

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.

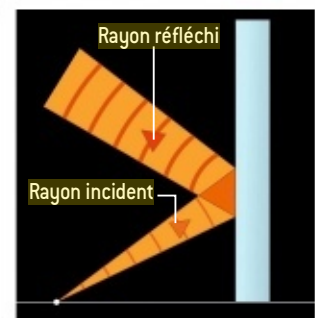
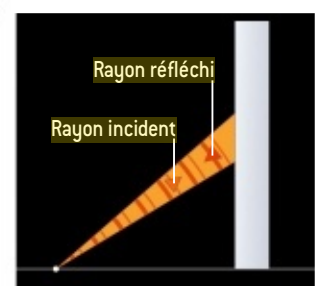
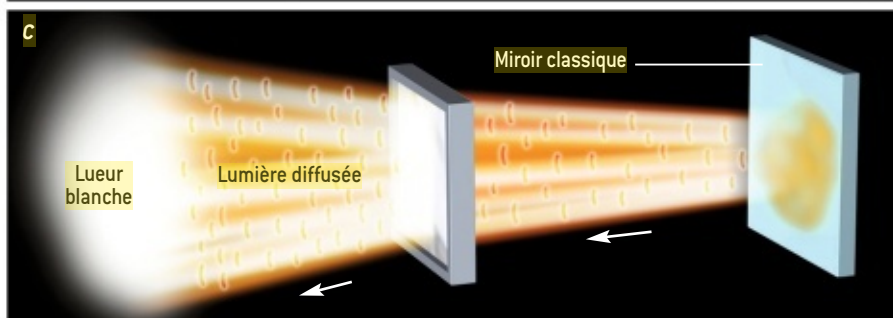
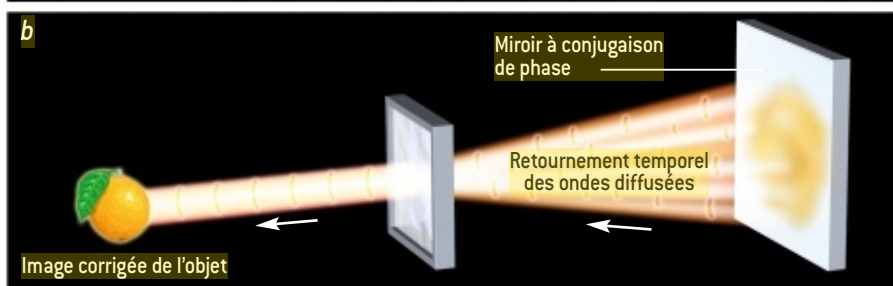
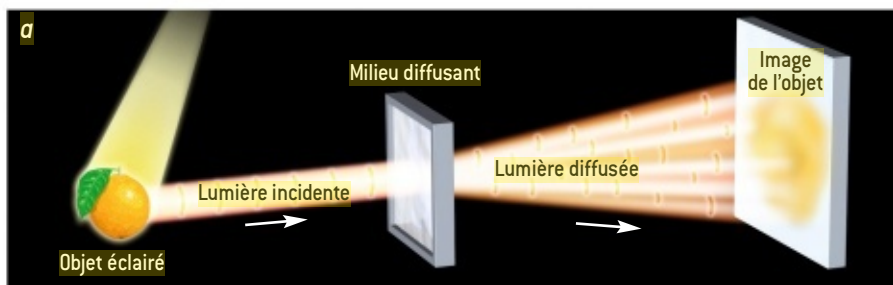
Pour ce faire, on peut utiliser un miroir à conjugaison de phase, qui réfléchit une onde lumineuse

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-

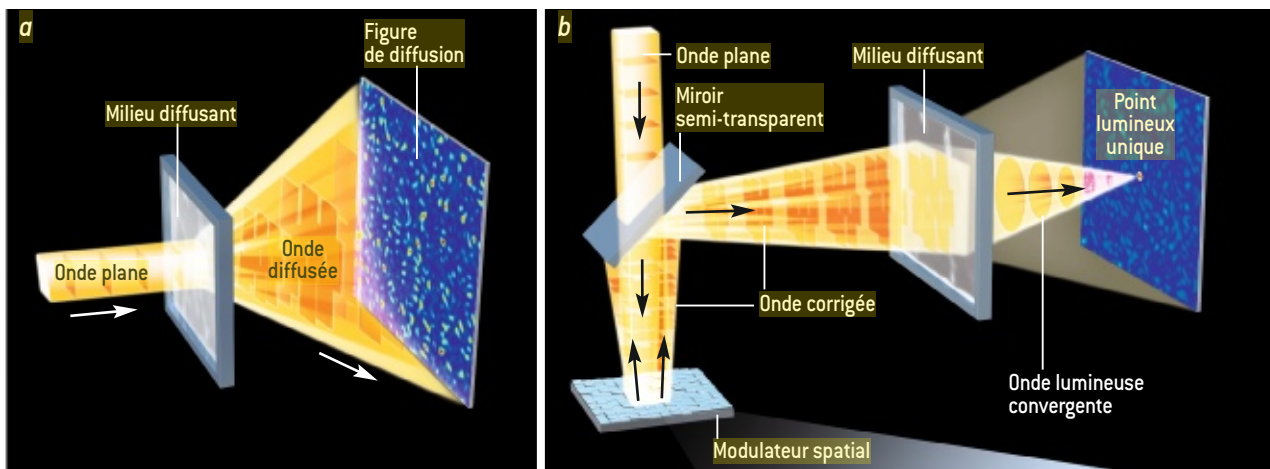
former l'image de départ, par retournement temporel des ondes lumineuses diffusées, en « annulant » la diffusion multiple de l'aller.

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).

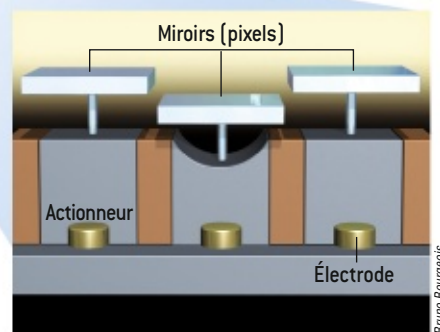
Les chercheurs sont donc capables de corriger une lumière multi-diffusée et de former l'image d'un objet à travers un milieu opaque.



Bruno Bourgeois



2. LE CONTRÔLE D'UNE LUMIÈRE MULTIDIFFUSÉE peut se faire selon le principe imaginé par A. Mosk et ses collègues, en réalisant une conjugaison de phase « à l'envers ». Ils ont envoyé une onde plane sur un milieu très diffusant et ont obtenu une figure de diffusion qui présente des grains brillants et sombres dus aux interférences [a]. Puis ils ont utilisé un modulateur de phase pour optimiser et corriger l'onde incidente afin d'obtenir, de l'autre côté du milieu diffusant, un point focalisé très brillant. Le modulateur spatial contient environ un million de petits miroirs (les pixels), contrôlés par ordinateur, qui modifient à volonté la phase de l'onde. Il façonne ainsi la phase et le front d'onde (sa forme) d'une onde qui se réfléchit sur lui [voir la cartouche]. Ainsi, en optimisant chaque pixel pour trouver le front d'onde incident idéal qui focaliserait en un point unique après sa traversée du milieu, les scientifiques ont pu compenser la diffusion. L'onde corrigée par le modulateur de phase traverse alors le milieu diffusant et donne une interférence constructive en un point unique, produisant un point jusqu'à 1 000 fois plus brillant que les autres [b].



Bruno Bourgeois

✓ BIBLIOGRAPHIE

T. Cizmar et al., In situ wavefront correction and its application to micromanipulation, *Nature Photonics*, vol. 4, pp. 388-394, 2010.

S. M. Popoff et al., Measuring the transmission matrix in optics: an approach to the study and control of light propagation in disordered media, *Physical Review Letters*, vol. 104, article 100601, 2010.

I. M. Vellekoop et al., Exploiting disorder for perfect focusing, *Nature Photonics*, vol. 4, pp. 320-322, 2010.

Z. Yaqoob et al., Optical phase conjugation for turbidity suppression in biological samples, *Nature Photonics*, vol. 2, pp. 110-115, 2008.

J. Hardy, L'optique adaptative, *Pour la Science*, n° 202, août 1994.

M. D. Levenson, High-resolution imaging by wave-front conjugation, *Optics Letters*, vol. 5, pp. 182-184, 1980.

façonner la composante spatiale – la phase – d'une onde.

Les miroirs déformables, utilisés en astronomie pour corriger les aberrations introduites par l'atmosphère, font de même, mais ce sont des dispositifs encombrants ayant un nombre limité de pixels (une centaine pour les plus performants). Les modulateurs spatiaux, quant à eux, peuvent avoir des millions de pixels, ce qui est crucial pour un phénomène aussi complexe que la diffusion multiple.

Un dogme tombe : on contrôle la lumière diffusée

A. Mosk se posa la question suivante : ne pourrait-on pas faire l'équivalent de la conjugaison de phase, mais à l'envers, c'est-à-dire trouver le front d'onde incident qui traverse un milieu diffusant et se refocalise au point voulu ? Cette approche, simple et révolutionnaire, se révéla féconde. Le front d'onde de la lumière à envoyer étant inconnu, il utilisa une approche itérative : en jouant sur chaque pixel d'entrée du modulateur spatial pour trouver la valeur optimisant l'intensité lumineuse au point voulu de l'autre côté du milieu opaque, il

obtint un point 1 000 fois plus brillant que son voisinage (voir la figure 2). Comme en optique adaptative, il avait en pratique « corrigé » le front d'onde et récupéré une tache de diffraction parfaite, mais en traversant un milieu opaque.

Les travaux presque simultanés des équipes de C. Yang et de A. Mosk firent grand bruit dans la communauté de l'optique : contrairement à l'opinion communément admise qu'on ne pouvait rien faire de la lumière diffusée et qu'on serait toujours limité aux couches superficielles des milieux diffusants, ces deux expériences montraient que la lumière diffusée pouvait être manipulée et exploitée.

À l'Institut Langevin, à Paris, nous avons poussé le concept plus loin. Nous avons déterminé la matrice de transmission lumineuse d'un milieu opaque « idéal », une couche de peinture blanche. Ce milieu diffusant est complexe, mais linéaire, de sorte que l'on peut caractériser son comportement optique sous la forme d'une matrice (un tableau de nombres) de très grande taille, sa matrice de transmission. Pour la mesurer, nous avons envoyé une série de fronts d'onde connus sur le milieu, grâce à un modulateur spatial. Simultanément, nous mesurions le résultat de la transmission avec une