

sance instantanée sur la section du faisceau) de l'ordre du térawatt (10^{12} watts) par centimètre carré.

En imagerie biologique avec des intensités plus faibles, cette concentration d'énergie peut servir à reconstruire une image en volume d'un tissu épais (constitué de plusieurs couches de cellules, tels les os ou les muscles) et à en distinguer les différents constituants.

La technique de microscopie multiphotonique, développée dans les années 1980, utilise des lasers femtosecondes. Elle est fondée sur le phénomène d'absorption à deux photons, qui repose sur la réponse non linéaire des tissus biologiques (voir l'encadré page ci-contre). Les impulsions laser sont focalisées dans un petit volume. La résolution en profondeur est obtenue en apportant une énergie importante, qui entraîne une réponse non linéaire (émission d'une lumière de fréquence différente) du volume de tissu observé. Il ne reste plus alors qu'à balayer ce point focal pour reconstruire l'image de l'objet.

Depuis peu, les biologistes combinent le façonnage d'impulsions à la technique de microscopie multiphotonique. En effet, le façonnage maximise la réponse non linéaire d'un type de molécule plutôt qu'un autre, ce qui accroît la sélectivité et la spécificité des signaux observés, et rend les images plus riches en informations. Ainsi, Manuel Joffre et Emmanuel Beaurepaire, du Laboratoire Optique et biosciences à Palaiseau, ont visualisé simultanément deux protéines différentes dans un embryon de mouche, à l'aide d'impulsions laser façonnées (voir la figure 2). En superposant les deux images obtenues, ils ont reconstruit une image unique contenant les deux marquages différenciés.

Naissance de l'attophysique

Si la microscopie multiphotonique s'appuie sur des effets non linéaires d'ordre 2 ou 3, les lasers femtosecondes ont aussi permis d'atteindre le régime des harmoniques élevées, d'ordre n . Suivant l'approche corpusculaire de la lumière, un milieu absorbant n photons à la fréquence ν émet de la lumière à la fréquence $n\nu$.

Ainsi, en 1988, Anne l'Huillier et ses collègues, au CEA de Saclay, ont excité des atomes de gaz inertes tels que le néon et l'argon à l'aide d'impulsions femtosecon-

des. Ils ont observé l'émission de lumière à des fréquences dites harmoniques, multiples de la fréquence laser initiale.

L'utilisation du façonnage a participé au contrôle de l'émission des harmoniques. Aujourd'hui, les chercheurs sont capables d'engendrer un grand nombre d'harmoniques en même temps, ce qui crée une impulsion laser avec un spectre extrêmement large. Cela a permis d'envisager l'obtention d'impulsions attosecondes.

Une décennie de travaux a été nécessaire pour contrôler ces processus et mettre au point des dispositifs permettant de mesurer la durée d'impulsions aussi courtes. Aujourd'hui, des impulsions qui durent moins d'une centaine d'attosecondes ont par exemple permis de suivre en temps réel l'évolution d'un électron dans un atome ou une molécule.

En une trentaine d'années, les lasers femtosecondes ont conquis de nombreux laboratoires, permettant à la fois d'observer des phénomènes de plus en plus brefs et d'atteindre des densités de puissance élevées.

Le façonnage des impulsions laser, maintenant bien maîtrisé, permet de produire des impulsions très brèves et très intenses, de contrôler des réactions chimiques, d'observer des effets fondamentaux de l'interaction lumière-matière fondés sur des interférences quantiques, mais aussi d'améliorer grandement la sélectivité et la spécificité de l'imagerie biologique. Enfin, l'association du contrôle des impulsions courtes et des processus hautement non linéaires a donné naissance à l'« attophysique », la science des impulsions attosecondes.

D'autres applications se développent dans le domaine du codage de l'information. Des séquences d'impulsions façonnées ont été utilisées pour « imprimer » une information sur des atomes. En parallèle du façonnage dans le domaine fréquentiel, de nombreux travaux ont été faits dans le domaine spatial.

Combiné avec le contrôle spatial des impulsions, il permet de focaliser des impulsions dans des milieux très diffusants (voir l'article Voir à travers le brouillard dans ce numéro), ou d'atteindre des puissances laser inégalées. Enfin, avec le développement de la nanoplasmonique et des techniques d'imagerie électronique, il ouvre la voie au contrôle de la matière à l'échelle nanométrique. Le façonnage d'impulsions a encore un bel avenir. ■

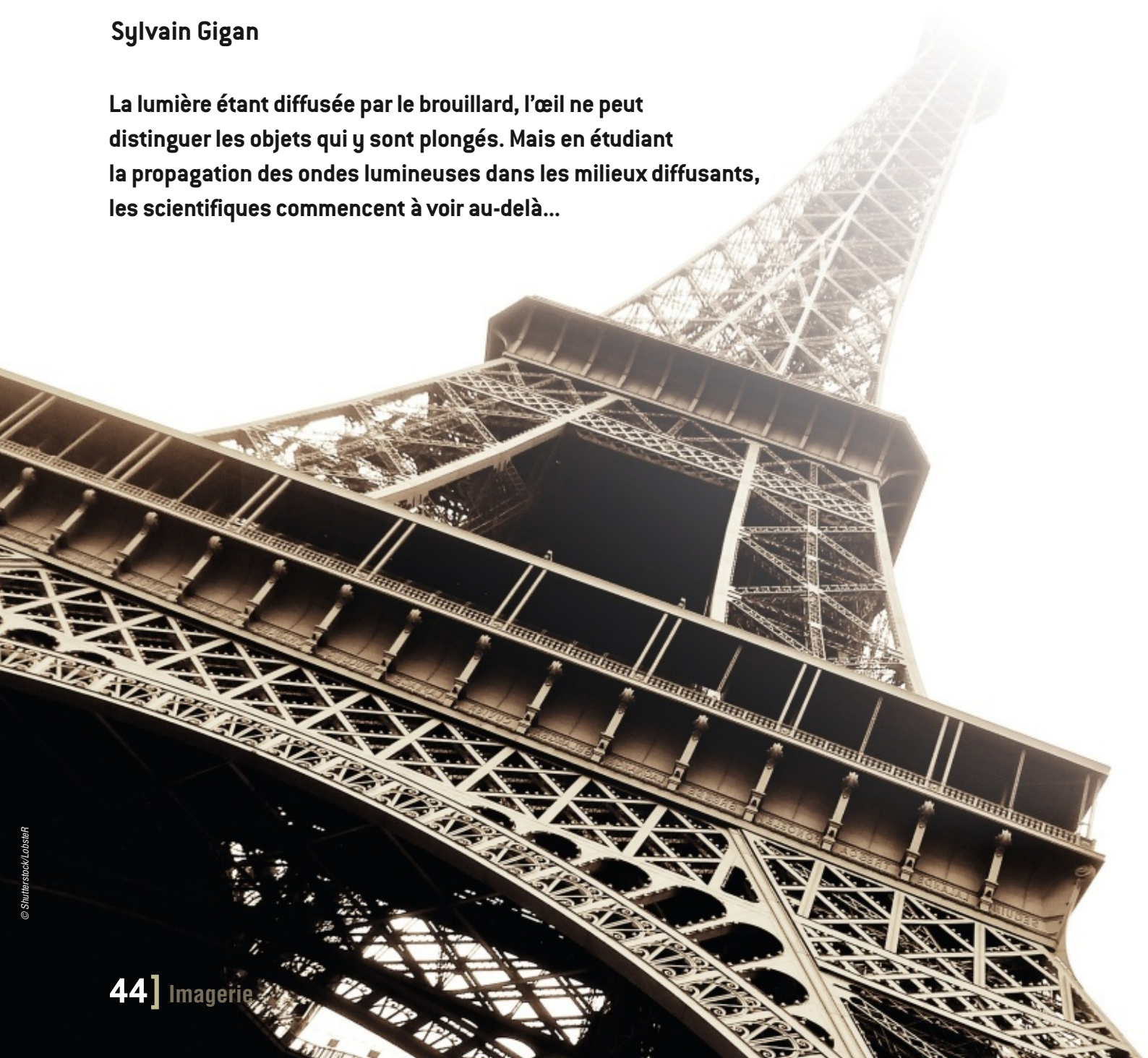


2. EMBRYON DE DROSOPHILE en cours de développement observé en microscopie biphotonique avec des impulsions façonnées. L'embryon est marqué avec la protéine GFP (Green Fluorescent Protein) qui repère les noyaux cellulaires, mais présente aussi une fluorescence naturelle bleue dans les réserves vitellines internes. Des impulsions façonnées de façon à exciter sélectivement par absorption à deux photons soit les fluorophores bleus, soit les fluorophores verts, sont dirigées vers l'embryon. Deux images, enregistrées simultanément avec les deux formes d'impulsions, puis combinées, révèlent la distribution de la fluorescence naturelle des réserves vitellines en bleu et de celle de la GFP dans les noyaux en vert.

Voir à travers le brouillard

Sylvain Gigan

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

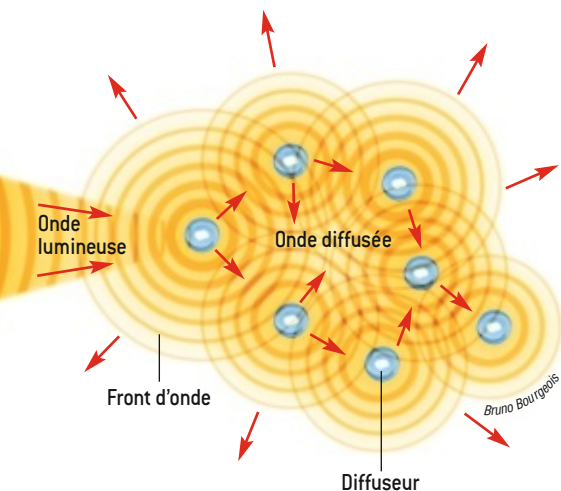
L'ESSENTIEL

- ✓ 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. À 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 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.

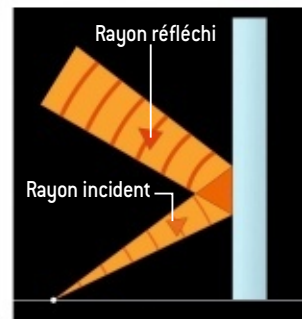
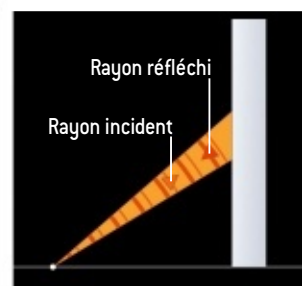
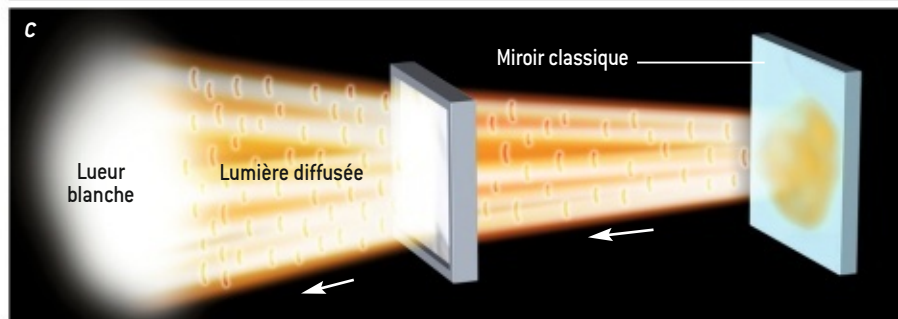
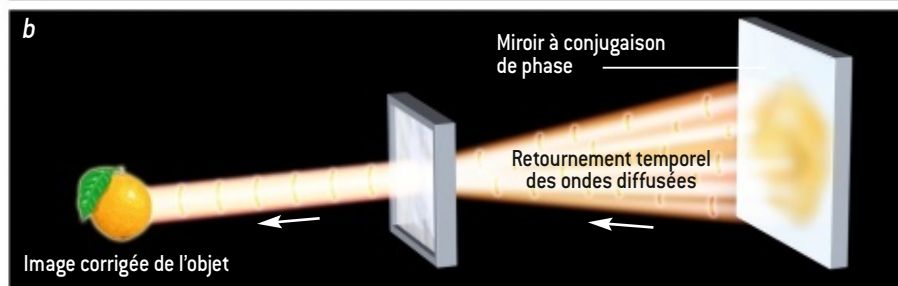
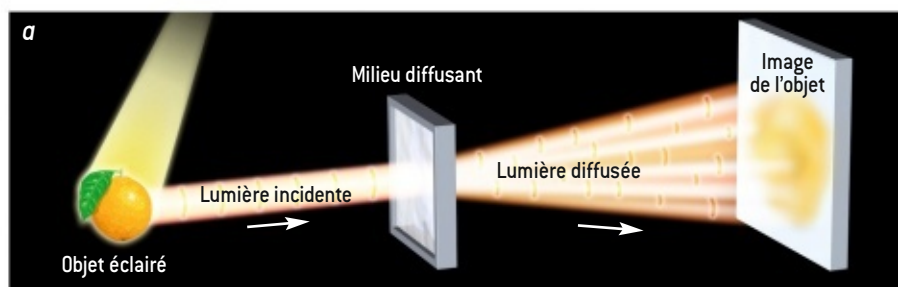
Pour ce faire, on peut utiliser un miroir à conjugaison de phase, qui réfléchit une onde lumineuse

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-

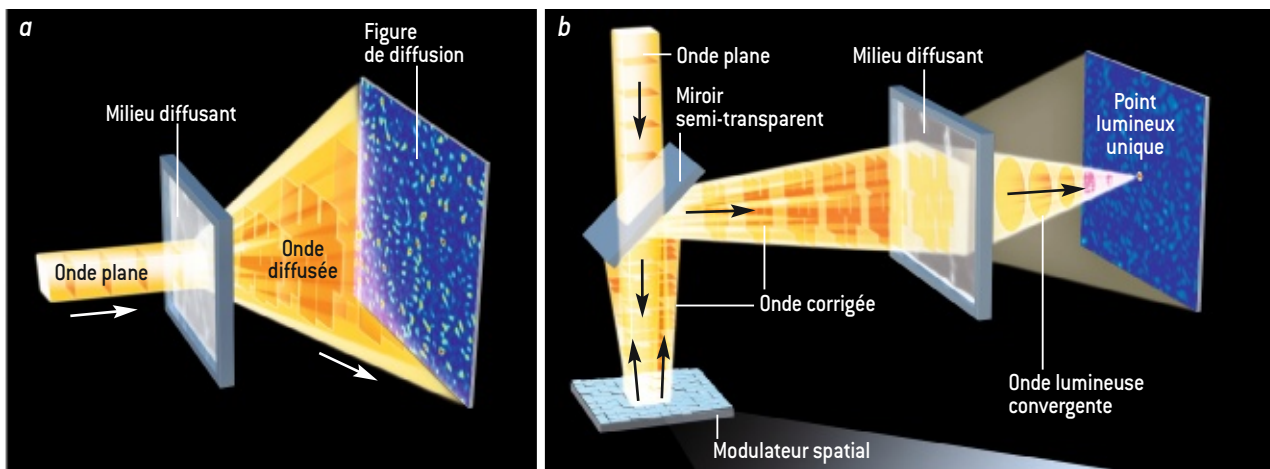
former l'image de départ, par retournement temporel des ondes lumineuses diffusées, en « annulant » la diffusion multiple de l'aller.

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).

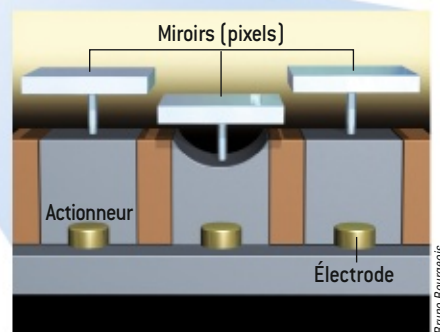
Les chercheurs sont donc capables de corriger une lumière multi-diffusée et de former l'image d'un objet à travers un milieu opaque.



Bruno Bourgeois



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

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 temporellement une impulsion femtoseconde à travers un milieu diffusant, ajoutant la composante temporelle à la composante spatiale (voir l'article Façonner la lumière 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. ■



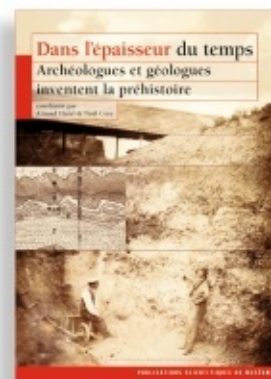
Muséum national d'Histoire naturelle

Dans l'épaisseur du temps

Archéologues et géologues
inventent la préhistoire

Arnaud Hurel & Noël Croye
coordinateurs

C'est autour de l'année 1859 que la préhistoire s'affirme, à l'échelle de l'Europe, comme un domaine de recherche nouveau et fécond. Les grandes disciplines des sciences naturelles (géologie, paléontologie...) et des sciences de l'homme (archéologie, histoire, philologie...) participent à la création de cette nouvelle science à travers les débats fondateurs portant sur l'ancienneté de l'homme et sur son origine animale. En une décennie, c'est toute la conception des origines de l'humanité qui s'en trouve bouleversée de façon profonde et durable au moment même où se diffuse la théorie darwinienne de l'évolution. Cet ouvrage propose une relecture de cette période primordiale de l'histoire de l'archéologie préhistorique. Pour cela, il s'intéresse non seulement aux découvertes et aux idées qui ont nourri la connaissance mais également aux acteurs (chercheurs officiels et amateurs) et aux institutions (congrès, revues, sociétés savantes, musées, Muséum...) qui ont porté son développement et son rayonnement. Cette étude se place en continuité avec les démarches actuelles de la recherche sur les premières industries du Nord de la France et de la muséologie de la préhistoire.



ISBN 978-2-85653-666-7
170 x 240 mm • 120 fig. quadri
442 p. • 35 € TTC • mai 2011

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES DU MUSÉUM

Commandes et renseignements :
Muséum national d'Histoire naturelle
Publications Scientifiques

Case postale 41 • 57 rue Cuvier • 75231 Paris cedex 05
Tél. : 01 40 79 48 05 • Fax : 01 40 79 38 40
diff.pub@mnhn.fr • <http://www.mnhn.fr/pubsci>

Histoire des sciences

Lumière sur l'infiniment PETIT

Rémi Carminati et Yannick De Wilde

Des ondes lumineuses évanescentes, qui disparaissent très rapidement, permettent d'observer un objet avec une précision de quelques nanomètres. D'autres techniques de super-résolution utilisent par exemple la fluorescence.

L'œil humain est en général capable de détecter un détail d'environ un millimètre sur un objet situé à trois mètres de distance. C'est la limite de résolution de l'œil, à savoir la distance minimale qui doit exister entre deux points proches pour qu'ils soient discernables. La loupe ou le microscope classique ont des pouvoirs de résolution supérieurs, mais ils ne permettent pas de distinguer des détails de l'ordre du nanomètre. Pourtant, les nanotechnologies et l'imagerie du vivant imposent aujourd'hui d'atteindre cette échelle d'observation.

Tout système optique formant une image, par exemple un appareil photographique, une caméra, un microscope ou un télescope, collecte la lumière provenant de l'objet observé et produit sur un écran (une pellicule photographique, un réseau de capteurs CCD ou la rétine de l'observateur) une distribution spatiale d'intensité lumineuse. C'est ce que l'on nomme l'image. Soit l'objet, telle une flamme ou une étoile, produit directement la lumière collectée, soit il la réémet, la réfléchit ou la diffuse quand il est éclairé par une source externe.

L'ESSENTIEL

✓ La diffraction de la lumière impose une limite de résolution aux microscopes classiques.

✓ Pour observer des détails de l'ordre du nanomètre, il faut détecter les ondes dites évanescentes qu'un objet réémet. Ces ondes n'existent qu'à des distances inférieures à la longueur d'onde d'éclairement.

✓ Le microscope en champ proche peut détecter ces ondes ; les images obtenues ont une résolution de quelques nanomètres.

✓ Avec un microscope classique, les physiciens mettent au point d'autres techniques de super-résolution.

Les lois de l'optique géométrique assimilent la lumière à un ensemble de rayons, et cette approche permet de comprendre comment fonctionnent les appareils d'imagerie. Toutefois, les performances de ces instruments reposent sur le fait que la lumière est une onde électromagnétique.

D'une part, la nature ondulatoire de la lumière impose une limite de résolution spatiale aux systèmes d'imagerie classiques (de l'ordre de la longueur d'onde). D'autre part, la physique des ondes permet aux scientifiques de concevoir de nouvelles approches pour réaliser des images au-delà de cette limite. C'est la super-résolution. Ainsi, nous allons examiner comment la microscopie optique est capable de dépasser la limite de diffraction en détectant des ondes dites évanescentes, et voir que, même avec un microscope classique, il est possible d'obtenir des images super-résolues en utilisant la fluorescence.

La limite de diffraction

Une onde est caractérisée par une échelle spatiale naturelle : sa longueur d'onde λ . Lorsque deux ondes de même longueur d'onde λ se propagent en sens inverse se superposent, la figure d'intensité lumineuse obtenue présente des franges d'interférences de période $\lambda/2$. Ainsi, en superposant des ondes de longueur d'onde λ , on crée une figure d'intensité dont l'échelle caractéristique la plus petite est $\lambda/2$. C'est cette échelle qui donne la plus petite varia-