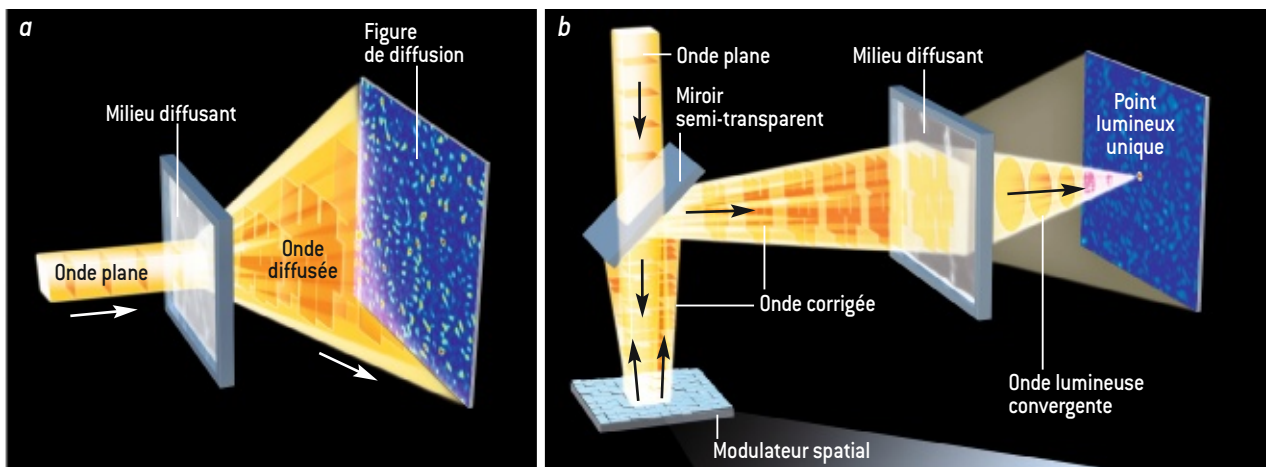
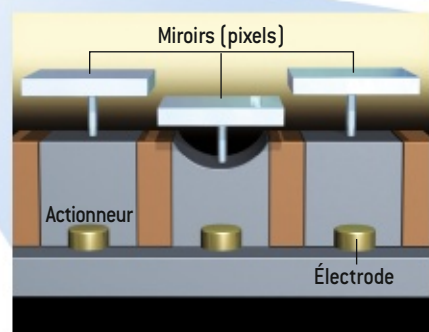




2. LE CONTRÔLE D'UNE LUMIÈRE MULTIDIFFUSÉE peut se faire selon le principe imaginé par A. Mosk et ses collègues, en réalisant une conjugaison de phase « à l'envers ». Ils ont envoyé une onde plane sur un milieu très diffusant et ont obtenu une figure de diffusion qui présente des grains brillants et 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. ■



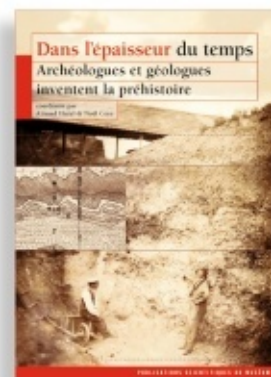
Muséum national d'Histoire naturelle

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