

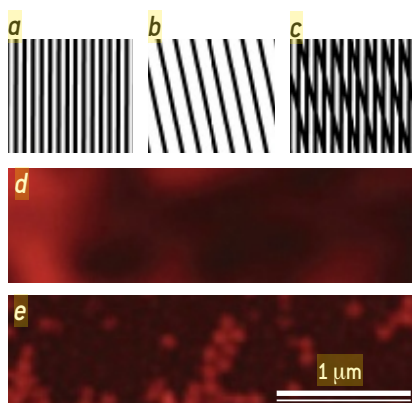
surface, alors qu'aucune lumière émise sur la cavité du laser ne peut être observée sans la sonde locale diffusante. En général, les études menées dans l'industrie pour caractériser l'émission d'un laser semi-conducteur portent sur son spectre et la qualité du faisceau qu'il produit à grande distance. 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

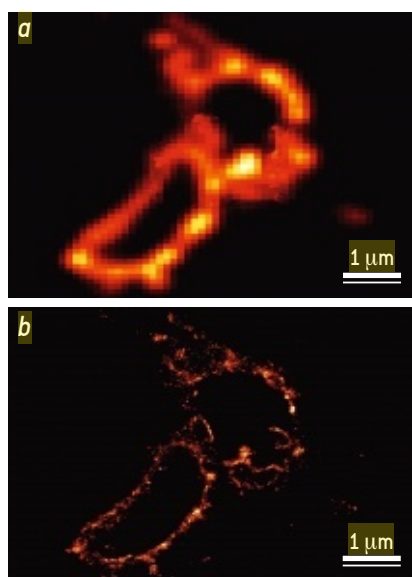
Les techniques de microscopie en champ proche sont au cœur de l'optique sub-longueur d'onde et ont donné naissance au domaine de la nano-optique. Toutefois, de récentes études ont montré que des images super-résolues peuvent être formées quand on utilise des instruments fonctionnant en champ lointain 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.

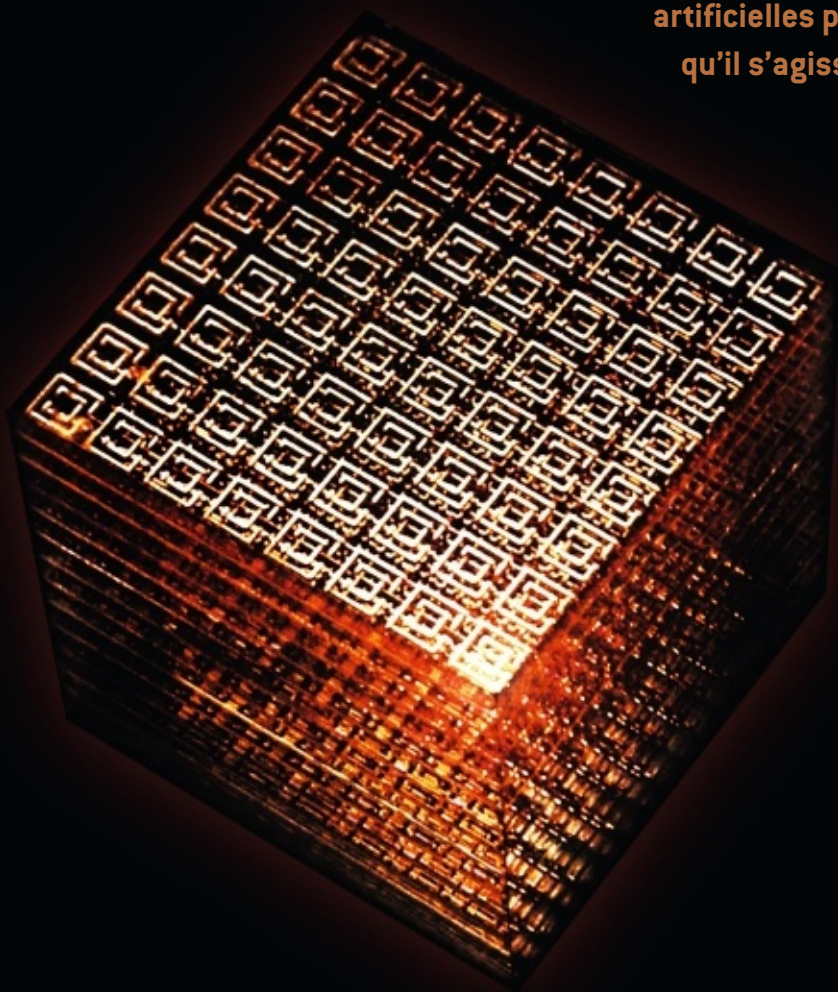
Mais quand l'échantillon contient un grand nombre de fluorophores, comment faire en sorte qu'un seul émette à la fois ? En 2006, deux équipes ont répondu à la question en obtenant des images super-résolues de distribution de fluorophores dans des cellules biologiques. Elles ont utilisé des fluorophores 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...

Les ondes sous l'emprise des **métamatériaux**

Sébastien Guenneau, Stefan Enoch et Ross McPhedran

Les physiciens élaborent des structures artificielles pour conformer à volonté les ondes, qu'il s'agisse de lumière, de vagues sur la mer ou encore d'ondes sismiques.



1. CE DISPOSITIF est une lentille quasi parfaite pour certaines ondes qu'il transmet sans les déformer. Cet effet résulte de l'agencement calculé de petits circuits élémentaires, des anneaux de cuivre fendus.

Les Grecs anciens avaient imaginé un casque rendant le dieu des enfers invisible: la Kunée d'Hadès. Depuis se succèdent les légendes et les fictions où des « capes d'invisibilité » confèrent à celui qui s'en revêt le pouvoir de disparaître à la vue. Or les physiciens parviennent aujourd'hui à conformer les ondes de façon à escamoter une partie de l'espace. Ils emploient pour cela des structures composées de motifs élémentaires ayant une taille inférieure à la longueur d'onde incidente. Nous allons expliquer comment les chercheurs déduisent ces structures de transformations reliant l'espace réel à un espace virtuel, où une partie de l'espace d'origine a été supprimée. Puis nous évoquerons plusieurs de ces structures que l'on nomme des métamatériaux.

Qu'est-ce exactement qu'un métamatériau? Le mieux est de répondre à cette question dans le cas le plus spectaculaire: celui des métamatériaux optiques. Pour une onde lumineuse monochromatique, le champ électromagnétique réalise un cycle d'oscillation pour chaque lon-