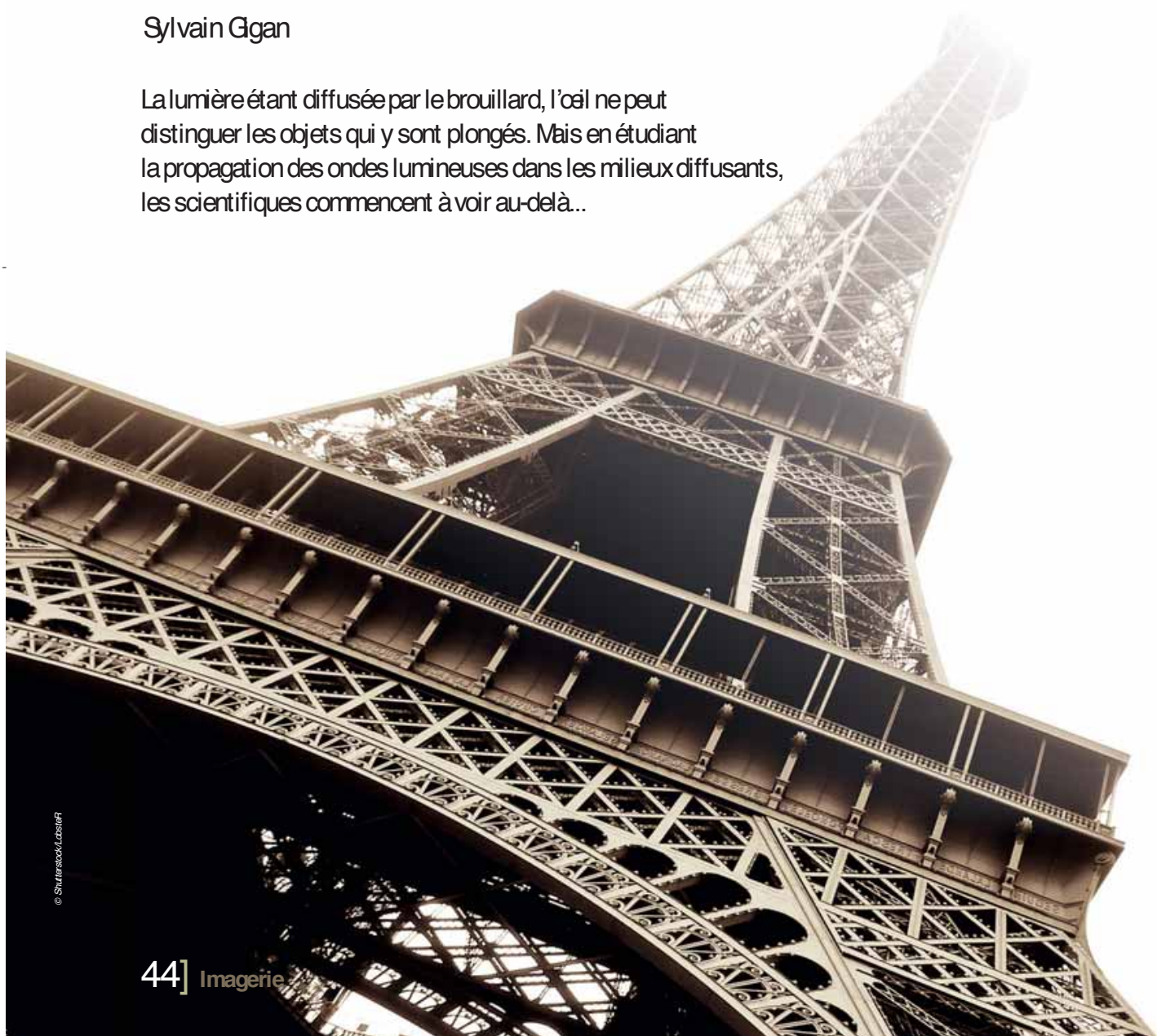


Voir à travers le brouillard

Sylvain Ggan

La lumière étant diffusée par le brouillard, l'œil ne peut distinguer les objets qui y sont plongés. Mais en étudiant la propagation des ondes lumineuses dans les milieux diffusants, les scientifiques commencent à voir au-delà...



Quand le brouillard se forme, les objets échappent peu à peu au regard et sont d'autant plus noyés dans une blancheur ambiante qu'ils y sont enfouis. La diffusion de la lumière est responsable de ce phénomène.

Le brouillard est une suspension de gouttelettes d'eau dans l'air. Ces gouttelettes dévient la lumière : on dit qu'elles la diffusent. La lumière venant des objets proches a peu de chances de rencontrer une gouttelette sur son trajet, de sorte que l'on peut voir distinctement ces objets. Cette partie de la lumière qui n'est pas déviée, même dans un milieu très « diffusant », est la lumière balistique. Pour les objets éloignés, la probabilité que la lumière ne soit pas déviée diminue jusqu'à devenir quasi nulle ; la lumière est alors diffusée de nombreuses fois, formant une lueur blanche (voir la figure 1). L'œil ou n'importe quel appareil d'imagerie classique, tel un appareil photographique, sont incapables de voir l'objet ou de localiser la source de lumière.

La diffusion de la lumière est omniprésente

La diffusion de la lumière est omniprésente dans la nature ; le brouillard, mais aussi la neige, le papier, le lait ou une couche de peinture blanche sont des exemples de milieux diffusants. Ces matériaux sont blancs, car ils dévient la lumière, mais ne l'absorbent pas.

Les tissus biologiques, par exemple la peau, sont aussi diffusants, car ils ont une structure hétérogène à toutes les échelles. Chacun peut s'en rendre compte en plaçant une lampe de poche derrière ses doigts : la lumière n'est pas complètement bloquée et une mince couche de tissu laisse passer une lueur. C'est de la lumière diffusée. Cette lumière est de couleur rouge, car le sang absorbe les longueurs d'onde proches du bleu, laissant passer les composantes rouges de la lumière. Les tissus biologiques représentent un défi pour l'imagerie et fascinent les scientifiques ; ces derniers mettent tout en œuvre pour « voir » à travers et au sein de ces milieux très diffusants.

Si la compréhension des mécanismes de diffusion est récente, les peintres traduisent le phénomène intuitivement depuis longtemps, à l'instar de Léonard de Vinci dans ses paysages embrumés, de Rubens dans son rendu des teintes de chair ou encore

de Georges de La Tour dans sa façon de représenter la bougie à travers une main d'enfant. Non seulement ils reproduisent parfaitement les effets de diffusion de la lumière, mais ils les mettent aussi à profit, jouant sur l'épaisseur et l'empilement des couches de peinture pour moduler cette diffusion et obtenir l'effet artistique voulu.

Cependant, la diffusion de la lumière rend l'imagerie classique, avec un microscope optique par exemple, inutilisable. Certaines techniques sélectionnent la partie balistique de la lumière et récupèrent ainsi des images en profondeur. C'est le cas des méthodes de microscopie confocale et non linéaires, ou de tomographie par cohérence optique. Mais la part de lumière balistique diminue de façon exponentielle lorsqu'on s'enfonce dans le milieu : on ne détecte rapidement que de la lumière qui a été diffusée de nombreuses fois et ces techniques sont limitées aux faibles profondeurs.

Les milieux diffusants en volume sont dits opaques (mais non absorbants) ou translucides. Ils laissent passer la lumière, mais pas les images. Nous allons voir qu'aujourd'hui deux techniques permettent aux scientifiques de focaliser la lumière à travers ces milieux opaques. Elles ouvrent de nouvelles perspectives pour la recherche et l'imagerie des tissus biologiques.

Le calcul exact de la propagation de la lumière dans un milieu opaque est impossible en pratique : il nécessiterait de connaître parfaitement la taille et la position des diffuseurs (par exemple, la forme et la position de toutes les gouttelettes d'eau composant le brouillard). De même, on ne peut pas connaître exactement la position et la vitesse de chaque molécule d'un gaz. Toutefois, dans les gaz, la thermodynamique nous permet d'extraire des grandeurs pertinentes telles que la température et la pression. En optique, on peut également comprendre macroscopiquement le transport de la lumière dans les milieux opaques. Ce phénomène de transport, qui a le même comportement et les mêmes équations que le transport de la chaleur, nous permet de prédire un certain nombre de paramètres, telle la transmission globale de lumière, mais l'information sur le comportement microscopique est perdue.

Néanmoins, la lumière, même multi-diffusée, reste utilisable en imagerie pour deux raisons que nous allons détailler : elle se propage de façon déterministe et peut être « temporellement » retournée. Le contrôle de la lumière est lié au fait qu'il

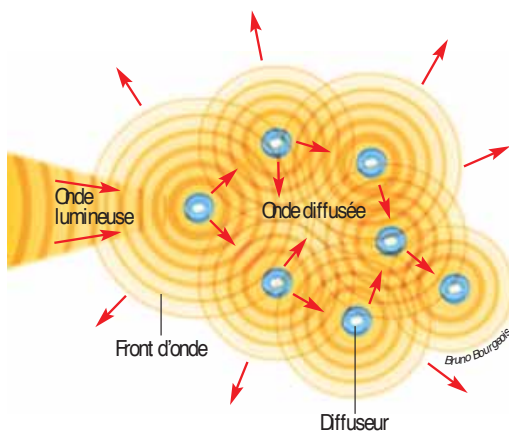
L'ESSENTIEL

- ✓ La lumière est déviée de multiples fois à travers un milieu opaque. On ne peut donc pas voir l'objet l'ayant émise ou transmise.
- ✓ La propagation de la lumière diffusée est déterministe et peut être inversée temporellement.
- ✓ Les miroirs à conjugaison de phase renvoient une onde lumineuse à l'identique, mais renversée dans le temps ; ils permettent de reconstruire l'image d'un objet après diffusion.
- ✓ Avec les techniques de contrôle actif du front d'onde, les scientifiques réussissent à focaliser la lumière diffusée et espèrent ainsi voir à travers un tissu biologique, et même à l'intérieur de ce dernier.

1. DANS LE BROUILLARD, la lumière renvoyée par la tour Eiffel est diffusée par les gouttelettes d'eau en suspension. Dans la partie haute de la tour, on ne voit qu'une lueur blanche, car toute la lumière a été diffusée de très nombreuses fois. A proximité de la base de l'édifice, une partie de la lumière, dite balistique, est peu déviée, car elle traverse une épaisseur de brouillard moindre : les pieds du monument sont donc visibles.

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 GGAN est maître de conférences à l'École supérieure de physique et de chimie industrielles de la ville de Paris (ESPC Paris Tech), 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.

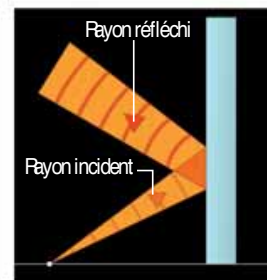
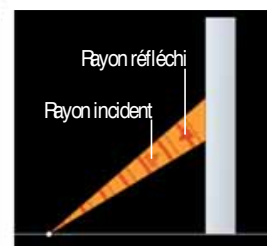
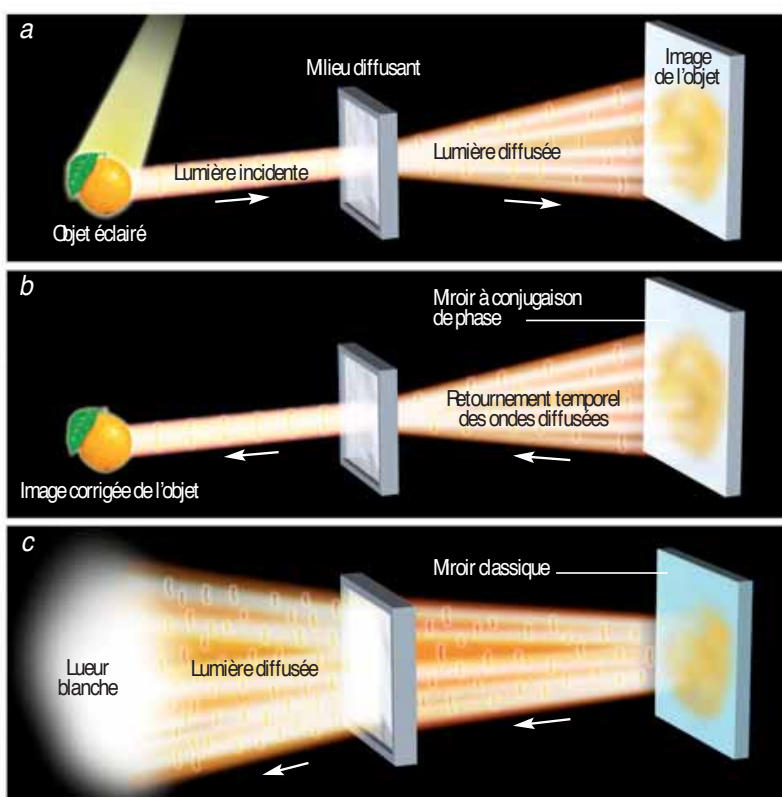
Pour ce faire, on peut utiliser un miroir à conjugaison de phase, qui réfléchit une onde lumineuse

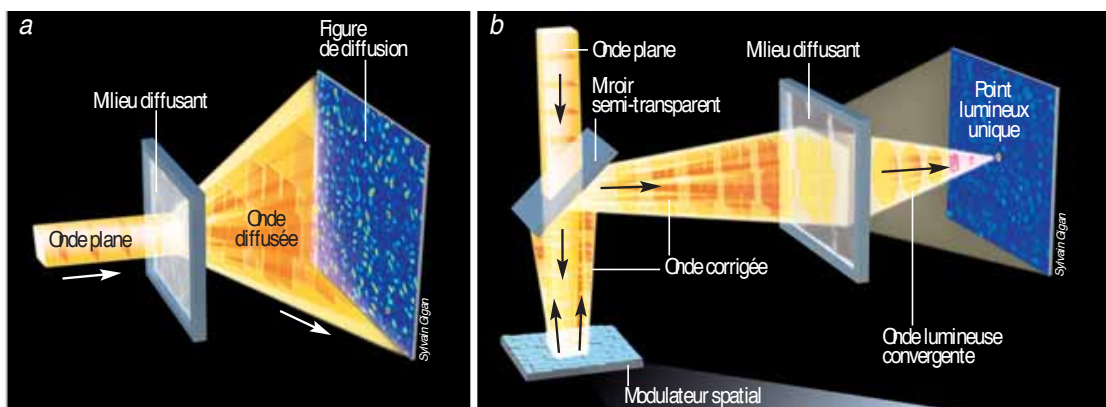
en changeant le signe de sa phase (b). Un rayon incident sur ce miroir revient sur lui-même, comme si on inversait le temps pour la lumière (b, à droite). En plaçant ce miroir après le milieu diffusant, on peut renvoyer la lumière multi-diffusée de l'image transmise et re-

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

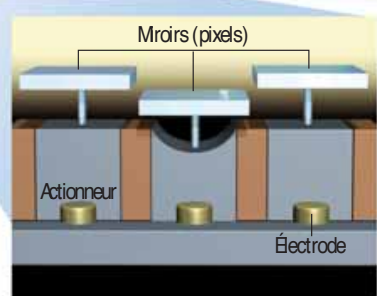
Un miroir d'acier réfléchirait les ondes sans les inverser, de sorte qu'elles seraient à nouveau diffusées de multiples fois en traversant le milieu diffusant : l'image serait encore plus dégradée (c). Rappelons qu'un rayon incident sur ce miroir est réémis avec un angle symétrique à l'angle d'incidence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





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 le 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).



✓ BIBLIOGRAPHIE

T. Gzmar *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 mesurons le résultat de la transmission avec une

caméra CCD; nous avons ainsi obtenu la matrice de transmission du milieu entre 1 024 pixels du modulateur et 1 024 pixels de la caméra. Il faut quelques minutes pour obtenir cette matrice, mais une fois cette dernière connue, nous sommes capables de focaliser presque instantanément une onde lumineuse à travers le milieu sur un ou plusieurs pixels de la caméra, comme en conjugaison de phase.

L'avenir de l'imagerie : voir dans les tissus

Peut-on aller au-delà de la conjugaison de phase et reconstruire une image? Et, si c'est le cas, comment? Il suffit d'encoder une image avec le modulateur spatial, comme si la lumière éclairait un objet. La lumière diffuse alors dans le milieu et forme une tache de diffusion. Connaissant la matrice de transmission du milieu, nous avons inversé numériquement la diffusion et retrouvé l'image de départ avec une précision de 95 pour cent. En mesurant la matrice de transmission d'un milieu, qui détermine comment la lumière traverse le milieu, nous pouvons donc non seulement

focaliser, mais aussi transmettre des images à travers les milieux diffusants.

De nombreux groupes, en Europe, aux États-Unis et en Corée, se sont engouffrés dans la brèche et, depuis trois ans, des progrès sont réalisés à un rythme soutenu. Par exemple, le contrôle de front d'onde a été appliqué avec succès aux pinces optiques (qui permettent de manipuler de petits objets, par exemple des cellules), à la focalisation dans les milieux diffusants et à l'imagerie de fluorescence avec une résolution inférieure à 100 nanomètres. Récemment, trois équipes, en Hollande, puis en Israël et en France, ont montré qu'on pouvait également contrôler temporairement une impulsion femtoseconde à travers un milieu diffusant, ajoutant la composante temporelle à la composante spatiale (voir l'article *Façonner le milieu pour contrôler la matière dans ce numéro*).

Quelles sont les prochaines étapes? Pour l'imagerie des milieux biologiques, le facteur crucial est l'accélération de la technique, l'objectif étant de trouver le front d'onde optimal plus vite que le milieu ne change. Toutes les équipes se cantonnent pour l'instant à des milieux modèles, telle une cou-

che de peinture blanche, très diffusante, mais surtout très stable pendant des dizaines de minutes. Quelques techniques arrivent à focaliser la lumière en une seconde environ, mais il faudra encore gagner un facteur 1 000 si l'on veut utiliser cette méthode dans un milieu biologique vivant (ces derniers étant considérés stables sur une milliseconde environ). Des matrices de micromiroirs actionnés mécaniquement ne sont pas aussi développées que les systèmes à cristaux liquides, mais ont le potentiel pour atteindre ces vitesses.

L'autre défi pour l'imagerie est d'aller voir à l'intérieur des tissus biologiques, et pas seulement à travers. C'est en théorie et en pratique possible, mais la technique permettant d'obtenir une image en profondeur et pas seulement à travers un milieu opaque n'est pas encore au point. Peut-être utilisera-t-on une bille fluorescente, des ultrasons, des boîtes quantiques... Des expériences préliminaires explorent déjà ces pistes. Les concepts pour contrôler la lumière dans les milieux complexes sont validés et les enjeux sont considérables; gageons que nous verrons des progrès rapides dans les prochaines années. ■