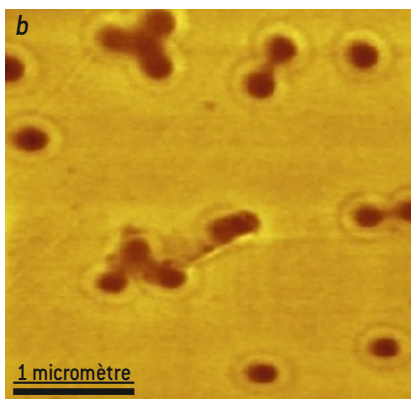
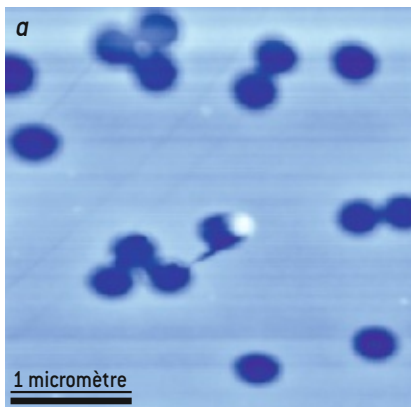




diffusion) des ondes dites propagatives : elles se propagent loin et leur intensité est proportionnelle à celle des ondes qui l'éclairent. Un objet de taille sub-longueur d'onde se comporte donc comme une sonde locale de l'intensité des ondes présentes dans la zone de champ proche, ici les ondes évanescentes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

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 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.

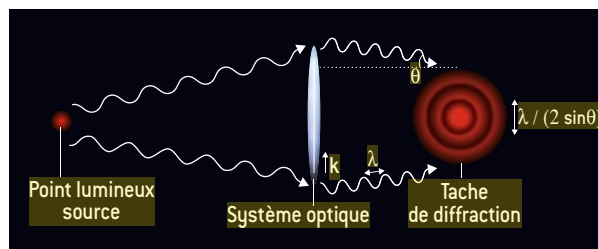
LA DIFFRACTION DE LA LUMIÈRE

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 transverses 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.