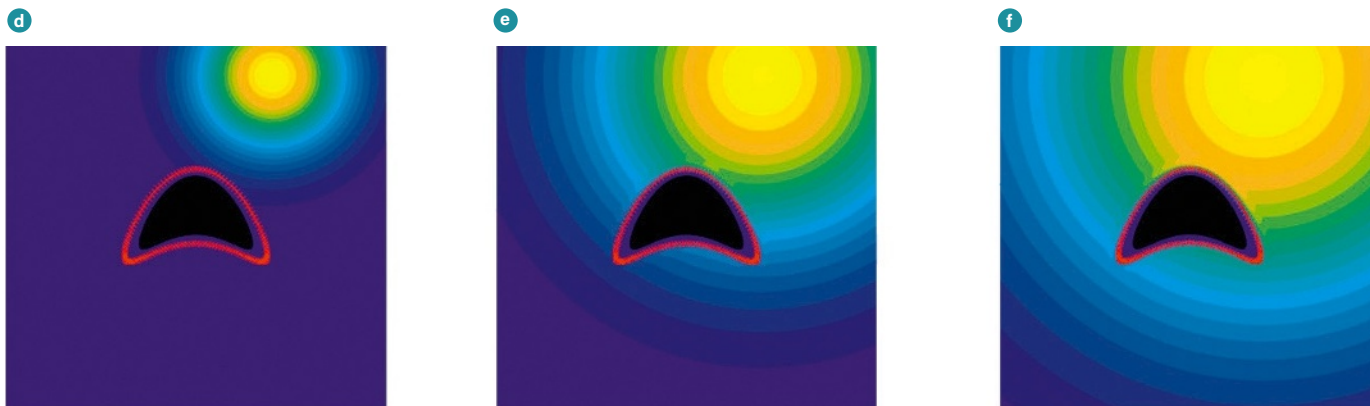




démonstration d'une cape d'invisibilité aux ondes acoustiques. Bien que ces dispositifs soient loin de pouvoir prétendre à une véritable invisibilité, ils illustrent la validité des concepts théoriques.

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 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), en l'occurrence le millionième de mètre : c'est encore hors de notre portée.

← Les courbes isothermes (du bleu au jaune, la température augmente) qui diffusent à partir d'une source de chaleur ponctuelle sont déformées par un objet dont la température est maintenue à zéro degré (a, b et c, à différents pas de temps) : ce comportement rend l'objet repérable, par exemple par une caméra thermique. Quand l'objet est entouré de sources de chaleur judicieusement choisies (en rouge), ces courbes isothermes redeviennent concentriques (d, e et f). En d'autres termes, on a rendu l'objet

27

## UN OBSTACLE TEMPOREL

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.

Des capes qui  
protègent contre les  
aléas de la nature  
(séismes, vagues,  
chaleur...): ce n'est  
pas de la magie,  
mais ça y ressemble!

28

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 façon 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 dévierraient de façon à éviter la structure.

### BOUCLIERS SISMIQUES ET BRISE-LAMES

Avec des collègues, Sébastien Guenneau, aujourd'hui à l'UMI Abraham de Moivre du CNRS et de l'Imperial College de Londres, a testé cette idée près de Lyon. 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. 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. La recherche de parades antisismiques se poursuit et l'on découvre de nouvelles idées dans des endroits inattendus, par exemple dans l'architecture de bâtiments

antiques, comme le Colisée, à Rome, et même dans les forêts (voir l'encadré page 25)!

Une autre possibilité intéressante serait de se protéger des vagues de l'océan. En 2008, Sébastien Guenneau, avec Stefan Enoch de l'institut Fresnel, à Marseille, et leurs collègues avaient imaginé un dispositif contrôlant la trajectoire des vagues. Il s'agissait d'une série de sept rangées circulaires et concentriques de poteaux, aux diamètres et positions judicieusement choisis de façon que les vagues interfèrent pour s'annuler dans la partie centrale où l'on peut dès lors imaginer placer une éolienne flottante par exemple.

En 2019, Siyuan Zou, de l'université Zhejiang, en Chine, et ses collègues d'une part et l'équipe de Juhyuk Park, de l'université de Séoul, en Corée du Sud, d'autre part ont aussi conçu des métamatériaux protégeant des vagues. Le système du premier groupe consiste en de longues barres parallèles disposées le long des côtés d'un chenal qui, les simulations le montrent, atténuent la vitesse des vagues en surface et amortissent leur amplitude. L'équipe sud-coréenne a quant à elle imaginé un métamatériau qui élimine le sillage qui se forme derrière un obstacle ou à l'arrière d'un navire.

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 finalement d'y pénétrer partiellement. Un tel concept pourrait fournir une protection à des appareils sensibles à la chaleur, comme le sont les dispositifs électroniques.

En 2021, le principe de cape thermique a été perfectionné par Maxence Cassier, de l'institut Fresnel, et ses collègues, notamment de l'université de l'Utah, aux États-Unis. L'idée? Entourer l'objet que l'on souhaite dissimuler par des petites pompes à chaleur (comme les réfrigérateurs qui font du froid en pompant la chaleur de l'intérieur de l'appareil vers l'extérieur). Les simulations de Trent Degiovanni et Fernando Guevara, de l'université d'Utah, montrent que l'on peut maintenir constante la température de l'objet au centre (voir la figure pages 26 et 27), un avantage par exemple pour protéger des