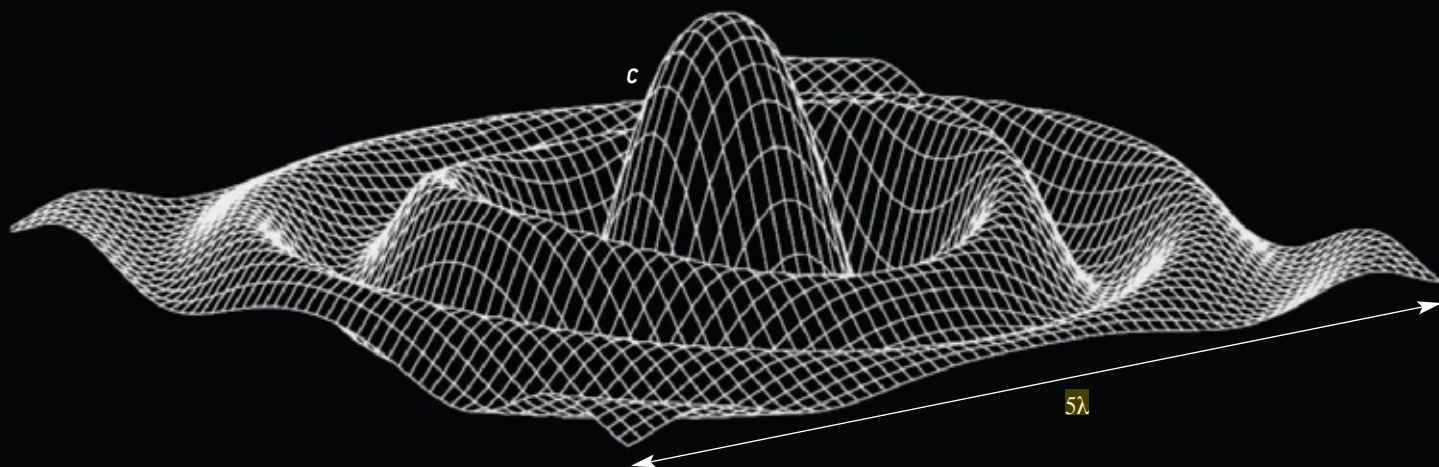


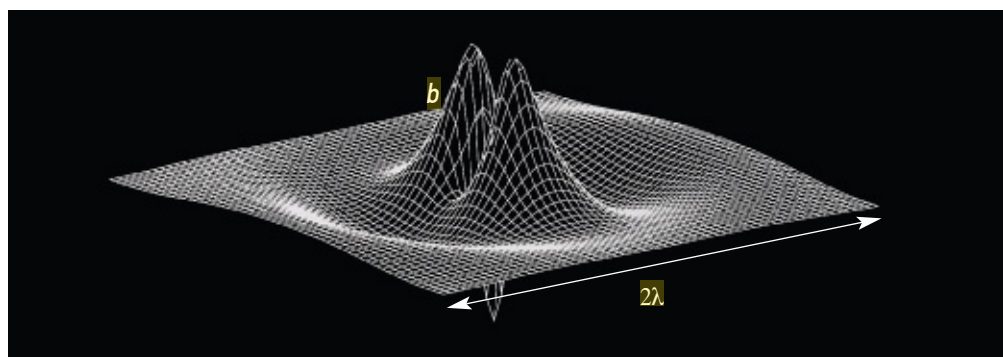


tion spatiale visible dans une image produite avec des ondes. On parle de limite de diffraction ; celle-ci est liée au fait qu'on ne peut pas confiner spatialement une onde sans influencer sur sa propagation, ce qui est le fondement même du phénomène de diffraction (voir l'encadré page 52). En conséquence, 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.

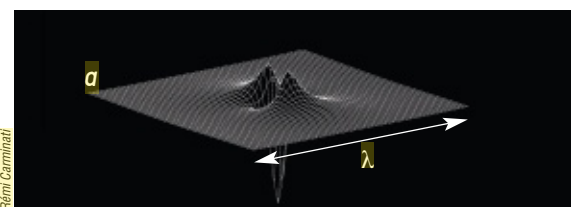
Pour améliorer la résolution spatiale d'un système d'imagerie, il faut rendre visibles des structures spatiales plus petites que λ dans la distribution d'intensité collec-



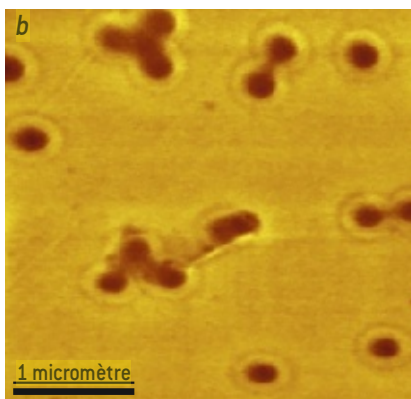
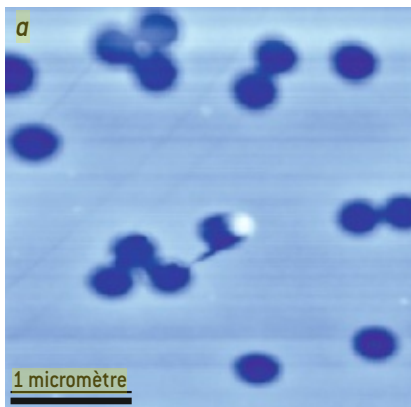
tée. La physique des ondes offre cette possibilité, par le biais du profil d'intensité lumineuse dans la zone dite de champ proche. Dans cette zone, certaines ondes créées par l'objet peuvent produire des variations spatiales d'intensité bien inférieures à $\lambda/2$ (voir la figure 1). Mais ces ondes 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.



2. UN FILM MÉTALLIQUE percé de nanocraatères et déposé sur un substrat de verre est observable en microscopie optique en champ proche. On a enregistré une image topographique (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 marron). 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'éclairent. 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 évanescentes 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'intensité 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-résolues : la sonde locale détecte les variations spatiales de l'intensité des ondes évanescentes, 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 comprise 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 maintenir cet objet diffusant à une distance nanométrique de la surface d'un échantillon éclairé par un laser et en contrôler précisément la position pour balayer toute la zone. Optiquement, le problème est aussi complexe : un objet de taille nanométrique diffuse une lumière dont l'intensité est faible. Cela impose un montage optique collectant bien la lumière diffusée et équipé d'un détecteur 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 proche (ou SNOM pour *Scanning Near-field Optical Microscopy*, voir l'encadré page 54).

Inventé en 1984 par le physicien Dieter Pohl et son équipe dans les laboratoires 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 microscope à force atomique. Tous ces microscopes sont équipés d'une sonde en forme de pointe et on peut contrôler avec une précision inférieure au nanomètre la position de l'échantillon et de la pointe, grâce à des déplacements piézo-électriques commandés 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 microscope optique en champ proche produisent une déflexion du levier qui supporte

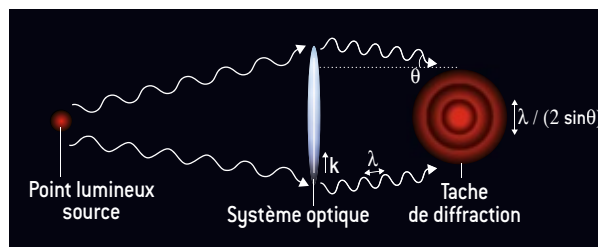
LA DIFFRACTION DE LA LUMIÈRE

Depuis l'invention du microscope 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 instrument d'optique n'est pas un point, mais une tache circulaire nommée tache d'Airy ou de diffraction. Si deux points distincts sont trop rapprochés, leurs images peuvent 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 propagatives, 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'ouverture du système d'imagerie. L'ensemble des vecteurs d'onde transverse accessibles est d'étendue $\Delta k = 4\pi/\lambda \sin\theta$. 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 fondamentale : $\Delta r \Delta k > 2\pi$. 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 longueur d'onde et θ l'angle d'ouverture du système d'imagerie.

ensemble de photons qui se propagent de la source au détecteur, chaque photon a une quantité 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 position et la quantité de mouvement d'une particule. La limite de diffraction apparaît alors comme une conséquence de ce principe, et du fait que l'étendue Δp est limitée par le système d'imagerie.