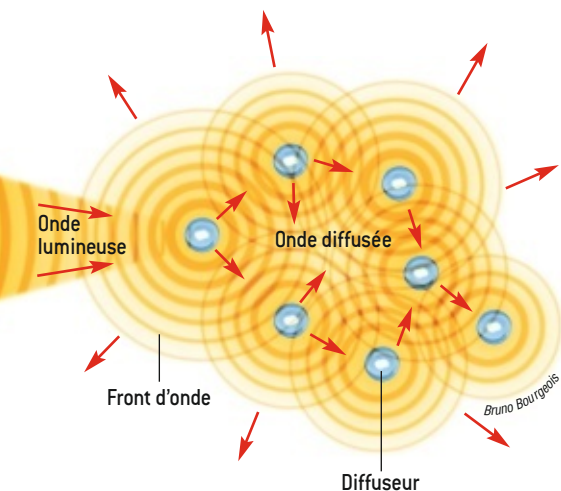


La diffusion de la lumière

✓ Une onde lumineuse monochromatique, dont l'énergie est portée par les photons, présente une période spatiale déterminée, la longueur d'onde λ , la distance séparant deux maximums successifs de l'onde. Quand une source émet de la lumière, la surface où tous les points de l'onde ont la même phase est le front d'onde, la « ligne de crête » de l'onde. Une onde lumineuse qui rencontre un obstacle, un « diffuseur » tel qu'une goutte d'eau, se voit réémise dans toutes les directions. Cette onde secondaire se propage jusqu'à rencontrer un autre diffuseur, et ainsi de suite. C'est la diffusion multiple.



L'AUTEUR



Sylvain GIGAN est maître de conférences à l'École supérieure de physique et de chimie industrielles de la ville de Paris (ESPCI ParisTech), et effectue ses recherches au Laboratoire d'optique de l'Institut Langevin *Ondes et images*.

s'agit d'une onde électromagnétique, portée par des photons et présentant une double périodicité, temporelle (la période T) et spatiale (la longueur d'onde λ).

La propagation d'une onde électromagnétique dans un milieu opaque non absorbant, aussi complexe soit-elle, n'est pas aléatoire, mais déterministe : un même faisceau (une onde de lumière monochromatique, de longueur d'onde unique) envoyé sur le même milieu donne exactement la même figure de diffusion, jusqu'aux détails microscopiques des interférences. Ensuite, les équations de propagation d'une onde dans un milieu diffusant (en l'absence d'absorption) ne changent pas par renversement du temps (changement de t en $-t$ dans les équations). On ne sait pas renverser le sens du temps, mais on dispose d'outils pour réémettre une onde « à l'envers ». La lumière revient alors sur ses pas, et comme la propagation est déterministe, le processus de diffusion est inversé. Ce sont ces concepts qui permettent de guider la lumière à travers les milieux opaques. Voyons donc comment retourner une onde et illustrons ces idées par quelques exemples.

En acoustique, en micro-ondes ou en hyperfréquence, on dispose de sources et de capteurs émettant et détectant un signal temporel quelconque ; c'est dans ces domaines que les concepts de renversement du temps et de contrôle de la propagation dans les milieux complexes ont d'abord été démontrés (voir l'article *La complexité* : un atout pour le retournement temporel des ondes dans ce numéro). En optique, les fréquences des ondes électromagnétiques (de l'ordre de 10^{15} hertz, soit un million de gigahertz) sont bien supérieures aux vitesses des détecteurs, même les plus rapides : la mesure directe du champ électromagnétique est impossible et l'on n'a accès qu'à l'intensité lumineuse moyenne.

Par ailleurs, les sources lumineuses – les lasers – ne sont pas modulables aisément ; on ne peut pas, comme en acoustique, choisir le signal à envoyer. En revanche, l'optique permet, dans le visible, d'observer les détails de la matière à l'échelle de la centaine de nanomètres de résolution (voir l'article *Lumière sur l'infiniment petit* dans ce numéro). Deux outils ont récemment permis d'étendre à l'optique les concepts de renversement du temps et d'imagerie en milieu diffusant développés en acoustique : les miroirs à conjugaison de phase et le contrôle de front d'onde.

Les miroirs à conjugaison de phase sont des dispositifs qui ne réfléchissent pas seulement une onde, comme le fait un miroir classique, mais la renvoient en changeant le signe de sa phase. Pour une onde monochromatique, ce changement correspond à un renversement temporel. Une onde divergente se réfléchissant sur un tel miroir devient convergente et « reconverge » sur sa source. En optique géométrique (l'approximation de l'optique qui s'appuie sur la notion de rayon lumineux, objet théorique représentant la direction de propagation de l'énergie d'une onde), un rayon lumineux incident sur un miroir à conjugaison de phase revient sur lui-même quel que soit son angle d'incidence (voir l'encadré page ci-contre).

Retour direct à l'envoyeur

Pour l'optique, c'est Juris Upatnieks, de l'Université du Michigan, qui a montré ce principe de conjugaison de phase en 1966 ; il a réussi à reformer une image à travers une surface de verre rugueuse par conjugaison de phase, grâce à un hologramme enregistré sur une plaque photographique (nous y revenons ci-après). Mais aucun dispositif passif, ni aucune géométrie simple de surface ne réalisent un tel effet.

En 1976, Amnon Yariv, à l'Institut californien de technologie, proposa le premier miroir à conjugaison de phase fondé sur un effet non linéaire, dit « à mélange de trois ondes ». Il montra comment un cristal illuminé par un laser peut, dans certaines conditions, se comporter comme un miroir à conjugaison de phase. Il lança ainsi l'utilisation de ces miroirs avec les lasers pour corriger les aberrations (le fait que les ondes issues d'une même source lumineuse ponctuelle ne convergent pas toutes en un même point après avoir traversé un milieu) et pour améliorer la qualité des images.

Cependant, l'application de ces miroirs aux milieux diffusants biologiques n'est intervenue que récemment. En 2008, l'équipe de Changhuey Yang, à l'Institut californien de technologie, a montré qu'un miroir à conjugaison de phase peut reformer une image à travers un milieu biologique, du blanc de poulet de moins d'un millimètre d'épaisseur. Elle a utilisé un processus de conjugaison de phase fondé sur des cristaux non linéaires particuliers, dits photoréfractifs.

Dans la première étape de cette expérience, un faisceau de lumière laser est

envoyé à travers le milieu diffusant. La lumière diffusée transmise illumine le cristal, où elle se superpose avec un autre faisceau issu du même laser. Le cristal, comme une plaque photographique, enregistre le champ lumineux résultant des interférences, c'est-à-dire un hologramme. Dans une deuxième étape, les scientifiques « relisent » cet hologramme à l'aide d'un laser, et renvoient vers le milieu le champ conjugué en phase ; ce dernier repasse alors de façon contrôlée à travers le milieu et se focalise, pour être « vu ». Ainsi, une image est reformée après avoir effectué un aller-retour à travers un tissu biologique.

Cette première expérience exploite le déterminisme et la stabilité par renversement du temps du phénomène de diffusion, et la faculté qu'a un miroir à conjugaison de phase de retourner une onde. Mais ces miroirs ne sont pas la panacée : ils ne peuvent réaliser qu'une seule tâche, le retournement temporel du champ, et sont peu flexibles, en particulier pour l'imagerie où l'on veut parfois aller au-delà du retournement temporel dans le contrôle de l'onde.

Or, parallèlement à cette approche de conjugaison de phase, l'équipe d'Allard Mosk, à l'Université de Twente aux Pays-Bas, concevait une autre méthode : le contrôle actif des ondes grâce aux modu-

lateurs spatiaux (de phase). Ces dispositifs associent le retournement temporel avec le contrôle du front d'onde, un front d'onde étant une surface formée de points où la phase de l'onde a la même valeur.

Aujourd'hui, ce matériel permet aux scientifiques de manipuler efficacement la lumière. Une onde plane (dont le front d'onde est plan) se réfléchissant sur un miroir plan reste une onde plane. Un modulateur spatial se comporte comme une matrice de un million de petits miroirs environ (des pixels, issus des technologies à cristaux liquides), dont on peut changer par ordinateur la réflectivité ou la position. Il permet ainsi de

LE RETOURNEMENT TEMPOREL DE LA LUMIÈRE DIFFUSÉE

Quand on regarde un objet, par exemple une orange, à travers un milieu diffusant, tel un tissu biologique (qui n'absorbe presque pas dans le rouge ni l'infrarouge), on ne voit plus rien (a, l'image est projetée sur un écran). Les scientifiques tentent de voir à travers ces milieux

opaques en se fondant sur deux grands principes : la propagation de la lumière dans ces milieux est déterministe et prévisible, et elle peut être retournée temporellement.

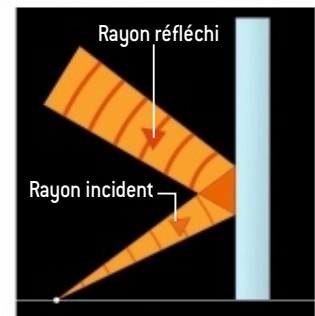
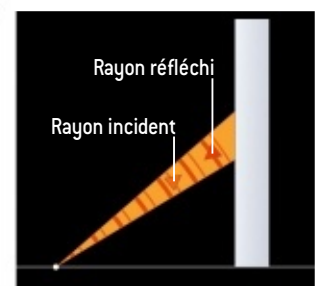
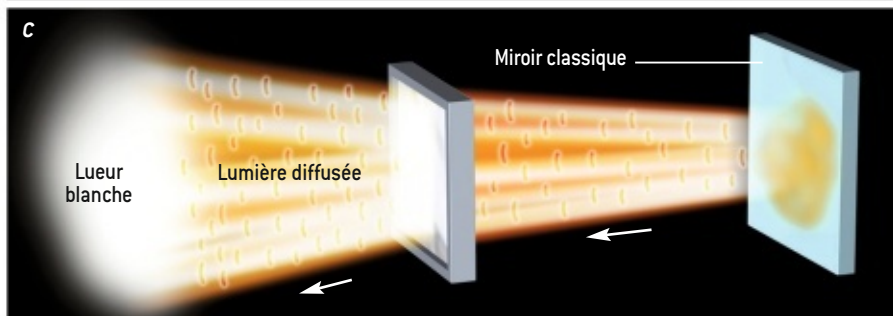
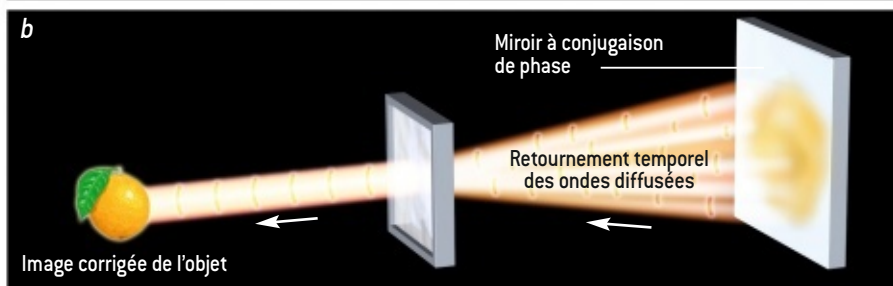
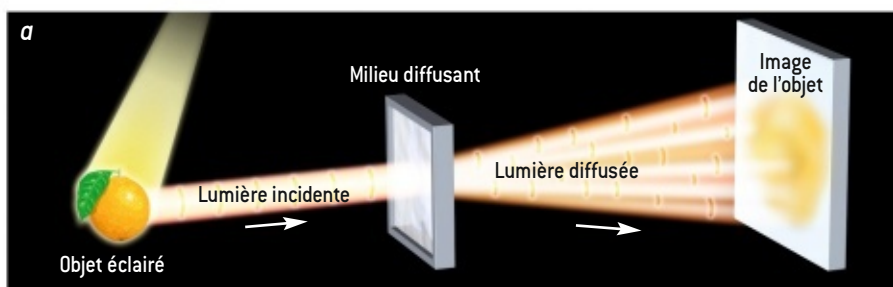
Pour ce faire, on peut utiliser un miroir à conjugaison de phase, qui réfléchit une onde lumineuse

en changeant le signe de sa phase (b). Un rayon incident sur ce miroir revient sur lui-même, comme si on inversait le temps pour la lumière (b, à droite). En plaçant ce miroir après le milieu diffusant, on peut renvoyer la lumière multi-diffusée de l'image transmise et re-

former l'image de départ, par retournement temporel des ondes lumineuses diffusées, en « annulant » la diffusion multiple de l'aller.

Un miroir classique réfléchirait les ondes sans les inverser, de sorte qu'elles seraient à nouveau diffusées de multiples fois en traversant le milieu diffusant : l'image serait encore plus dégradée (c). Rappelons qu'un rayon incident sur ce miroir est réémis avec un angle symétrique à l'angle d'incidence (c, à droite).

Les chercheurs sont donc capables de corriger une lumière multi-diffusée et de former l'image d'un objet à travers un milieu opaque.



Bruno Bourgeois