

les poulpes, repèrent plutôt les méduses par la modification de la polarisation de la lumière qui les traverse, une information à laquelle nous humains sommes complètement insensibles. [La polarisation correspond à l'évolution de l'angle du plan de propagation des champs électrique et magnétique d'une onde lumineuse le long de sa trajectoire, ndlr.]

Chez les méduses et chez l'«homme invisible», outre les yeux, d'autres organes ne peuvent rester invisibles, ce sont ceux dédiés à la digestion. Un estomac invisible, mais plein, ça se voit!

Une solution serait alors de s'entourer de métamatériaux. Pouvez-vous rappeler ce dont il s'agit ?

Le principe, assez astucieux, consiste à dévier la lumière, ou d'autres types d'ondes, et à faire en sorte qu'elles évitent un certain volume. C'est une sorte de mirage! Imaginons dans ce volume une boîte, et à l'extérieur deux individus, l'un d'un côté qui l'éclaire et l'autre, à l'opposé, qui regarde le précédent. Avec une boîte normale, les deux observateurs la repèrent facilement, que ce soit par la réflexion, la diffusion ou l'obstruction des rayons lumineux. Avec une boîte cernée de métamatériaux: celui qui éclaire voit son faisceau lumineux partir éclairer l'observateur, et celui-ci ne voit qu'un faisceau lumineux émis par une lampe exactement comme s'il avait été tout droit. Les deux personnages ne peuvent que conclure à l'absence d'objet entre eux deux. Une telle boîte est idéale pour jouer à cache-cache!

Est-ce absurde de comparer cette déviation de la lumière au phénomène des lentilles gravitationnelles ?

Même si l'histoire a emprunté d'autres chemins, le rapprochement entre gravitation et électromagnétisme est pertinent. En relativité générale, la géométrie de l'espace-temps est imposée par la distribution de masse et d'énergie. Le mouvement naturel suit une géodésique de l'espace-temps: c'est une ligne droite en l'absence de toute masse et une orbite dans le voisinage du Soleil par exemple. À partir des équations d'Einstein, on peut ainsi, connaissant les caractéristiques de notre étoile, calculer les orbites des planètes. L'inverse est tout aussi possible: déterminer la distribution de masses de façon à obtenir une géométrie particulière, par exemple celle correspondant à un trou de ver, c'est-à-dire un «tunnel» entre deux régions distinctes de l'espace-temps.

Transposées à la lumière, les équations d'Einstein deviennent celles de Maxwell et la relativité générale, la théorie de l'électromagnétisme. La question du trou de ver est alors: dans un milieu, non homogène et non isotrope, peut-on imaginer une distribution d'indices optiques de façon que tous les rayons lumineux évitent totalement une zone de l'espace? En un mot, une cape d'invisibilité est-elle possible? C'est l'objet de l'électromagnétisme transformationnel.

Pour le trou de ver, les solutions, compatibles avec les équations de la relativité générale, requièrent des masses «classiques»,

concentrées et compactes, mais aussi une matière exotique dotée d'une énergie de masse négative. Problème, on n'en connaît aucune. La situation est tout autre en électromagnétisme: la cape d'invisibilité nécessite des matériaux à indice optique positif et d'autres à indice optique négatif. Cette fois, pas de difficulté théorique, car les métamatériaux sont précisément des matériaux à indice optique négatif, c'est-à-dire dans lesquels la réfraction ne suit pas les lois de Descartes.

De tels matériaux à indice optique négatif ont été théorisés à la fin des années 1960 par le physicien russe Victor Veselago. John Pendry, de l'Imperial College, à Londres, fut le premier à en fabriquer en 2006. Il s'agissait de structures périodiques formées d'anneaux et de fils métalliques. Les métamatériaux, dont la caractéristique essentielle est la périodicité, étaient nés.

Quels sont leurs avantages ?

D'abord, ils fonctionnent dans toutes les directions ! Par rapport à divers stratagèmes d'optique géométrique développés par des magiciens à partir de jeux de miroirs pour escamoter des parties d'une scène, c'est un progrès. Par contre, ils ne sont efficaces que pour une gamme étroite de longueurs d'onde, définie par la périodicité de la structure: ils sont assez monochromatiques. Par exemple, les premiers métamatériaux ont été conçus pour les microondes, et aucune autre onde électromagnétique. C'est quand même un peu embêtant... bien que dans le domaine des ondes acoustiques, des structures similaires métamatériaux ont fait la preuve de leur intérêt pour protéger un bâtiment des séismes.

En admettant que l'on puisse concevoir des métamatériaux à maille de plus en plus fine, et donc se rapprocher des longueurs d'onde de la lumière visible, une difficulté théorique subsistera: un objet invisible en bleu ne le sera plus dans le rouge. On ne peut pas vraiment parler d'invisibilité totale, même si le gain possible en discrétion et en furtivité présente des avantages.

Sont-ce toujours des invisibilités ?

Oui, mais d'un autre ordre, car outre l'invisibilité concrète et complète, on peut aussi évoquer l'invisibilité liée à un contraste

affaibli. Ainsi, le caméléon est difficilement visible, car il se fond dans le décor et diminue au maximum le contraste de son corps avec la jungle ambiante. Ici, émetteur et récepteur jouent à parts égales dans l'invisibilité. Celle liée au daltonisme ne relève quant à elle que du récepteur. En effet, les daltoniens, qui n'ont que deux types de photorécepteurs aux couleurs au lieu de trois chez les individus normaux, ne voient pas les chiffres colorés se détacher du fond d'une autre couleur sur les planches du test d'Ishihara (*voir la figure ci-dessus*). De même, un tigre, pourtant d'un orange soutenu, n'apparaîtra pas clairement aux yeux d'une proie, comme un cervidé, car ses yeux ne sont pas sensibles aux mêmes couleurs que nous. Ici, les rayures du fauve ajoutent à la confusion en créant des effets de moirés au milieu de la végétation.

Dernier exemple, le crotale peut difficilement chasser en plein jour dans les déserts arides qu'il habite, car ses capteurs sensibles aux infrarouges ne distinguent pas ceux (avec des longueurs d'onde de l'ordre de 10 micromètres) émis par les animaux à sang chaud qu'il traque de ceux renvoyés par le décor chauffé