

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.

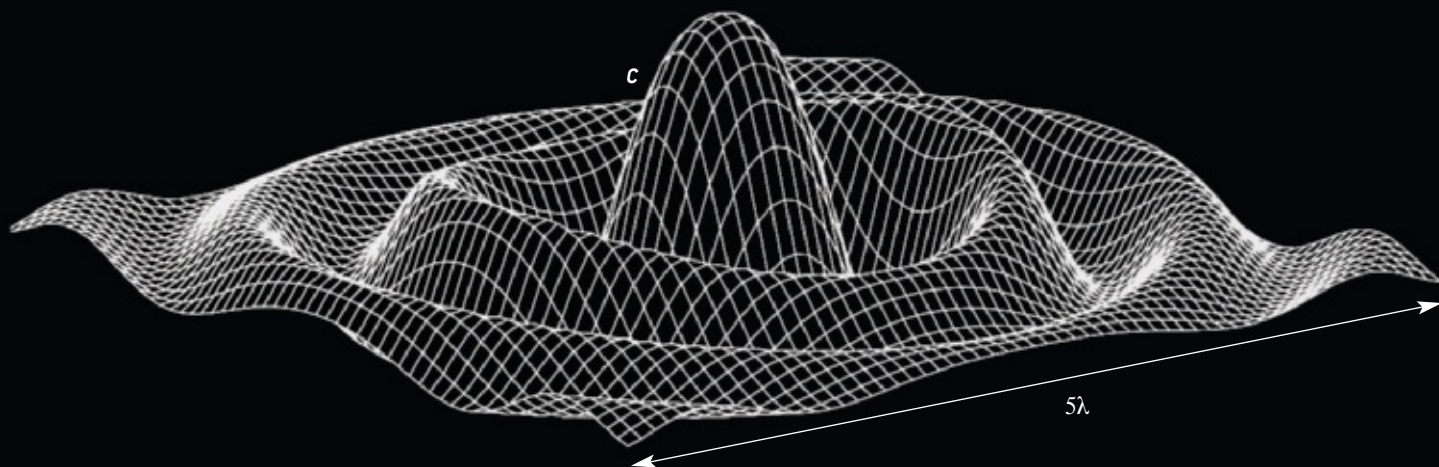
✓ Avec un microscope classique, les physiciens mettent au point d'autres techniques de super-résolution.

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.

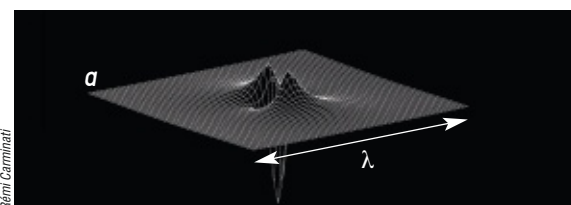
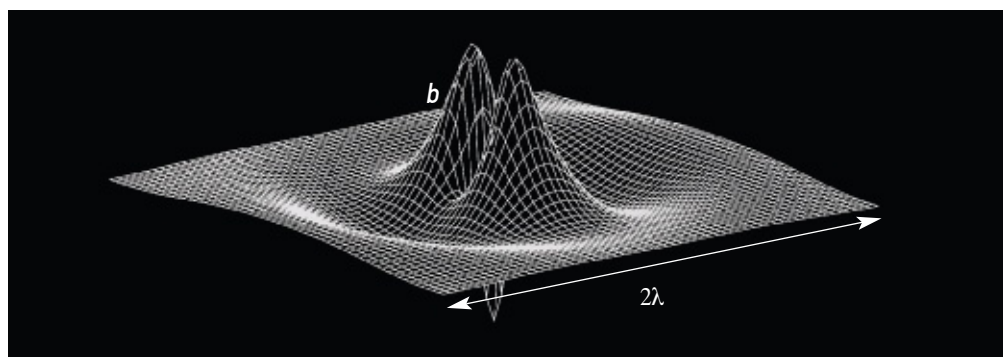
De nombreux instruments d'imagerie utilisant des ondes présentent donc cette limite de résolution. Peut-on envisager d'aller au-delà ? Oui, mais à condition de repenser le processus même de formation de l'image.

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 »).

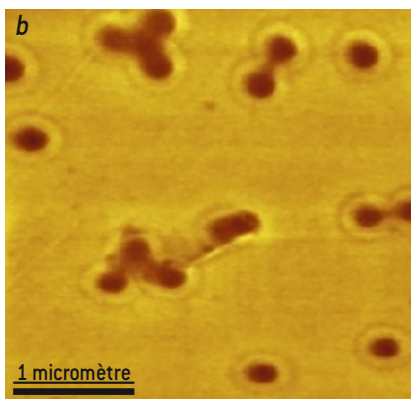
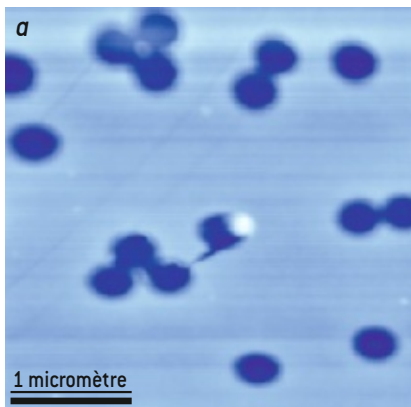
Au-delà de cette zone, les ondes évanescentes ne participent plus à la formation des images, et on retrouve la limite de diffraction. La transition a lieu sur une distance inférieure à la longueur d'onde de la lumière, ce qui complique les techniques d'acquisition d'images en champ proche.

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



2. UN FILM MÉTALLIQUE percé de nanocra-tères et déposé sur un substrat de verre est observable en microscopie optique en champ proche. On a enregistré une image topographi-que (a) et une image optique super-résolue de l'échantillon (b). Le fond des cratères laisse apparaître le verre (a, en bleu foncé, b, en mar-ron). L'image super-résolue révèle des détails de 50 nanomètres, alors que la longueur d'onde d'observation λ est de 10,6 micromètres.

diffusion) des ondes dites propagatives : elles se propagent loin et leur intensité est proportionnelle à celle des ondes qui l'éclair-ent. Un objet de taille sub-longueur d'onde se comporte donc comme une sonde locale de l'intensité des ondes présentes dans la zone de champ proche, ici les ondes évanes-centes émises par l'échantillon étudié.

En mesurant l'intensité de la lumière diffusée par cette sonde que l'on déplace précisément pour balayer tout l'objet, on peut déterminer le profil d'intensité des ondes à la surface de l'objet. Ce profil présenterait des variations spatiales sur des échelles très petites devant λ , avec une limite inférieure déterminée par la taille de la sonde locale diffusante et par la distance entre deux points où l'on mesure l'inten-sité diffusée, et non plus par λ comme c'est le cas dans un microscope classique.

Voir dans le champ proche

L'application de ce concept de sonde locale diffusante du champ proche permet la réalisation d'images optiques super-réso-lues : la sonde locale détecte les variations spatiales de l'intensité des ondes éva-nescentes, qui représentent une source d'information sur les détails plus petits que λ . Reste à mettre en œuvre ce concept.

Pour réaliser des images super-résolues dans le domaine spectral du visible ou de l'infrarouge (la longueur d'onde étant com-prise entre environ 400 nanomètres et

10 micromètres), la taille de la sonde locale diffusante ne doit pas dépasser quelques dizaines de nanomètres. Et l'on doit main-tenir cet objet diffusant à une distance nano-métrique de la surface d'un échantillon éclairé par un laser et en contrôler précisé-ment la position pour balayer toute la zone. Optiquement, le problème est aussi com-plexe : un objet de taille nanométrique dif-fuse une lumière dont l'intensité est faible. Cela impose un montage optique collectant bien la lumière diffusée et équipé d'un détec-teur sensible. Un instrument réalise ce tour de force et capte les ondes évanescentes pour former des images super-résolues : c'est le microscope optique en champ pro-che (ou SNOM pour *Scanning Near-field Opti-cal Microscopy*, voir l'encadré page 54).

Inventé en 1984 par le physicien Die-ter Pohl et son équipe dans les laboratoi-res d'IBM à Zurich, le microscope optique en champ proche est un microscope à sonde locale à balayage de la même famille que le microscope à effet tunnel et le micros-cope à force atomique. Tous ces micros-copes sont équipés d'une sonde en forme de pointe et on peut contrôler avec une pré-cision inférieure au nanomètre la posi-tion de l'échantillon et de la pointe, grâce à des déplacements piézo-électriques com-mandés par ordinateur et associés à une électronique d'asservissement.

Les forces d'interaction de la pointe et de la surface de l'échantillon dans un micros-cope optique en champ proche produi-sent une déflexion du levier qui supporte

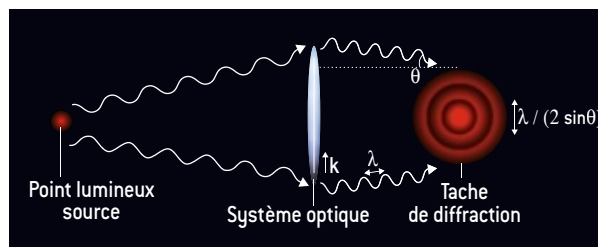
LA DIFFRACTION DE LA LUMIÈRE

Depuis l'invention du micros-cope optique au XVI^e siècle, les scientifiques se sont heurtés à une difficulté : la résolution avec laquelle on voit un objet est limitée à cause de la diffraction de la lumière. En effet, l'image d'un point par un ins-trument d'optique n'est pas un point, mais une tache circulaire nom-mée tache d'Airy ou de diffraction. Si deux points distincts sont trop rapprochés, leurs images peu-vent se recouvrir. Cet effet impose donc une limite à la résolution en optique. Mais d'où vient cette limite de diffraction ?

L'image d'un point lumineux est obtenue en focalisant des ondes électromagnétiques propa-gatives, qui interfèrent dans le

plan image. Le vecteur d'onde transverse le plus grand est $k = 2\pi/\lambda \sin\theta$, θ étant l'angle d'ou-verture du système d'imagerie. L'ensemble des vecteurs d'onde transverses accessibles est d'éten-due $\Delta k = 4\pi/\lambda \sin\theta$. En physique ondulatoire, l'étendue en vecteurs d'onde Δk et l'étendue spatiale Δr de la figure de diffraction sont reliées par la relation fondamen-tale : $\Delta r \Delta k > 2\pi$. On a donc : $\Delta r > \lambda/(2\sin\theta)$, ce qui fixe la taille de la tache de diffraction. Quand l'ouverture numérique du système optique augmente ($\sin\theta = 1$), on tend vers une tache de diffraction dont le diamètre est égal à $\lambda/2$.

Si l'on traite la lumière d'un point de vue quantique comme un



L'image d'un point lumineux à travers un système optique est une tache de diffraction d'étendue spatiale $\lambda/[2\sin\theta]$, où λ est la lon-gueur d'onde et θ l'angle d'ouverture du système d'imagerie.

ensemble de photons qui se propa-gent de la source au détec-teur, chaque photon a une quan-tité de mouvement $p = (h/2\pi)k$, où h est la constante de Planck. La relation fondamentale devient : $\Delta r \Delta p > h$. C'est l'expression du principe d'incertitude de Heisen-

berg, selon lequel on ne peut mesurer simultanément la posi-tion et la quantité de mouvement d'une particule. La limite de dif-fraction apparaît alors comme une conséquence de ce principe, et du fait que l'étendue Δp est limitée par le système d'imagerie.

la pointe. La mesure de cette déflexion injectée dans une boucle d'asservissement maintient la pointe en contact ou à une distance constante de quelques nanomètres de la surface de l'échantillon, en agissant sur l'élément piézo-électrique. Un balayage complet de l'échantillon sous la pointe donne, grâce à un ordinateur, une image topographique de la surface.

Dans le microscope optique en champ proche, un laser éclaire la région de l'échantillon où se trouve la pointe. Si des structures sub-longueurs d'onde sont présentes dans cette région, elles produisent des ondes évanescentes qui restent confinées dans la zone de champ proche. La sonde locale diffusante, de taille inférieure à la longueur d'onde du laser et située à l'extrémité de la pointe du microscope, convertit ces ondes évanescentes en ondes propagatives.

Ondes évanescentes et super-résolution

On distingue trois types de microscope optique en champ proche, selon la sonde diffusante qu'ils utilisent. Chacune correspond à un objet de taille très inférieure à la longueur d'onde d'éclairement ; il s'agit soit de la pointe même du microscope, jouant le rôle d'un diffuseur sphérique, soit d'une nano-ouverture à l'extrémité d'une fibre optique étirée en forme de pointe, soit d'un nano-objet fluorescent (une molécule, un nano-cristal, etc.) collé au bout d'une pointe. Le choix de l'une ou l'autre de ces approches dépend des conditions expérimentales, telles que la longueur d'onde du laser, les conditions d'éclairement, la façon dont on souhaite collecter la lumière, etc.

La lumière émise par la sonde locale diffusante au bout de la pointe du microscope se propage et est collectée à l'aide d'une lentille ou de l'objectif d'un microscope dans le cas des microscopes à pointe diffusante et à sonde fluorescente, ou à l'aide d'une fibre optique dans le cas du microscope à ouverture. Puis elle est focalisée sur un détecteur optique qui mesure son intensité.

L'élément important dans ces microscopes est que l'on connaît avec une précision nanométrique la position du nano-objet diffusant les ondes à la surface de l'échantillon. En outre, l'intensité de la lumière diffusée loin du nano-objet et dirigée vers le détecteur est proportionnelle à l'intensité de la lumière qu'il reçoit dans la zone de champ proche, à laquelle

contribuent les ondes évanescentes. Elle peut être mesurée selon la position de la sonde sur la surface de l'échantillon.

Ainsi, en mesurant cette intensité pendant le balayage de la pointe sur la surface de l'échantillon, on enregistre point par point une image optique super-résolue de la zone balayée, dont la résolution ne dépend que de la taille du nano-objet utilisé comme sonde locale d'intensité dans la zone de champ proche, et de la distance entre deux points de mesure. L'image optique super-résolue est enregistrée en même temps que l'image topographique. Ces deux images fournissent deux informations différentes qui peuvent être comparées ; la première est liée aux variations spatiales d'intensité optique à la surface de l'échantillon sur des échelles sub-longueur d'onde, la seconde au relief de l'échantillon.

À quoi sert la microscopie optique en champ proche ? Un domaine d'application important est l'étude des propriétés optiques de nanomatériaux à la surface d'un échantillon. Il est parfois nécessaire de connaître les propriétés optiques d'un matériau à une longueur d'onde λ , alors que l'étendue spatiale de ce matériau est inférieure à λ . Dans ce cas, l'utilisation d'un microscope conventionnel est proscrite, car sa résolution spatiale ($\lambda/2$) est insuffisante.

Le microscope optique en champ proche apporte une solution à ce problème. Le contraste optique dans une image super-résolue résulte du fait que l'intensité de la lumière qui arrive sur le détecteur dépend des propriétés optiques du matériau situé sous la sonde locale diffusante. Une partie des ondes arrivant sur le détecteur provient de l'image de la sonde diffusante, de sorte que l'intensité varie selon la nature du matériau situé sous la pointe pendant le balayage.

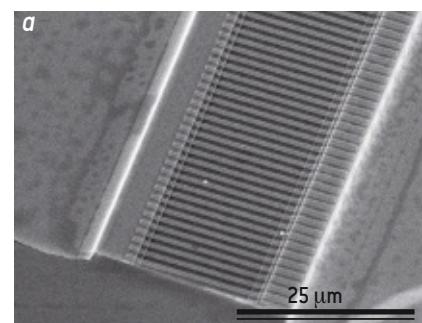
Par exemple, avec un microscope optique en champ proche à pointe diffusante fonctionnant dans l'infrarouge à une longueur d'onde de 10,6 micromètres, nous avons obtenu l'image optique d'un film métallique de chrome (réfléchissant dans l'infrarouge), percé de trous circulaires d'environ 200 nanomètres de diamètre laissant apparaître le substrat de verre (absorbant dans l'infrarouge, voir la figure 2). L'image montre que ce microscope est capable de distinguer les deux matériaux avec une résolution spatiale bien meilleure que celle imposée par la diffraction.

LES AUTEURS

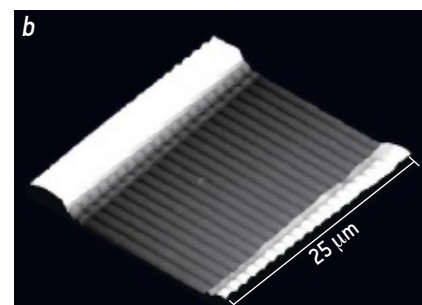


Rémi CARMINATI est professeur à l'École supérieure de physique et de chimie industrielles de la ville de Paris (ESPCI ParisTech) où il dirige le Laboratoire d'optique physique. Il est le directeur adjoint de l'Institut Langevin.

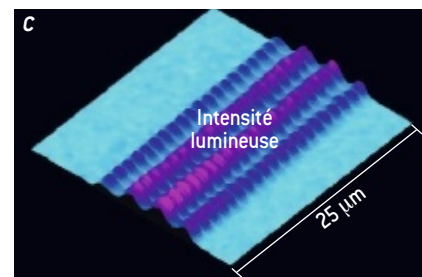
Yannick DE WILDE est directeur de recherche du CNRS à l'Institut Langevin.



R. Colombelli et A. Boussekrou, IEF



Y. De Wilde et A. Babuty



Y. De Wilde et A. Babuty

3. À LA SURFACE DU RÉSEAU MÉTALLIQUE de sa cavité (a, en microscopie électronique), un laser semi-conducteur produit des ondes évanescentes sous la forme de plasmons. Un microscope en champ proche enregistre simultanément une image topographique (b) et une image optique super-résolue (c) de la surface du dispositif pendant qu'il émet un rayonnement laser. L'image topographique révèle la structure du réseau métallique, tandis que l'image optique montre la répartition spatiale des ondes évanescentes sur le dispositif.

✓ BIBLIOGRAPHIE

A. Babuty *et al.*, **Semiconductor surface plasmon sources**, *Physical Review Letters*, vol. 104, article 226806, 2010.

R. Heintzmann et M. G. Gustafsson, **Subdiffraction resolution in continuous samples**, *Nature Photonics*, vol. 3, p. 362, 2009.

E. Betzig *et al.*, **Imaging intracellular fluorescent proteins at nanometer resolution**, *Science*, vol. 313, p. 1642, 2006.

L. Aigouy, Y. De Wilde et C. Fréty, **Les nouvelles microscopies : à la découverte du nanomonde**, Belin, 2006.

C. Boccara et R. Carminati, **Champ proche optique : de l'expérience à la théorie**, *Les nanosciences : nanotechnologies et nanophysique*, Belin, 2004.

J. J. Greffet et R. Carminati, **Image formation in near-field optics**, *Progress in Surface Science*, vol. 56, p. 133, 1997.

Un autre domaine d'application de la microscopie en champ proche est la réalisation d'images d'ondes évanescentes à la surface de guides d'ondes. Quand des ondes se propagent dans un prisme transparent (dont l'indice optique est supérieur à un) et subissent une réflexion totale à la surface interne de ce prisme, elles produisent des ondes réfléchies propagatives qui poursuivent leur route dans le prisme. La réflexion engendre aussi des ondes dans l'air sur la surface externe du prisme, mais ces ondes ne se voient pas : elles sont évanescentes, c'est-à-dire qu'elles déclinent rapidement à la surface du prisme sans qu'aucune composante propagative qui permettrait de les observer en se plaçant loin de la surface du prisme n'y soit associée.

Un phénomène analogue a lieu quand des ondes se propagent dans un guide d'onde diélectrique (d'indice optique supérieur à un). Les ondes propagatives confinées dans le guide se prolongent dans l'air à la surface du guide sur une distance de l'ordre d'une fraction de la longueur d'onde, sous la forme d'ondes évanescentes. Des ondes peuvent également se propager sur des surfaces métalliques et présentent dans ce cas un caractère éva-

nescent à la fois dans l'air et dans le métal. On les nomme des plasmons (polaritons) de surface. Ces ondes qui restent naturellement confinées à la surface lorsqu'elles se propagent sur une piste métallique suscitent aujourd'hui beaucoup d'intérêt, car elles devraient permettre la réalisation de nouveaux types de dispositifs d'optique intégrée. Le microscope optique en champ proche est capable de caractériser la propagation des ondes évanescentes à la surface de ces structures guidantes.

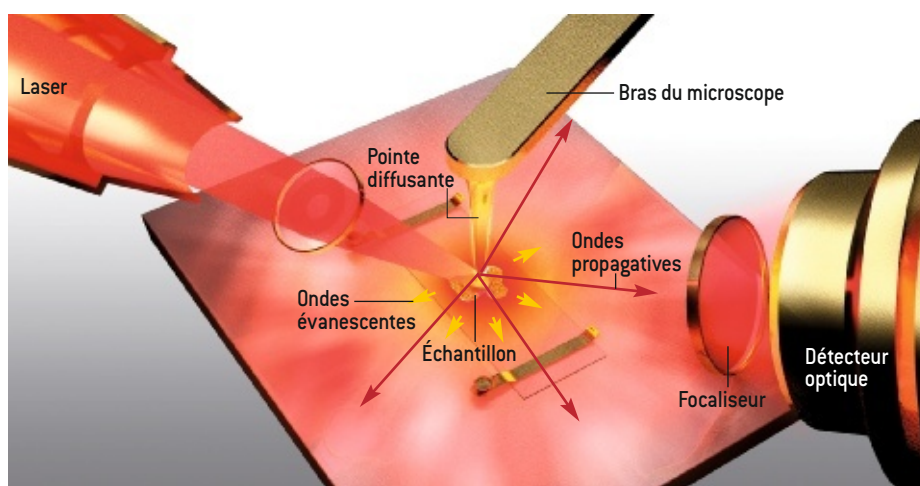
Qui plus est, le microscope optique en champ proche présente un intérêt dans des domaines situés à l'interface de la recherche fondamentale et appliquée. En 2010, nous avons observé des dispositifs laser semi-conducteurs (conçus par l'équipe de Raffaele Colombelli à l'Institut d'électronique fondamentale du CNRS et de l'Université Paris Sud), avec un microscope en champ proche fonctionnant dans l'infrarouge. Ces dispositifs produisent des plasmons à la surface du réseau métallique situé sur la cavité du laser, l'émission du laser vers l'extérieur se faisant par les deux extrémités de la cavité.

Le microscope en champ proche donne une image super-résolue des plasmons de

LE MICROSCOPE OPTIQUE EN CHAMP PROCHE

Ce microscope détecte des ondes dites évanescentes, uniquement présentes à des distances de l'échantillon très inférieures à la longueur d'onde d'observation. La sonde utilisée se termine par une pointe de taille nanométrique qui réalise une cartographie du champ proche. Des translations piézo-électriques contrôlées par ordinateur déplacent la pointe avec précision. Un faisceau laser de longueur d'onde λ est focalisé sur la zone de l'échantillon où se trouve l'extrémité de la pointe, ce qui produit des ondes évanescentes près de tout objet de taille inférieure à λ se trouvant dans la zone éclairée. On balaye l'échantillon latéralement sous la pointe maintenue à une distance nanométrique de la surface grâce au dispositif d'asservissement qui agit sur sa position verticale.

L'enregistrement de la position verticale de la pointe en chaque point de la zone balayée donne une image topographique, qui rensei-



gne sur le relief de l'échantillon. Par ailleurs, les ondes évanescentes présentes à la surface de l'échantillon sont diffusées à l'extrémité de la pointe pendant le balayage. Comme elles subissent des diffusions, elles deviennent des ondes propagatives classiques, lesquelles sont collectées et focalisées sur un détecteur optique. L'enregistrement de l'inten-

sité du signal selon la position de la pointe à la surface de l'échantillon pendant le balayage fournit une image optique de l'échantillon. La résolution spatiale dépend uniquement de la taille de l'extrémité diffusante de la sonde, soit quelques nanomètres.

Différentes sondes en forme de pointe sont utilisées pour diffuser

les ondes évanescentes dans la zone de champ proche. Le choix de la sonde dépend des conditions expérimentales, telles que la longueur d'onde d'éclairage, la façon dont la lumière est collectée, etc.

Ainsi, ce microscope fournit une image topographique et une image optique de l'échantillon avec une résolution de quelques nanomètres.

Didier Florentz

Alimentation – santé – technologies alimentaires



Danger dans l'assiette
Sylviane Dragacci, Nadine Zakhia-Rozis, Pierre Galtier
Pour décrypter les dangers alimentaires liés aux moisissures toxiques, les mycotoxines.
2011, 184 p. - 25 €



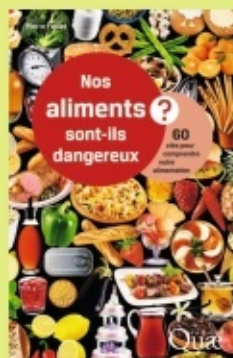
Manger sans risques
Vincent Leclerc
Les clés pour manger sans risques au quotidien.
2011, 200 p. - 22 €



Quand le raisin se fait vin
Pascale Scheromm
De la transformation du fruit en nectar des dieux, histoire et techniques.
2011, 160 p. - 20 €

Bonnes bactéries et bonne santé
Gérard Corthier

Et si pour vivre nous avons besoin de bactéries ?
2011, 128 p. - 19 €



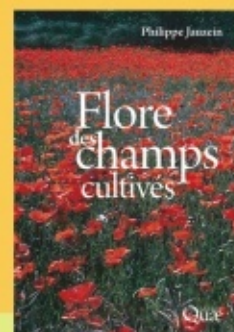
Nos aliments sont-ils dangereux ?
60 clés pour comprendre notre alimentation
Pierre Feillet
Les clés pour mieux comprendre le « système alimentaire », celui qui débute dans les champs et se termine dans notre corps.
2011, 224 p. - 22 €

Botanique



La flore d'Île de France
Philippe Jauzein, Olivier Nawrot
Un bilan exhaustif de la flore sauvage de la région d'Île de France. LA référence scientifique.
2011, 972 p. couleurs - 129 €
Prix de lancement, 99 € jusqu'au 31/12/2011

Flore des champs cultivés
Philippe Jauzein
Incontournable pour déterminer les plantes herbacées dans les parcelles agricoles.
2011 - 898 pages - 59,00 €



Pour les chercheurs



Guide de rédaction scientifique
L'hypothèse, clé de voûte de l'article scientifique
David Lidsay, adaptation française de Pascal Poindron
Le rôle primordial de l'hypothèse formulée en amont de la recherche pour réussir la communication scientifique.
2011, 184 p. - 15,00 €

Microscopie des plantes consommées par les animaux
Jocelyne Rech
Une méthode originale et simple d'identification des espèces végétales, à partir de fragments de feuilles, de graines, de fruits ou d'écorces.
2011, 312 p. - 49,00 €



Science et Société



Toréer sans la mort ?
Jocelyne Porcher, Carlos Pereira, coord.
La tauromachie sous l'angle du travail avec les animaux. Qu'apporte la mort de l'animal à cet art controversé ?
2011, 328 p. - 39 €



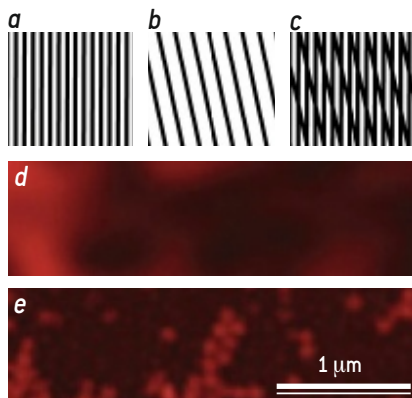
surface, alors qu'aucune lumière émise sur la cavité du laser ne peut être observée sans la sonde locale diffusante. En général, les études menées dans l'industrie pour caractériser l'émission d'un laser semi-conducteur portent sur son spectre et la qualité du faisceau qu'il produit à grande distance. L'image super-résolue que nous avons obtenue montre que le microscope en champ proche permet d'aller plus loin : en étudiant la distribution spatiale des ondes évanescentes sur la cavité du laser en fonctionnement, nous déterminons celle des ondes dans la cavité (voir la figure 3). Cette information est importante pour la fabrication de tels dispositifs.

La super-résolution en champ lointain

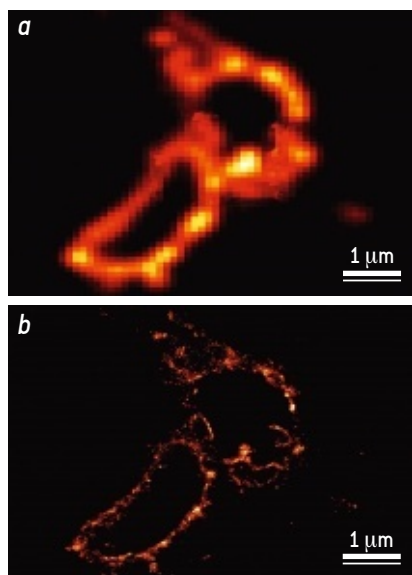
Les techniques de microscopie en champ proche sont au cœur de l'optique sub-longueur d'onde et ont donné naissance au domaine de la nano-optique. Toutefois, de récentes études ont montré que des images super-résolues peuvent être formées quand on utilise des instruments fonctionnant en champ lointain et donc limités par la diffraction, en particulier des microscopes optiques classiques. Illustrons deux principes de ces nouvelles approches, dans le cadre de l'imagerie de fluorescence.

En imagerie de fluorescence, on enregistre la distribution spatiale d'émetteurs fluorescents ou fluorophores, souvent des molécules organiques, répartis dans l'échantillon. L'imagerie en biologie étant le champ d'application privilégié de ces techniques, les échantillons sont en général des cellules ou des tissus vivants. L'intensité de la lumière fluorescente émise est proportionnelle au produit de la densité de fluorophores ($n(r)$, r étant la position du point observé dans l'échantillon) et de l'intensité incidente I_{inc} provenant de la source extérieure, un laser la plupart du temps.

Lorsqu'on forme l'image de l'intensité de fluorescence émise avec un microscope classique, la résolution est limitée à environ $\lambda/2$, où λ est la longueur d'onde de fluorescence. Une première approche pour améliorer la résolution est d'éclairer l'échantillon avec une intensité non uniforme. On parle alors de microscopie par « éclairage structuré ». Grâce au produit $n(r) I_{\text{inc}}(r)$, tout en ne détectant dans l'intensité de fluorescence que des variations spatiales supérieures à $\lambda/2$, on a accès



4. L'AMÉLIORATION DE LA RÉOLUTION en microscopie de fluorescence par éclairage dit structuré repose sur l'effet de moiré. En combinant l'objet (a) avec une illumination structurée (b), on obtient dans l'image un motif de grande période (c) qui peut être détecté par un système limité par la diffraction. En connaissant la structuration imposée à la lumière excitatrice, on retrouve à partir du motif les détails de l'objet. Ainsi, des billes fluorescentes de 50 nanomètres sont peu visibles en microscopie classique (d), mais nettes avec un éclairage structuré (e).



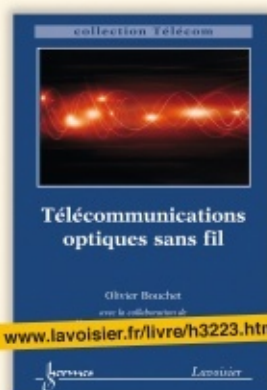
5. DES CELLULES produisent dans leur membrane des molécules fluorescentes – des fluorophores. En observant ces cellules en microscopie classique de fluorescence (a), on obtient une image de la distribution spatiale des fluorophores avec une résolution limitée à $\lambda/2$, λ étant la longueur d'onde de fluorescence. Pour améliorer la résolution, on utilise des fluorophores photoactivables (par une autre source de lumière), que l'on stimule à tour de rôle au cours de cycles de photoactivation. Quand une source isolée émet, on la localise avec précision en repérant le centre de la tache de diffraction qu'elle produit. Au cycle suivant, on peut localiser une autre molécule même si la distance la séparant de la précédente est inférieure à la longueur d'onde. L'image super-résolue (b) s'obtient en répétant ce processus.

à des informations sur la distribution des fluorophores à des échelles plus petites. Le principe repose sur un analogue de l'effet Moiré : en structurant l'intensité incidente à une échelle de $\lambda/2$, on gagne un facteur deux en résolution, limitée alors à $\lambda/4$ (voir la figure 4). En utilisant la réponse non linéaire des fluorophores, due à la saturation de l'émission fluorescente, on peut même aller au-delà de $\lambda/4$ et atteindre des résolutions de quelques dizaines de nanomètres.

Une autre approche consiste à former des images super-résolues en ne détectant l'émission que d'un seul fluorophore à la fois. En effet, même avec un microscope classique, on peut localiser une source unique avec précision en déterminant le maximum de la tache de diffraction produite. Même si la tache a une taille de l'ordre de $\lambda/2$, on peut localiser son maximum avec une précision inférieure à $\lambda/2$ si le rapport signal sur bruit est suffisant et si le détecteur a des pixels assez petits pour enregistrer précisément la tache de diffraction. La limite est alors contrôlée par le bruit de fond, et non par la longueur d'onde.

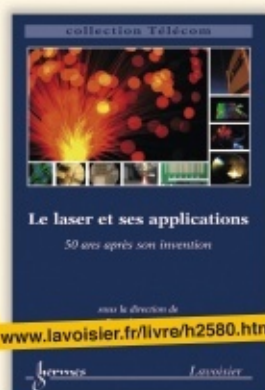
Mais quand l'échantillon contient un grand nombre de fluorophores, comment faire en sorte qu'un seul émette à la fois ? En 2006, deux équipes ont répondu à la question en obtenant des images super-résolues de distribution de fluorophores dans des cellules biologiques. Elles ont utilisé des fluorophores photo-activables : excités par un laser, ces particules émettent seulement quand une impulsion produite par un autre laser de longueur d'onde différente les rend actives. Si à chaque instant, une seule source émet dans une zone de taille limitée par la diffraction, on peut localiser cette source avec précision en utilisant un microscope classique (voir la figure 5). En enregistrant les positions de chaque source, on réalise une image de la distribution des fluorophores avec une résolution bien inférieure à λ . Mais la technique est limitée par la probabilité faible d'avoir deux sources émettant en même temps tout en étant séparées de moins de $\lambda/2$.

Ces nouvelles approches en champ proche et en imagerie de fluorescence permettent aujourd'hui aux scientifiques d'obtenir des images avec une résolution spatiale de l'ordre de quelques nanomètres. En imagerie optique, l'exploitation des lois de la physique sous de nouveaux angles permet encore de spectaculaires progrès...



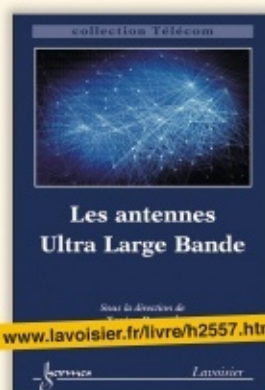
www.lavoisier.fr/livre/h3223.html

O. BOUCHET, avec la collaboration de H. Sizun et C. Boisrobert
Collection Télécom, dirigée par Pierre-Noël Favennec
336 p., 16 x 24, 2011
ISBN : 978-2-7462-3223-5, **89 €**



www.lavoisier.fr/livre/h2580.html

P. BESNARD, P.-N. FAVENNEC (Sous la dir.)
Collection Télécom, dirigée par Pierre-Noël Favennec
376 p., 15,5 x 24, 2010
ISBN : 978-2-7462-2580-0, **79 €**



www.lavoisier.fr/livre/h2557.html

X. BEGAUD (Sous la dir.)
Collection Télécom, dirigée par Pierre-Noël Favennec
320 p., 16 x 24, 2010
ISBN : 978-2-7462-2557-2, **80 €**



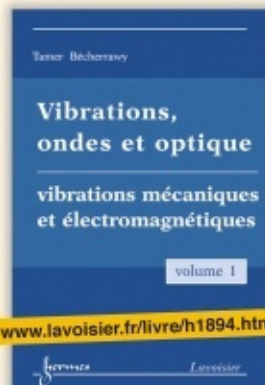
www.lavoisier.fr/livre/h2458.html

N. MOREAU
Collection Télécom, dirigée par Pierre-Noël Favennec
232 p., 15,5 x 24, 2010
ISBN : 978-2-7462-2458-2, **59 €**



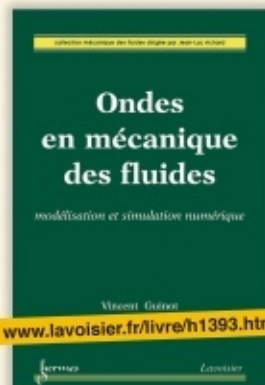
www.lavoisier.fr/livre/h2592.html

B. DÉMOULIN, P. BESNIER
Collection Télécom, dirigée par Pierre-Noël Favennec
432 p., 16 x 24, 2010
ISBN : 978-2-7462-2592-3
110 €



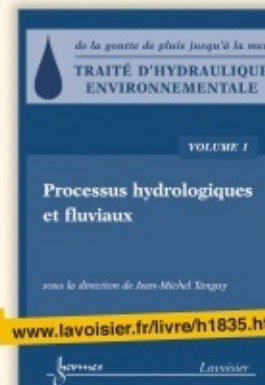
www.lavoisier.fr/livre/h1894.html

En 4 volumes
T. BÉCHERRAWY
Les 4 volumes groupés, 2008
ISBN : 978-2-7462-1894-5
280 €



www.lavoisier.fr/livre/h1393.html

V. GUINOT
Collection Mécanique des fluides, dirigée par Jean-Luc Achard
392 p., 16 x 24, 2006
ISBN : 2-7462-1393-1, **95 €**



www.lavoisier.fr/livre/h1835.html

En 9 volumes
J.-M. TANGUY
Les 9 volumes groupés, 2010
ISBN : 978-2-7462-1835-2, **845 €**



www.lavoisier.fr/livre/h2494.html

C. RUMELHARD, C. ALGANI, A.-L. BILLABERT
Collection Hyperfréquences, dirigée par Daniel Pasquet
416 p., 16 x 24, 2010
ISBN : 978-2-7462-2494-0
95 €



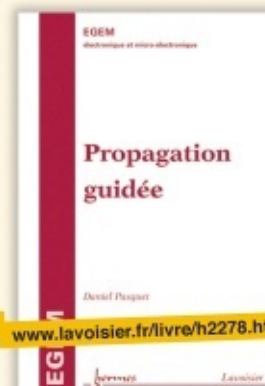
www.lavoisier.fr/livre/h1882.html

B. PIETTE
Collection Hyperfréquences, dirigée par Daniel Pasquet
312 p., 16 x 24, 2007
ISBN : 978-2-7462-1882-6
75 €



www.lavoisier.fr/livre/h2222.html

En 2 volumes
J.-P. MARAGE, Y. MORI
Les 2 volumes groupés, 2009
ISBN : 978-2-7462-2222-9
135 €



www.lavoisier.fr/livre/h2278.html

D. PASQUET (Sous la dir.)
Série Électronique et micro-électronique (Traité EGEM), dirigée par Robert Baptist et D. Pasquet
350 p., 16 x 24, 2011, relié
ISBN : 978-2-7462-2278-6
120 €