cellules ciliées internes. Bien que les synapses elles-mêmes soient détruites immédiatement après l'exposition au bruit, la

lenteur de la dégénérescence du reste du nerf (corps cellulaire et axone) nous permet d'être optimistes et de penser que l'on peut rétablir la fonction normale chez de nombreuses personnes. Nous avons obtenu des résultats encourageants dans des études sur l'animal en administrant des neurotrophines (des protéines qui favorisent la croissance des neurones) directement dans l'oreille interne.

Il sera peut-être bientôt possible de traiter une perte auditive cachée en injectant à travers le tympan des gels qui libèrent lentement des neurotrophines afin de recréer des synapses en quelques mois ou années. On administrerait ces produits tout de suite après l'exposition à un bruit intense, comme celui de l'explosion à la ligne d'arrivée du marathon de Boston en 2013, qui a lésé l'audition de plus d'une centaine de spectateurs. Ainsi, un otologiste pourra peut-être un jour administrer des médicaments dans la cochlée pour traiter de façon très peu invasive les lésions auriculaires induites par le bruit – et cela aussi facilement qu'un ophtalmologue corrige aujourd'hui une myopie par une chirurgie laser de la cornée. ■

■ BIBLIOGRAPHIE

S. G. Kujawa et M. C. Liberman, **Synaptopathy in the noise-exposed and aging cochlea: Primary neural degeneration in acquired sensorineural hearing loss**, *Hearing Research*, publié en ligne le 11 mars 2015.

S. G. Kujawa et M. C. Liberman, **Adding insult to injury: Cochlear nerve degeneration after "temporary" noise-induced hearing loss**, *Journal of Neuroscience*, vol. 29(45), pp. 14077-14085, 2009.

LES {Partagez les savoirs} RENDEZ-VOUS DU MUSÉUM

Entrée gratuite

Au Jardin des Plantes

Détails sur mnhn.fr, rubrique : "les rendez-vous du Muséum"

POUR LA SCIENCE

UN CHERCHEUR / UN LIVRE

Lundi 7 mars – 18h :
Une belle histoire de l'Homme, Éditions Flammarion / Muséum, 2015
Par E. Heyer, anthropo-généticienne, Muséum
et D. Grimaud-Hervé, paléo-anthropologue, Muséum

CONFÉRENCES

La Nature nous parle : la sonothèque du Muséum

Lundi 14 mars – 18h : L'éco-acoustique ou la nature sur écoute
Par J. Sueur, maître de conférences, éco-acousticien, Muséum
et H. Glotin, professeur, Institut Universitaire de France, Université de Toulon
Lundi 21 mars – 18h : Sons et comportement chez les animaux
Par T. Aubin, directeur de recherche CNRS, Université Paris-Sud et H. Cap, éthologue, gestionnaire des collections de zoologie, Muséum d'Histoire naturelle de Toulouse

MÉTIER DU MUSÉUM

Dimanche 20 mars – 15h :
Carpologie, spécialiste des graines et des fruits archéologiques, A. Salavert

Auditorium de la Grande Galerie de l'Évolution - 36 rue Geoffroy St-Hilaire, Paris 5^e

COURS PUBLICS

Et l'Homme domestiqua la plante : à l'origine des espèces cultivées

Par M. Tengberg, spécialiste en archéobotanique de l'Asie du Sud-Ouest, professeur, Muséum
Jeudi 24 mars – 18h : Cultiver le sauvage : naissance de l'agriculture au Proche-Orient
Jeudi 31 mars – 18h : Riz, mils et sorgho : les autres agricultures de l'Ancien Monde

Grand Amphithéâtre du Muséum - 57 rue Cuvier, Paris 5^e

Séismes, tempêtes...

Bientôt des capes de protection

Gregory Gbur

**Si la cape d'invisibilité n'est encore qu'une perspective lointaine,
son principe inspire des dispositifs de protection
contre d'autres types d'ondes que la lumière.**

Il y a près d'une décennie, les premières recherches scientifiques sur une cape d'invisibilité dans le domaine optique ont vu le jour. Mais en dépit d'efforts théoriques et expérimentaux acharnés, de nombreux obstacles restent à surmonter avant qu'un dispositif de camouflage à la Harry Potter se profile à l'horizon. En effet, des limitations théoriques indiquent que de tels dispositifs pourraient être impossibles à réaliser, si l'on exige d'eux une taille macroscopique et une efficacité parfaite.

Une cape de masquage idéale guide les ondes autour d'une région centrale, un peu comme l'eau s'écoule autour d'un gros galet dans un ruisseau. Les objets situés dans cette région n'interagissent pas avec les ondes qui, en aval et en amont de la région masquée, sont imperturbées. Cette propriété est en fait un inconvénient pour les capes d'invisibilité, où les ondes dont il s'agit sont des ondes lumineuses : celui qui la porte ne sera pas vu, mais il ne pourra rien voir non plus.

© Muselman / Shutterstock.com

Cependant, toutes les ondes ne sont pas lumineuses, et l'on pourrait exploiter les idées de dissimulation par cape pour protéger des objets ou des personnes contre les effets nuisibles d'ondes océaniques, sonores, magnétiques ou sismiques. En fait, la mise au point de dispositifs de dissimulation pour protéger, plutôt que pour cacher, pourrait être l'application la plus intéressante susceptible d'émerger de ce domaine de recherche encore tout jeune.

Les racines de l'invisibilité en physique remontent à des recherches dans le domaine biomédical. Au début des années 1970, l'ingénieur britannique sir Godfrey Hounsfield développait la première technique d'imagerie médicale en trois dimensions, le tomodensitomètre ou scanner à rayons X, aujourd'hui omniprésent, et démontrait son efficacité et son innocuité pour réaliser des images du cerveau. Dans un tel scanner, l'objet examiné est exposé à des rayons X venant de multiples directions, ce qui produit un

L'ESSENTIEL

■ **Des idées publiées**
il y a une dizaine d'années ont donné naissance à tout un domaine de recherche : la physique de l'invisibilité.

■ **La réalisation d'une cape d'invisibilité, même imparfaite, se heurte à de nombreux obstacles d'ordre pratique, voire théorique.**

■ **Pour se protéger d'ondes autres que lumineuses, les obstacles sont moins nombreux. Les scientifiques ont ainsi réalisé divers dispositifs qui constituent des preuves de principe.**

ensemble d'images qu'un ordinateur combine pour former une image tridimensionnelle complète de l'objet.

Mais les rayons X sont relativement inefficaces pour distinguer les tissus mous. Les chercheurs ont donc commencé à développer de nouvelles techniques d'imagerie médicale fondées sur l'utilisation d'ondes différentes. Une inquiétude se fit jour immédiatement : et si certains objets n'étaient pas visualisables par ces techniques ? En d'autres termes, existait-il des objets invisibles pour ces techniques d'imagerie ? S'il existait par exemple des « tumeurs invisibles », alors toute technique utilisant des ondes pour explorer le corps humain présenterait de graves défauts.

L'invisibilité, mission impossible ?

Heureusement, des travaux théoriques de la fin des années 1980 ont montré que, en général, il n'existe pas d'objets invisibles. Un objet peut être complètement invisible lorsqu'il est éclairé d'une seule direction (par exemple, nombreux sont ceux qui se sont cognés sur une porte en verre parce que l'éclairage était tel que la porte devenait invisible), mais il semble impossible qu'un objet soit invisible pour toutes les directions d'éclairage.

Ce résultat a semblé régler définitivement la question, jusqu'à ce que, en 2006, deux études théoriques soient publiées dans la revue *Science*, l'une par Ulf Leonhardt, à l'université de Saint Andrews, en Écosse (et aujourd'hui à l'institut Weizmann, en Israël), et l'autre par John Pendry, de l'Imperial College de Londres, avec David Schurig et David Smith, de l'université Duke aux États-Unis. Ces deux articles proposaient des modèles théoriques de cape d'invisibilité fondés sur une technique nouvelle nommée optique transformationnelle.

De quoi s'agit-il ? Quand de la lumière passe d'un milieu à un autre, par exemple de l'eau à l'air, elle change de direction – on parle de réfraction. Cet effet est évident quand on observe une paille plongée dans un verre d'eau : la paille semble pliée à l'interface air-eau. L'idée clé de l'optique transformationnelle a consisté à remarquer que, dans de nombreux cas, courber des ondes lumineuses équivaut mathématiquement à déformer la géométrie de l'espace. Le principe consiste donc à concevoir la déformation spatiale

L'AUTEUR



Gregory J. GBUR est maître de conférences au département de physique et d'optique de l'université de Caroline du Nord à Charlotte, aux États-Unis.

Article publié avec l'aimable autorisation de la revue *American Scientist*.

souhaitée, en l'occurrence celle qui force les rayons lumineux à contourner la région à dissimuler, puis à en déduire le type de matériaux nécessaires pour produire le dispositif de camouflage.

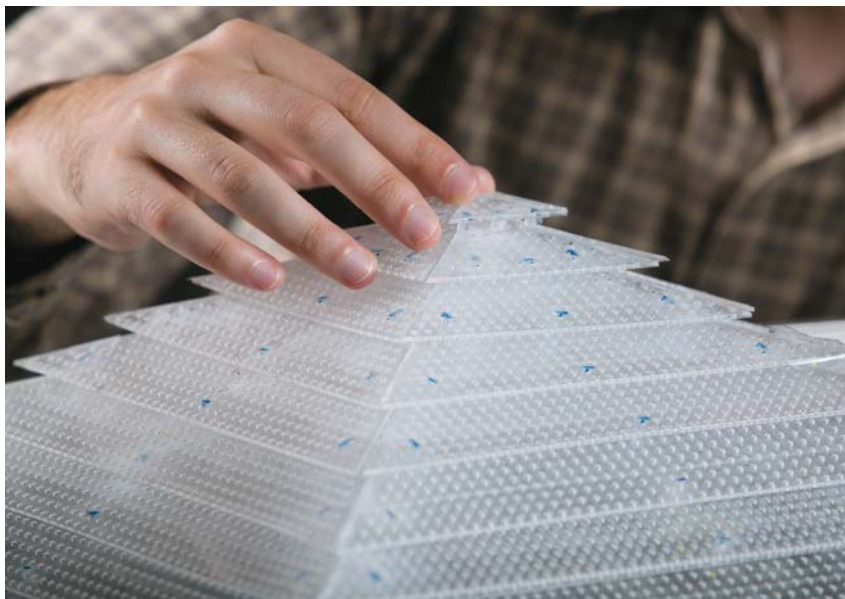
Comment ces dispositifs de dissimulation seraient-ils possibles alors que des recherches antérieures avaient apparemment prouvé l'impossibilité de l'invisibilité ? Les auteurs des deux études de 2006 résolvaient cette contradiction apparente de deux façons différentes. Ulf Leonhardt notait simplement que la non-existence de l'invisibilité « parfaite » n'exclut pas la possibilité d'une quasi-invisibilité : un objet invisible à 99 %, par exemple, serait sans doute acceptable pour la plupart des applications. Quant à John Pendry et ses deux coauteurs, ils faisaient observer que les preuves de non-existence ne prennent pas en compte des milieux matériels très particuliers que l'on ne trouve pas dans la nature, mais que l'on pourrait en principe fabriquer en laboratoire.

Les métamatériaux entrent en scène

Ces chercheurs pensaient à ce qu'on appelle à présent des « métamatériaux », des milieux formés par un assemblage de structures artificielles. Alors que la plupart des matériaux naturels ne réagissent qu'au champ électrique des ondes lumineuses, on pourrait mettre au point des métamatériaux présentant en outre une réponse magnétique. De plus, la plupart

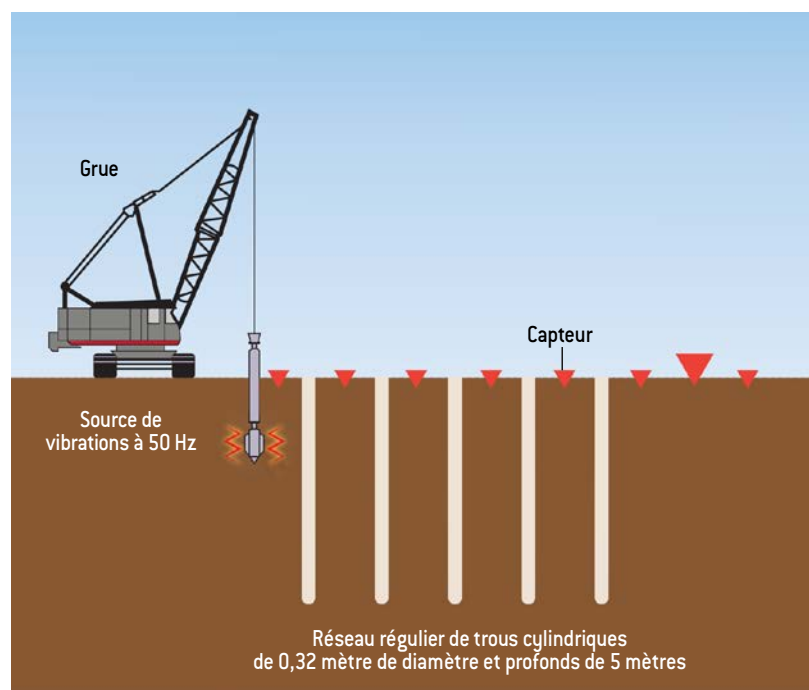
CE « TAPIS » ACOUSTIQUE

réalisé en 2014 à l'université Duke renvoie les ondes sonores vers un auditeur comme si elles n'avaient rencontré aucun obstacle, dissimulant ainsi l'objet qu'il recouvre. Steven Cummer et ses collègues ont effectué de longs calculs pour déterminer le positionnement précis de trous et de feuilles de plastique permettant de modifier la trajectoire des ondes sonores de façon appropriée.



École Pratt d'ingénierie, université Duke

PROTECTION ANTISISMIQUE



AVEC DES TROUS DE FORAGE PRÉCISÉMENT ESPACÉS, qui font varier la densité moyenne du sol d'un endroit à l'autre, on peut contrôler la vitesse, donc la direction, de propagation dans le sol d'une onde de vibration. Une expérience récente, schématisée ci-dessus et réalisée par Stéphane Brûlé, de l'entreprise Ménard, et ses collègues, a ainsi montré qu'un tel réseau dévie les ondes de surface produites par une source artificielle. Ce principe permettrait de protéger une structure contre des ondes sismiques.

D'après S. Brûlé et al., Phys. Rev. Lett., vol. 112, 133901, 2014.

des matériaux naturels sont isotropes, c'est-à-dire que la lumière s'y propage à la même vitesse quelle que soit sa direction. Les matériaux anisotropes, où la vitesse de la lumière dépend de la direction considérée, offrent une liberté supplémentaire pour concevoir de véritables dispositifs de dissimulation.

Se cacher des micro-ondes

Fin 2006, les chercheurs de l'Imperial College et de l'université Duke ont construit et testé un dispositif rudimentaire capable de cacher un objet vis-à-vis de micro-ondes. Depuis, divers concepts de dispositif de dissimulation ont été proposés, et un certain nombre d'entre eux ont été testés. Notamment, en 2014, l'équipe de l'université de Duke a fait la démonstration d'une cape d'invisibilité aux ondes acoustiques. Bien que ces dispositifs soient loin de pouvoir prétendre à une véritable invisibilité, ils illustrent la validité des concepts théoriques.

La dissimulation parfaite vis-à-vis des rayons lumineux se heurte cependant à

un certain nombre d'obstacles majeurs. Côté pratique, la construction de métamatériaux suppose que l'on soit capable de manipuler la structure de la matière à des échelles du même ordre que la longueur d'onde de la lumière (condition d'une forte influence sur l'onde). Comme la lumière visible a des longueurs d'onde de l'ordre du millionième de mètre, cette tâche n'est pas encore à notre portée.

Il y a par ailleurs, du côté théorique, un défi encore plus difficile à relever. Pour que la cape soit vraiment indétectable, la lumière doit mettre le même temps à traverser la cape qu'à passer à côté. Or la lumière passant à l'intérieur de la cape doit parcourir une distance supérieure pour éviter la région masquée, ce qui signifie qu'elle doit se propager plus vite que la lumière extérieure. Par conséquent, la lumière à l'intérieur de la cape doit voyager à une vitesse supérieure à celle de la lumière dans l'air, qui est presque identique à la vitesse de la lumière dans le vide, c . Il est possible de réaliser cet exploit pour une plage très étroite de fréquences sans dépasser c et violer la théorie de la relativité d'Einstein,

mais il semble impossible de le faire pour tout le spectre visible simultanément. En d'autres termes, on pourrait masquer une nuance donnée de rouge, mais l'objet resterait bien visible pour la lumière de toutes les autres couleurs.

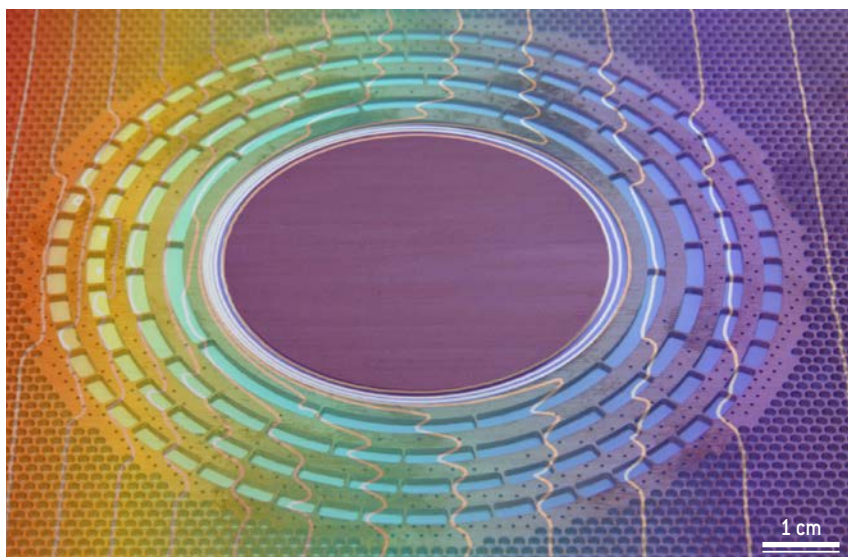
Si l'on ne réalisera probablement pas de capes d'invisibilité optique parfaites, ou juste raisonnablement bonnes, et de taille correcte, de nombreux obstacles à la dissimulation vis-à-vis de la lumière visible disparaissent pour d'autres types d'ondes que la lumière. La vitesse de ces ondes, très inférieure, n'a pas, en pratique, de limite supérieure; de plus, les longueurs d'onde en jeu sont beaucoup plus grandes, ce qui les rend plus aisées à manipuler. Et si ce qui nous intéresse est de concevoir des dispositifs pour se protéger d'ondes destructrices, nous n'avons pas besoin d'atteindre la perfection. Une «cape d'invisibilité» réduisant l'impact d'une onde sismique sur un bâtiment ne serait-ce que d'un ordre de grandeur pourrait empêcher l'effondrement de ce dernier.

Boucliers souterrains

Les scientifiques ont proposé, pour se protéger des ondes, plusieurs dispositifs fondés sur l'idée de dissimulation par cape. Par exemple, on pourrait entourer un bâtiment d'une série de trous ou de piliers positionnés de manière très précise dans le sol, ce qui ferait varier spatialement la densité moyenne du sol et, par conséquent, la direction de propagation des éventuelles ondes sismiques destructrices, lesquelles dévierait de façon à éviter la structure.

Avec des collègues, Sébastien Guenneau et Stefan Enoch, de l'institut Fresnel (CNRS/Aix-Marseille université/Centrale Marseille) ont testé cette idée. En 2012, un réseau de trous a été mis en place par l'équipe de Stéphane Brûlé, de l'entreprise Ménard, pour faire écran à un générateur d'ondes sismiques artificielles (voir la figure ci-dessus). Bien que le système ait simplement bloqué les ondes plutôt que de les guider, il a démontré que des structures souterraines pouvaient agir sur ce type d'ondes.

Il est également possible de créer des dispositifs de dissimulation pour les ondes sonores se propageant dans l'air ou dans l'eau. En 2011, Nicholas Fang et des collègues, à l'université de l'Illinois à Urbana-Champaign, ont fait la démonstration



PROTÉGER DE LA CHALEUR : c'est ce que fait cette structure bidimensionnelle, réalisée avec du cuivre et un isolant thermique en 2013 par Martin Wegener, de l'institut de technologie de Karlsruhe, et ses collègues. Le flux de chaleur, qui se propage de gauche à droite, préserve la région centrale et semble imperturbé par celle-ci, comme en témoignent les températures [codées par des couleurs].

d'un petit dispositif de dissimulation vis-à-vis d'ultrasons se propageant sous l'eau selon un plan. La structure réalisée est un cylindre plat d'une quinzaine de centimètres de diamètre, comportant 16 anneaux concentriques constitués de cavités connectées. Ces dernières sont conçues pour modifier la vitesse du son chacune de façon différente, afin que les ondes ultrasonores contournent la région centrale du dispositif où se trouve l'objet à dissimuler ou à protéger.

Une autre possibilité intéressante serait de se protéger des vagues de l'océan. En 2012, Mohammad-Reza Alam, de l'université de Californie à Berkeley, a proposé une idée de dispositif de dissimulation pour une application de ce type. Elle fait appel à la présence de perturbations sous la surface, appelées ondes interfaciales, qui apparaissent souvent dans les océans à une profondeur où la température, et donc la densité de l'eau, change brutalement.

Un brise-lames autour d'une plateforme ?

En installant autour d'une bouée ou d'une plateforme pétrolière une structure aux motifs bien choisis, il est en théorie possible de convertir les vagues qui s'approchent de la structure en ondes interfaciales qui vont passer en dessous sans faire de dégâts ; de l'autre côté de la structure, les ondes remonteraient ensuite à la surface. Pour l'instant, cette idée n'a pas fait l'objet d'expériences.

Les ondes ne sont pas les seules cibles possibles d'une telle technologie. En 2012,

Sébastien Guenneau et Claude Amra, de l'institut Fresnel, et Denis Veynante, de l'École centrale de Paris, ont introduit l'idée de cape thermique, capable de protéger une région d'un flux de chaleur. Pour l'essentiel, la cape offre une « trajectoire de moindre résistance » au flux de chaleur, qui tendra ainsi à contourner la région dissimulée avant d'y pénétrer partiellement au bout d'un certain temps. Un tel concept pourrait fournir une protection à des appareils sensibles à la chaleur, comme le sont les dispositifs électroniques.

Se protéger d'un flux de chaleur, d'un champ magnétique...

Un autre domaine où l'on pourrait envisager une protection est celui des champs magnétiques. Toujours en 2012, Fedor Gömöry et ses collègues, de l'Institut de génie électrique, en Slovaquie, et de l'université autonome de Barcelone, en Espagne, ont fait la démonstration expérimentale d'une cape magnétique. Elle était constituée de deux cylindres creux accolés et concentriques, le cylindre interne étant en matériau supraconducteur, qui expulse les champs magnétiques, et le cylindre externe en fer, qui au contraire les attire. Ce dispositif empêche un champ magnétique statique de pénétrer à l'intérieur du double cylindre.

Cette technique pourrait se révéler utile en imagerie médicale. En imagerie par résonance magnétique, ou IRM, le signal est obtenu à l'aide d'un champ magnétique puissant, tellement puissant que la plupart des équipements électroniques utilisés pour exploiter la machine doivent être placés dans une autre pièce. Une cape magnétique pour ces appareils électroniques leur permettrait d'être plus petits et moins coûteux.

Il est même possible de créer une cape anticourants électriques. En 2012, Fan Yang et ses collègues, de l'université de Lanzhou et de l'université du Sud-Est, en Chine, ont fait la démonstration expérimentale d'une cape d'invisibilité vis-à-vis d'un courant électrique continu. Une telle cape pourrait offrir davantage de liberté aux ingénieurs électroniciens dans la conception géométrique des circuits, en évitant les interférences entre les composants.

Des formes limitées d'invisibilité peuvent offrir une protection de manière tout à fait inattendue. En 2003, avant même la parution des premiers articles théoriques

La cape est traditionnellement le vêtement que portent les voyageurs pour se protéger des intempéries. Les applications que laisse entrevoir la physique de l'invisibilité montrent que la science pourrait offrir des capes qui protègent contre presque tous les aléas de la nature. ■

S. Guenneau *et al.*, L'invisibilité en vue, *Pour la Science*, vol. 382, août 2009.

Disponible en kiosque
et sur **www.cerveauetpsycho.fr**

John Wilkins, l'avocat du peuple de la LUNE

Claire Bouyre

Au XVII^e siècle, John Wilkins, un jeune savant anglais, est convaincu que la Lune est habitée. Conscient qu'il ne peut rien prouver, l'érudit ecclésiastique construit son argumentation sur les récentes découvertes astronomiques, mais aussi sur les connaissances du vivant.

Les Sélénites existent-ils ? Du nom de la déesse grecque de la Lune, Séléné, ce terme désigne, depuis les *Histoires vraies* de Lucien de Samosate (II^e siècle), les éventuels habitants lunaires. Aujourd'hui, si rien ne permet d'affirmer qu'il n'existe pas d'autres formes de vie ailleurs que sur Terre, il est certain que la Lune n'abrite aucun peuple et il est même fort probable qu'elle ne renferme aucune trace de vie. Nous tenons ces informations de l'astronomie, de l'astrophysique et des missions *Apollo* sur notre satellite et autour : pas d'atmosphère, seules quelques traces d'eau – et sous forme de glace –, aucune trace de vie, aucune molécule biologique dans les centaines d'échantillons rapportés des expéditions sur la Lune entre 1969 et 1972...

Au XVII^e siècle, en revanche, avec les connaissances de l'époque et l'importance de la religion, il n'était pas aussi simple de répondre à cette question et la discussion était âpre entre les partisans de l'existence d'autres mondes habités que la Terre et leurs opposants. Pour comprendre les difficultés auxquelles ont été confrontés les



© Internet Archive, université de Gand