

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.

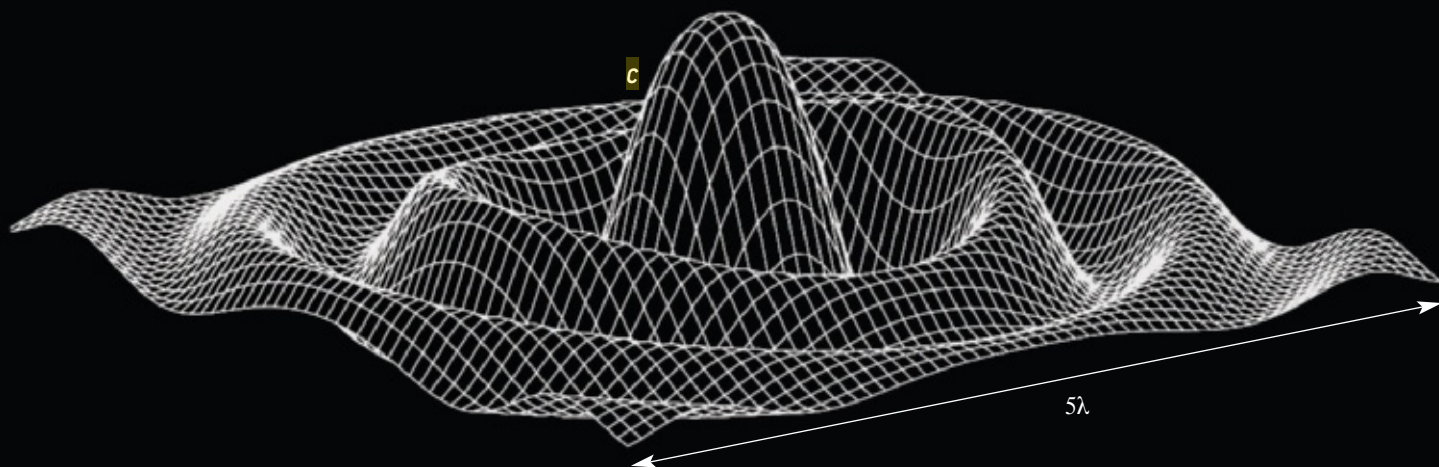
✓ Avec un microscope classique, les physiciens mettent au point d'autres techniques de super-résolution.

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-



tion spatiale visible dans une image produite avec des ondes. On parle de limite de diffraction ; celle-ci est liée au fait qu'on ne peut pas confiner spatialement une onde sans influencer sur sa propagation, ce qui est le fondement même du phénomène de diffraction (voir l'encadré page 52). En conséquence, un microscope optique classique est limité à une résolution spatiale de l'ordre de $\lambda/2$, où λ est la longueur d'onde utilisée pour former l'image.

Cette résolution est de l'ordre de 200 nanomètres en lumière visible (dont les longueurs d'onde sont comprises entre 400 et 800 nanomètres). Un microscope électronique à balayage est aussi limité par la diffraction, mais c'est la longueur d'onde de de Broglie des électrons (associée à leur nature quantique et beaucoup plus courte que les longueurs d'onde optiques) qui permet d'atteindre des résolutions de l'ordre du nanomètre. Un télescope est limité à une résolution angulaire (permettant de séparer angulairement deux étoiles) de l'ordre de λ/D , où D est son diamètre et λ la longueur d'onde d'observation. Un échographe ultrasonore pour l'imagerie du corps humain a une résolution de l'ordre du millimètre, correspondant à la longueur d'onde des ondes acoustiques utilisées.

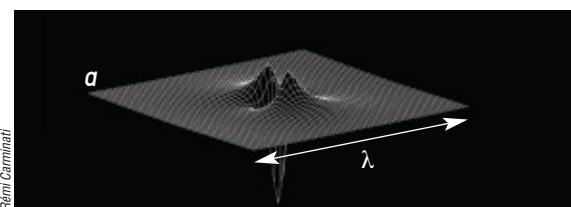
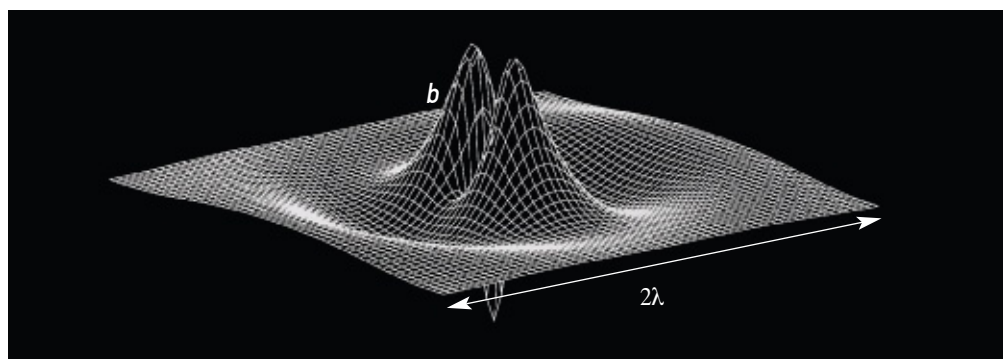
De nombreux instruments d'imagerie utilisant des ondes présentent donc cette limite de résolution. Peut-on envisager d'aller au-delà ? Oui, mais à condition de repenser le processus même de formation de l'image.

Pour améliorer la résolution spatiale d'un système d'imagerie, il faut rendre visibles des structures spatiales plus petites que λ dans la distribution d'intensité collec-

tée. La physique des ondes offre cette possibilité, par le biais du profil d'intensité lumineuse dans la zone dite de champ proche. Dans cette zone, certaines ondes créées par l'objet peuvent produire des variations spatiales d'intensité bien inférieures à $\lambda/2$ (voir la figure 1). Mais ces ondes disparaissent de façon exponentielle lorsqu'on s'éloigne de l'objet : elles sont évanescentes et ne peuvent être détectées qu'à des distances de l'objet très inférieures à la longueur d'onde (d'où l'expression « champ proche »).

Au-delà de cette zone, les ondes évanescentes ne participent plus à la formation des images, et on retrouve la limite de diffraction. La transition a lieu sur une distance inférieure à la longueur d'onde de la lumière, ce qui complique les techniques d'acquisition d'images en champ proche.

Pour obtenir le profil d'intensité des ondes dans la zone de champ proche et former une image super-résolue, on utilise un nano-objet dont la taille est inférieure à la longueur d'onde λ du laser qui éclaire l'échantillon étudié. Placé tout près de la surface de ce dernier, un tel nano-objet est éclairé par les ondes évanescentes produites par l'échantillon et réémet (par



1. UNE SPHÈRE de taille inférieure à la longueur d'onde λ d'éclairement réémet des ondes propagatives et des ondes évanescentes. À courte distance – en champ proche, à une distance de $0,05 \lambda$ [a] et à $0,1 \lambda$ [b] –, les ondes évanescentes contribuent beaucoup à la distribution d'intensité lumineuse qui présente des variations à des échelles petites devant λ , ce qui permet la super-résolution. À grande distance – en champ lointain, à une distance au moins égale à λ [c] –, ces ondes laissent la place aux ondes propagatives qui ne produisent que des variations d'intensité à des échelles supérieures à $\lambda/2$. La figure obtenue résulte de l'interférence de l'onde éclairant la sphère avec les ondes qu'elle réémet.

Régis Carminati