



Microscopie en Champ Proche

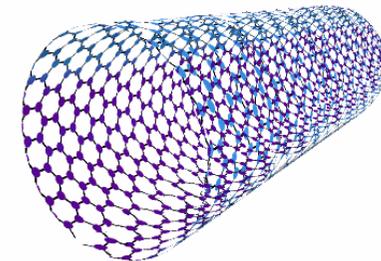
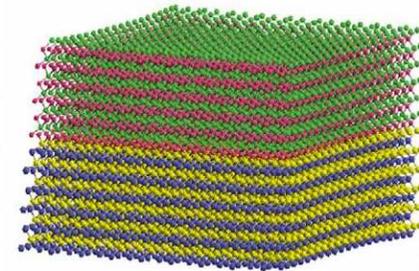
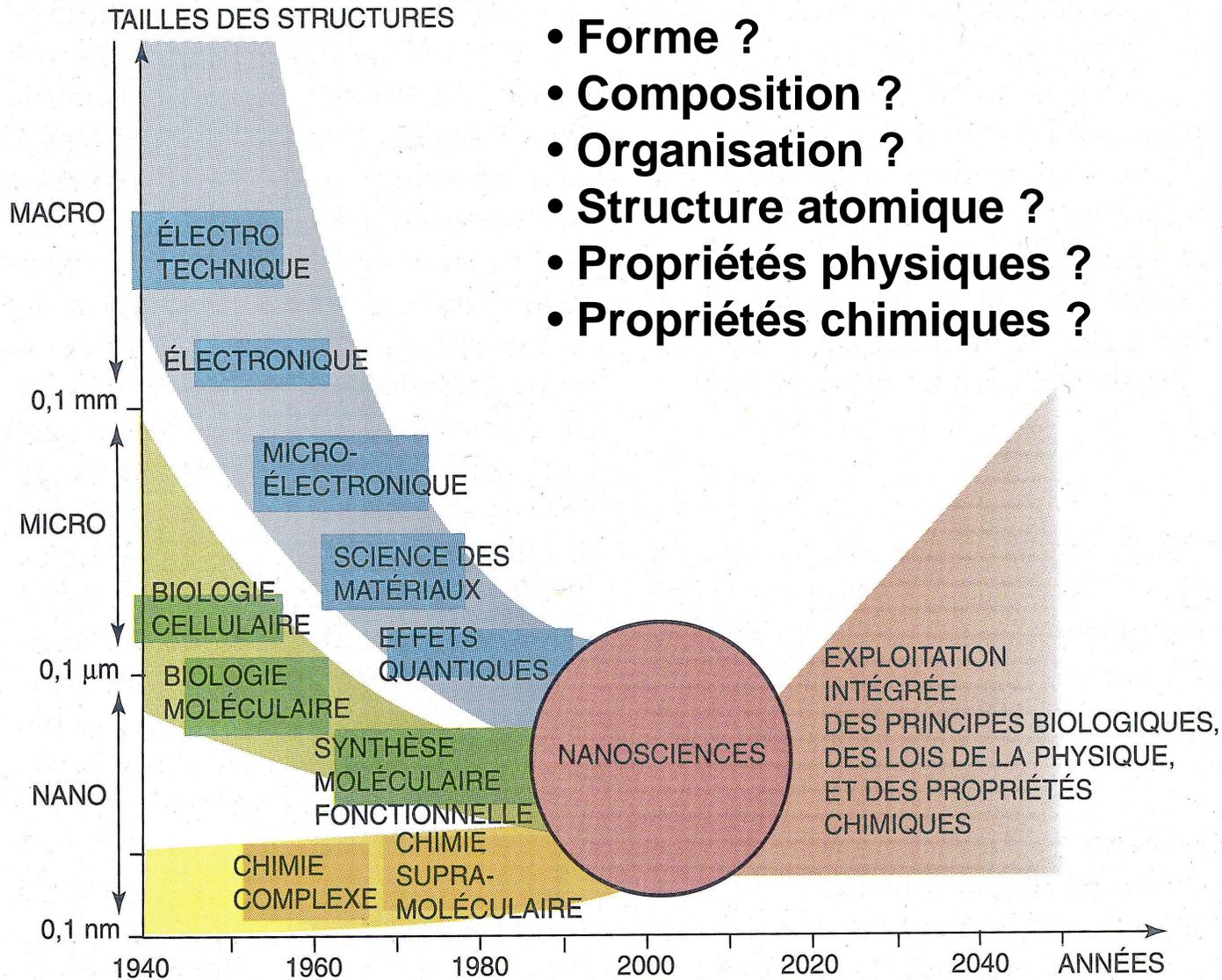


N. Battaglini

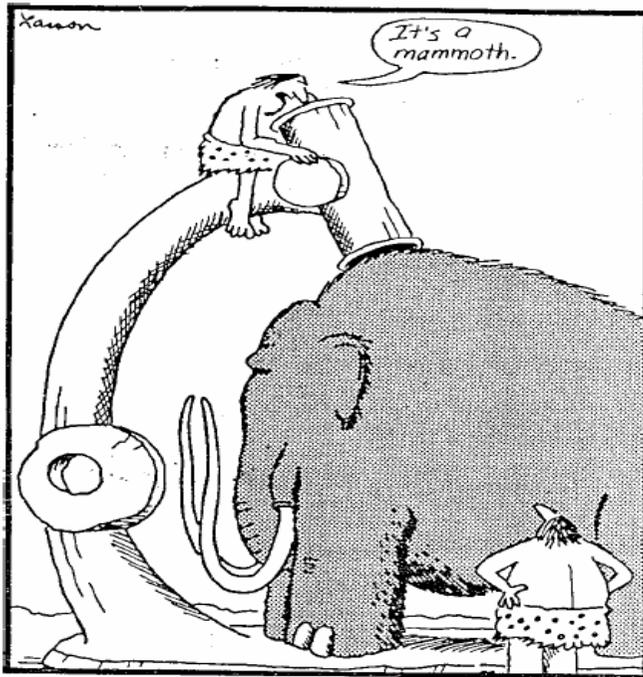
contact : nicolas.battaglini@univ-paris-diderot.fr
bât. Lavoisier bureau 580 ; tél. : 0157278858

« Le nanomonde »

- Taille ?
- Forme ?
- Composition ?
- Organisation ?
- Structure atomique ?
- Propriétés physiques ?
- Propriétés chimiques ?



Microscopie : laquelle ?



Early microscope



microscope Zeiss (1879)

Premier microscope (optique)
~ 1600

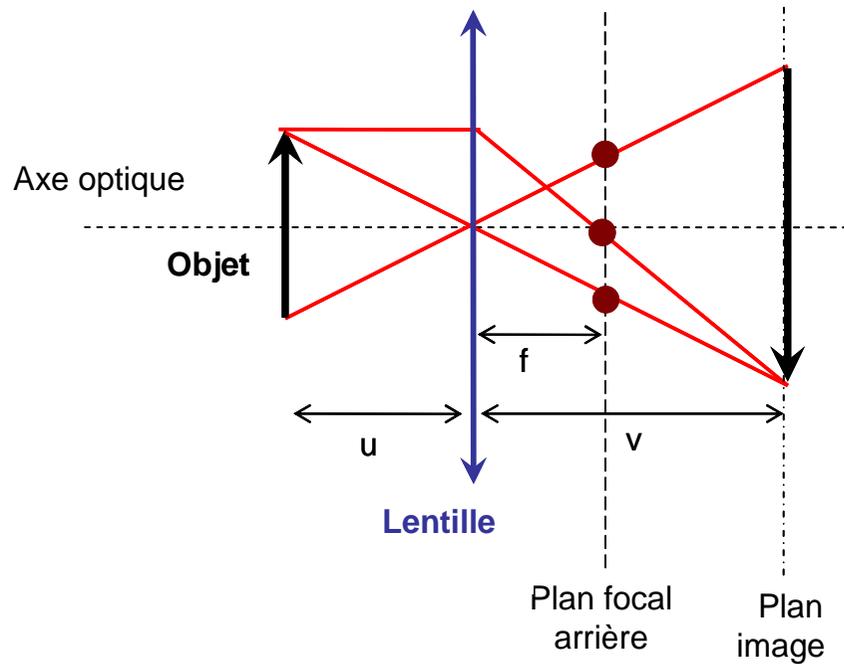
Microscopie photonique

Microscopie à sonde locale

Microscopie électronique

Microscopie optique

image formée par une lentille convergente



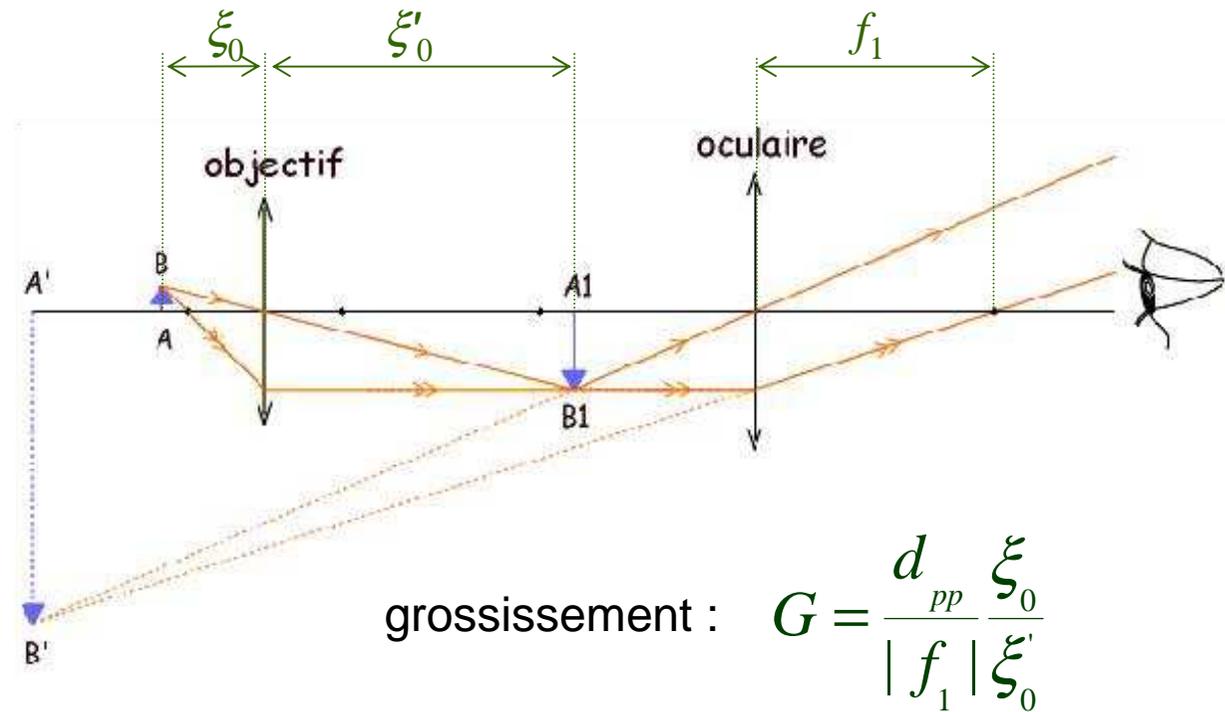
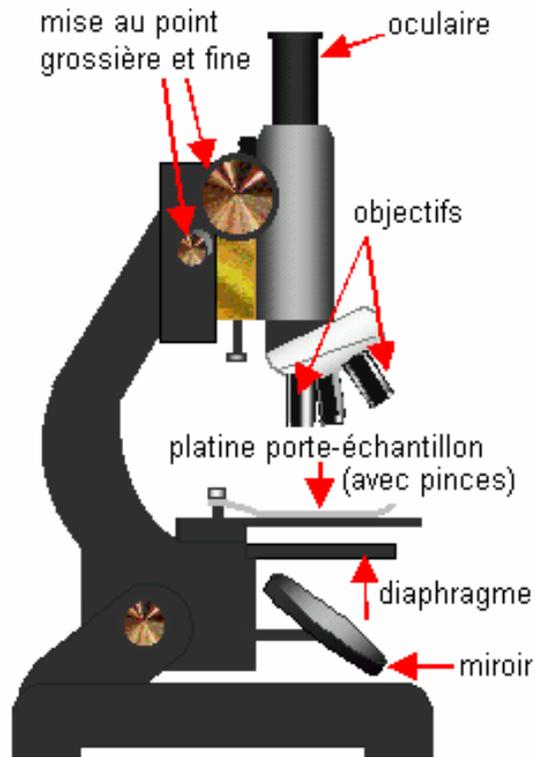
Relation de conjugaison

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$$

Grandissement

$$\gamma = \frac{v}{u}$$

Principe du grossissement d'un microscope optique

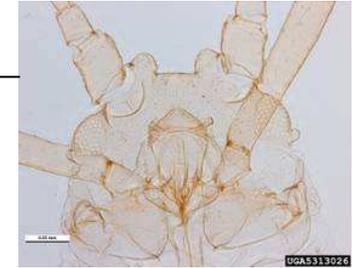


d_{pp} : distance minimale de vision nette de l'œil (*punctum proximum*)

$$d_{pp} = 25 \text{ cm}$$

Techniques de microscopie optique

Microscopie en champ clair



Microscopie en champ sombre
(lumière diffusée par objet transparent)



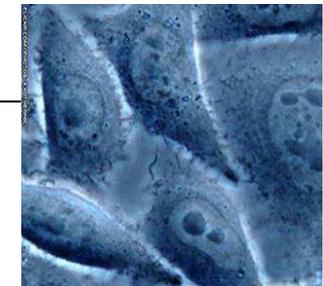
Microscopie en réflexion
(métallographie)



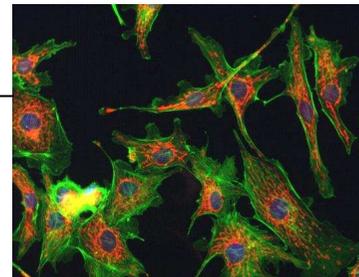
Microscopie en lumière polarisée
(minéralogie)



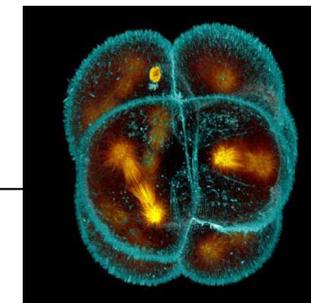
Microscope à contraste de phase
(différence d'indice – échantillons biologiques à faible contraste)



Microscopie de fluorescence
(imagerie des molécules)



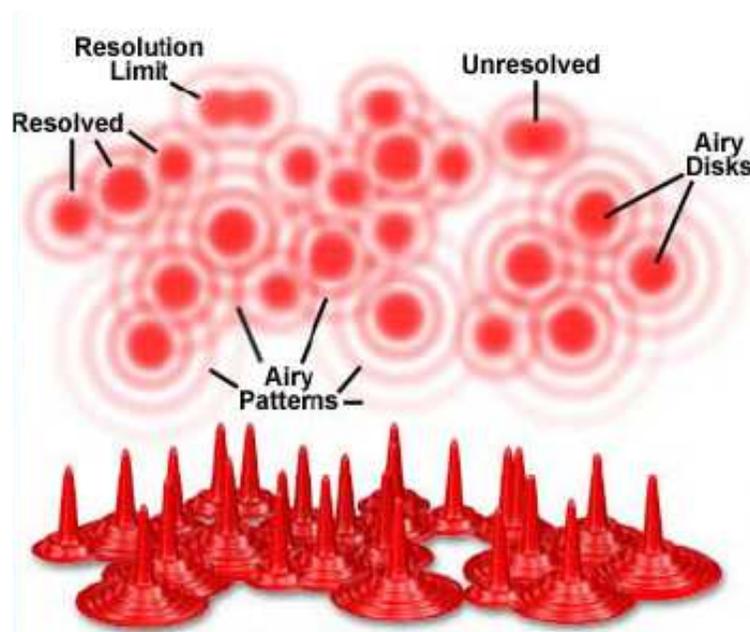
Microscopie confocale
(sonde lumineuse – monofocale et meilleure résolution)



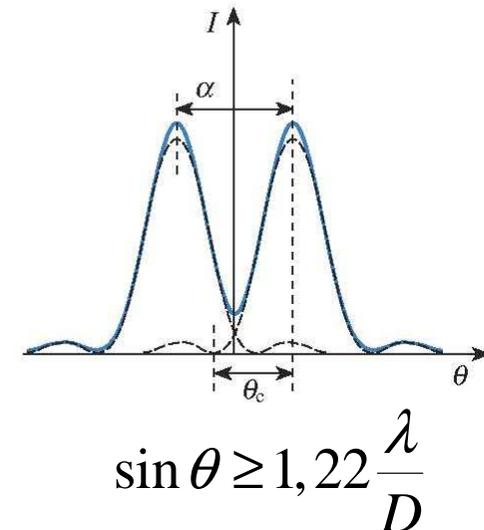
...

La limite de diffraction

La résolution du microscopes optique (R) est limitée par la longueur d'onde de la lumière visible



Critère de Rayleigh



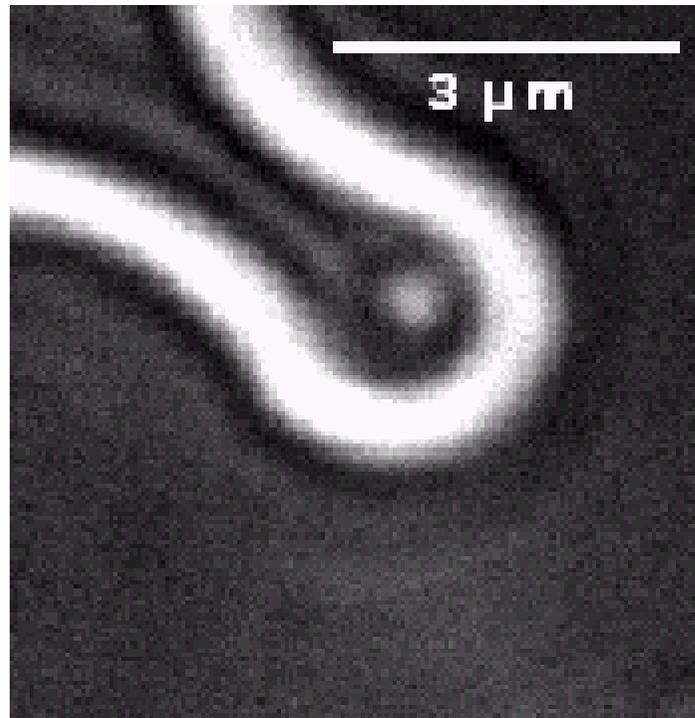
$$\text{Ernst Abbe (1872)} R \approx \frac{1,22 \lambda}{2n \sin \alpha} = k \frac{\lambda}{NA}$$

$$k \in [0,6 - 0,8] \quad R \approx \frac{\lambda}{2}$$

Lumière visible : $R_{\min} \approx 200 \text{ nm}$

Microscopie optique ultime

- microscopie optique confocale avec objectif à immersion ("Solid Immersion Lens" – SIL)
- laser 400 nm



Résolution mesurée : 160 nm

Au-delà de la limite de diffraction

- Vertico SMI – Microscopy
- Stimulated emission depletion microscopy
- Wide-field structured-illumination microscopy
- Stochastic optical reconstruction microscopy
- Fitting the point-spread function
- ...

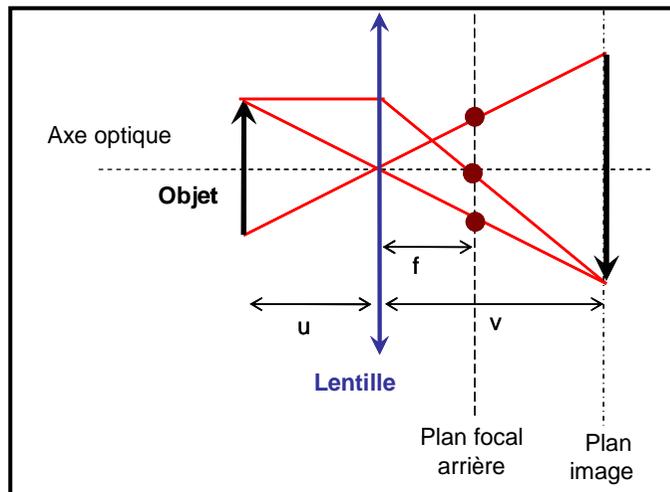
Microscopie électronique

Dualité onde – corpuscule des électrons (L. De Broglie, 1924)

$$\lambda(\text{nm}) \approx \frac{1,23}{\sqrt{E(\text{eV})}}$$

$$\begin{aligned} 100 \text{ kV} &\rightarrow 3,86 \text{ pm} \\ 300 \text{ kV} &\rightarrow 2,22 \text{ pm} \\ 1000 \text{ kV} &\rightarrow 1,22 \text{ pm} \end{aligned}$$

Conception des lentilles électroniques (Hans Busch, 1926)



$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$$

Relation de conjugaison

$$\gamma = \frac{v}{u}$$

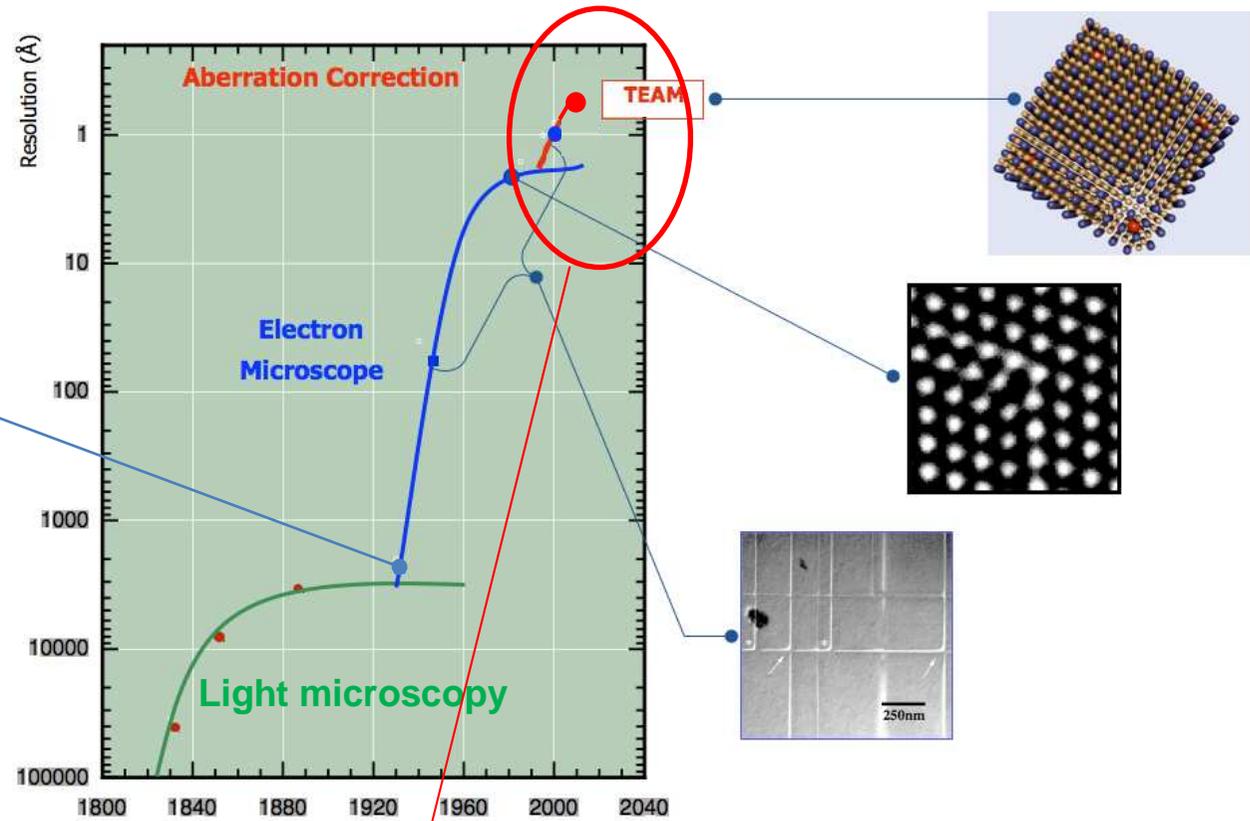


$$\frac{1}{f} = \frac{e^2}{4mv^2} \int_{L1}^{L2} B^2(z) dz$$

Évolution de la microscopie en champ lointain

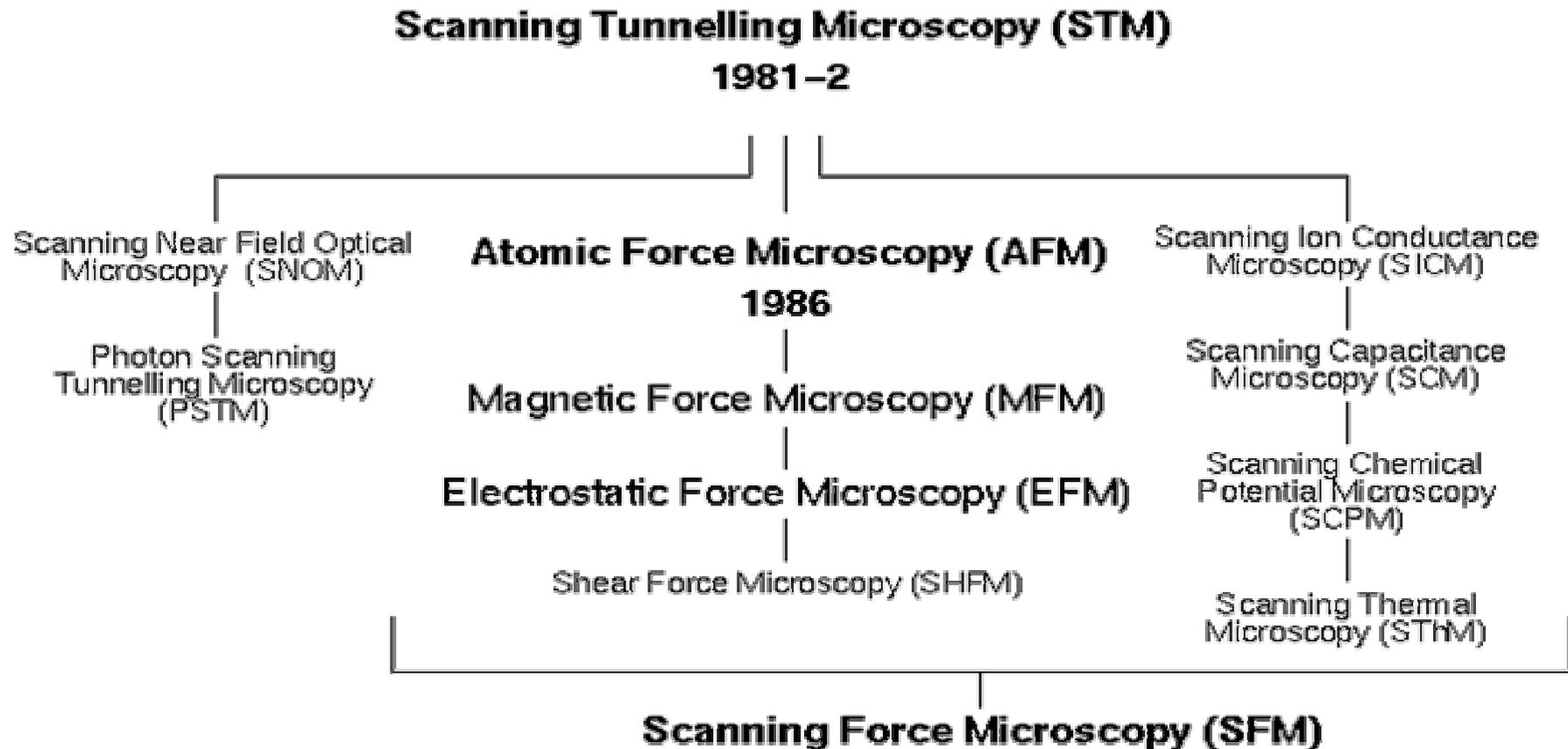


Ernst Ruska et Max Knoll (1933)
Ruska Prix Nobel, 1986



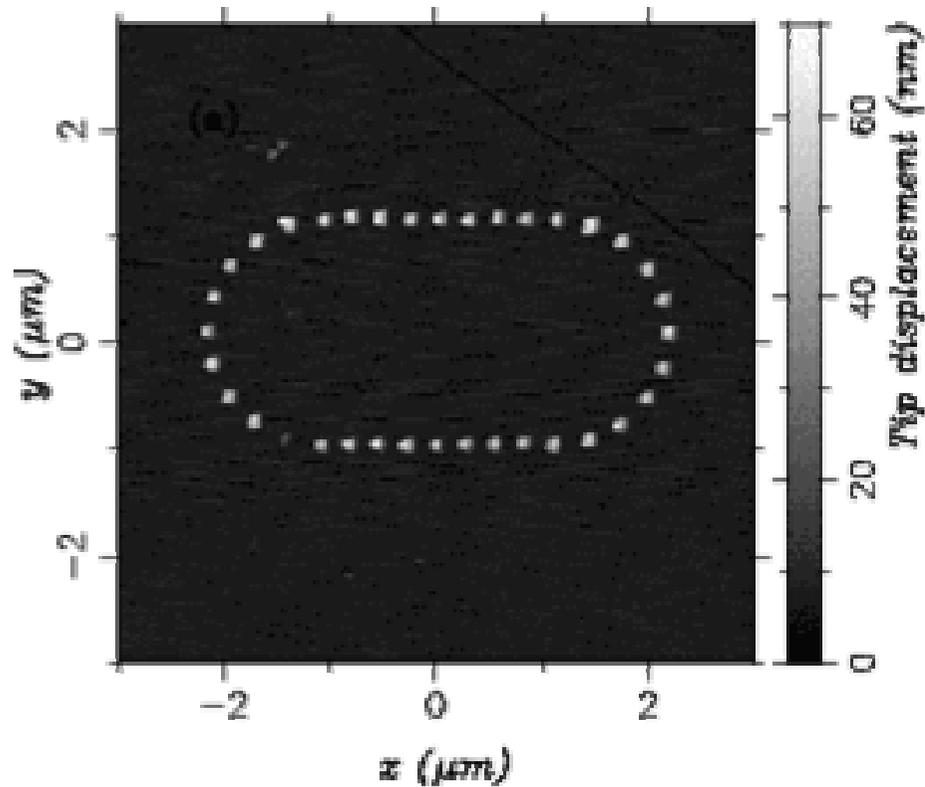
Microscopies à champ proche

La (grande) famille des microscopes à sonde locale

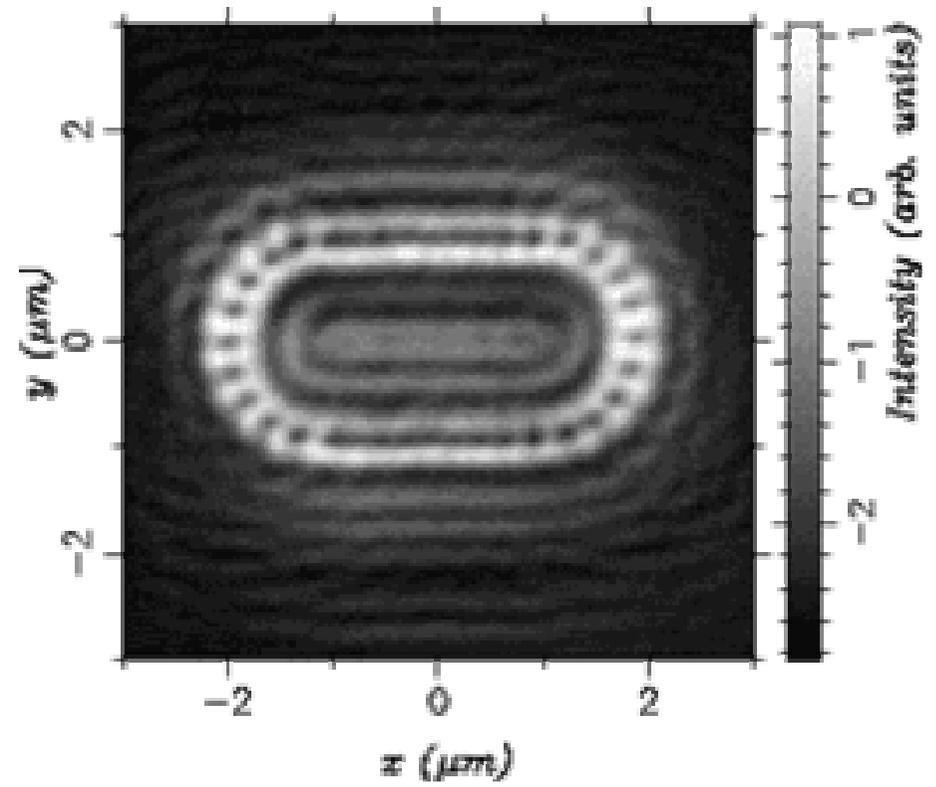


Microscopie en champ proche

Structure artificielle formée de plots d'or – diamètre 100 nm



AFM

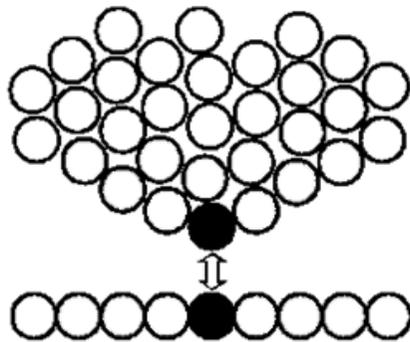
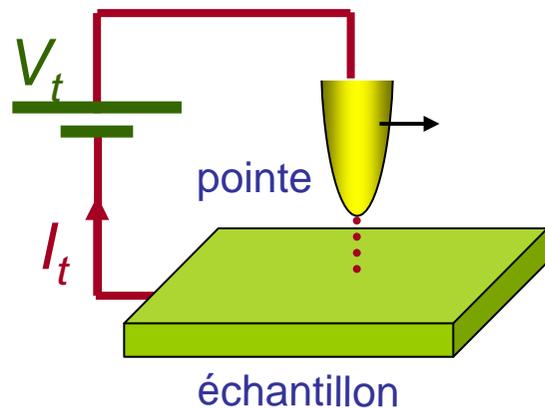


SNOM (543 nm)

Meilleure résolution qu'en champ lointain MAIS qu'observe t-on ???

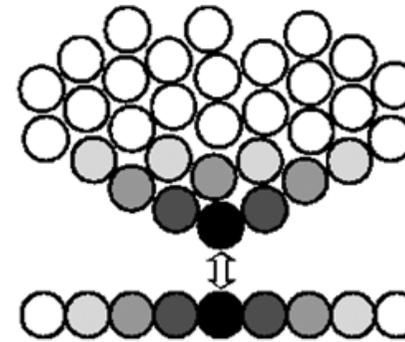
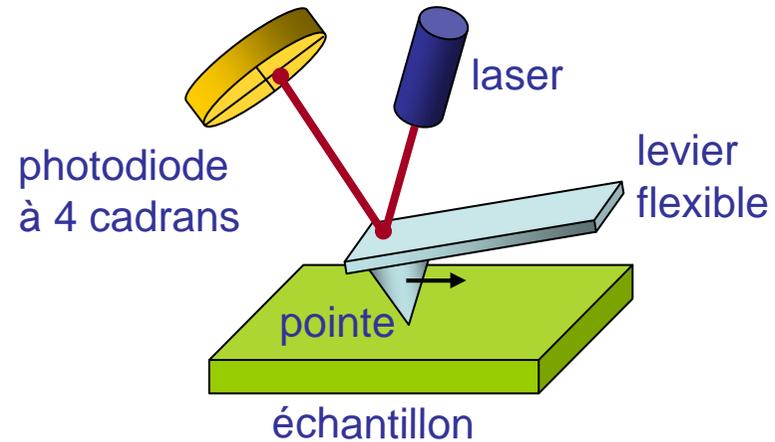
SPM les plus populaires

Scanning Tunneling Microscope



effet tunnel électronique entre une pointe conductrice et une surface conductrice
=> mesure d'un courant

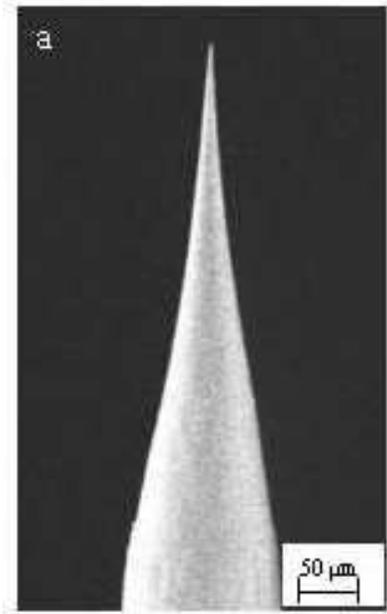
Atomic Force Microscope



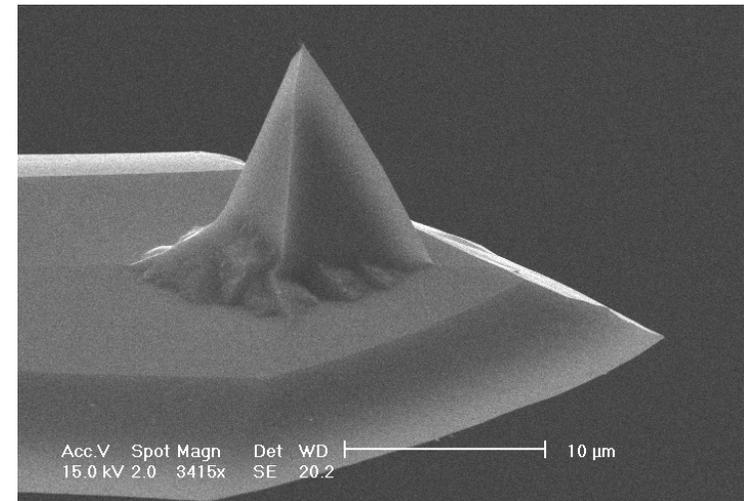
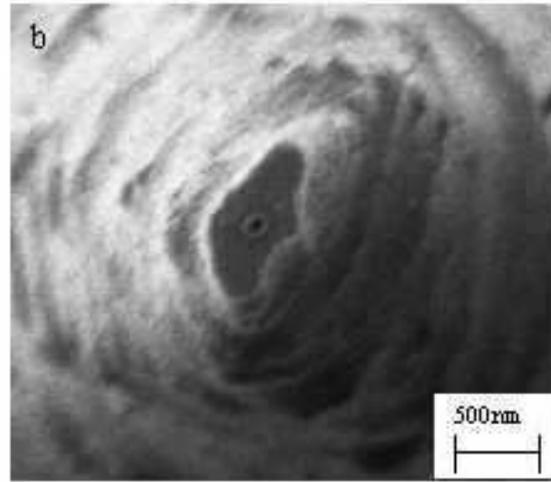
interactions à (relativement) courte portée entre la sonde et la surface
=> mesure de forces (van der Waals, électrostatique, magnétostatique...)

Microscopies de pointes

Sondes locales

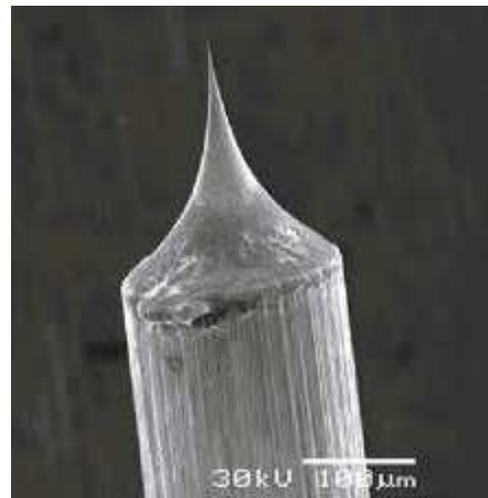


SNOM



AFM

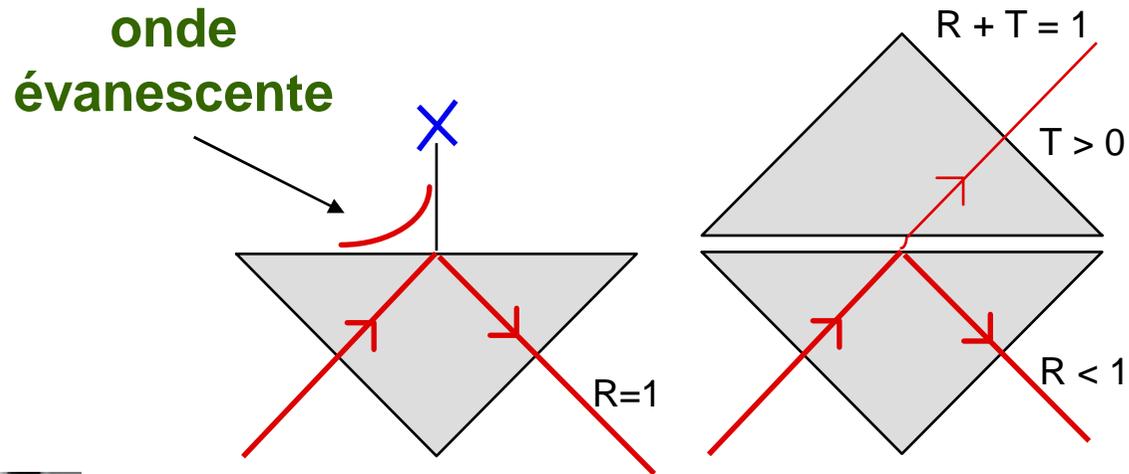
STM



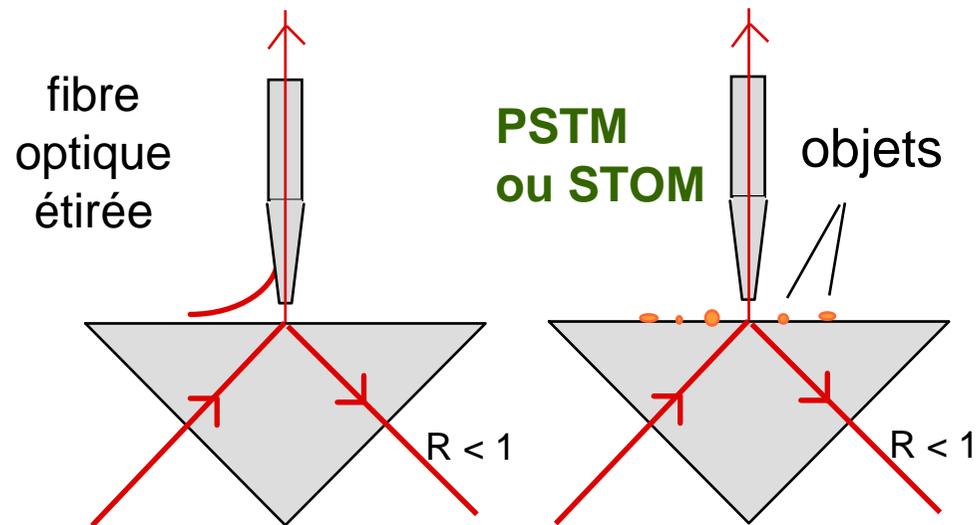
Le Microscope à champ proche optique

Effet Tunnel Optique

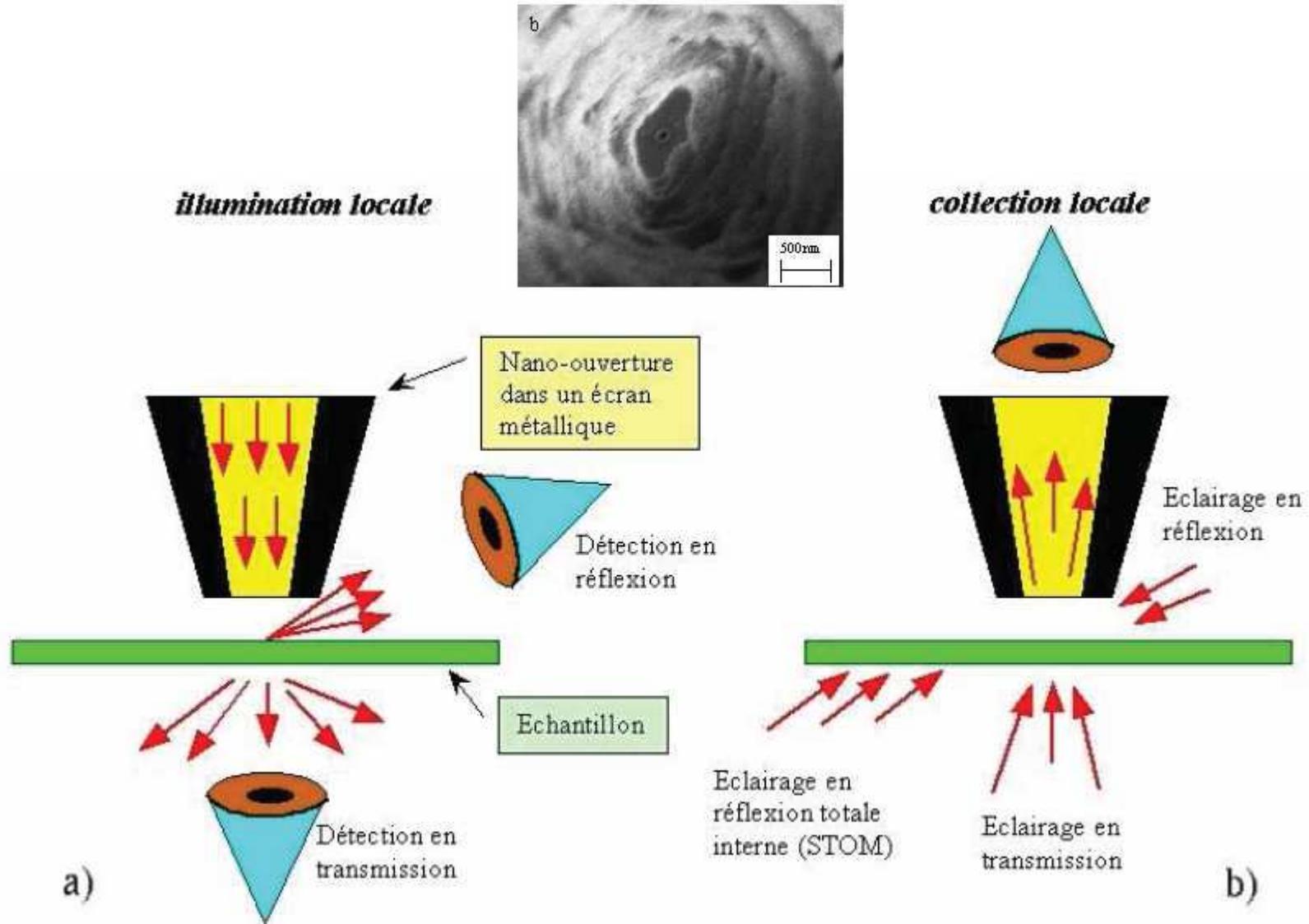
Réflexion totale frustrée – Newton (1642-1727)



100 μm



SNOM à ouverture (fibre optique métallisée)

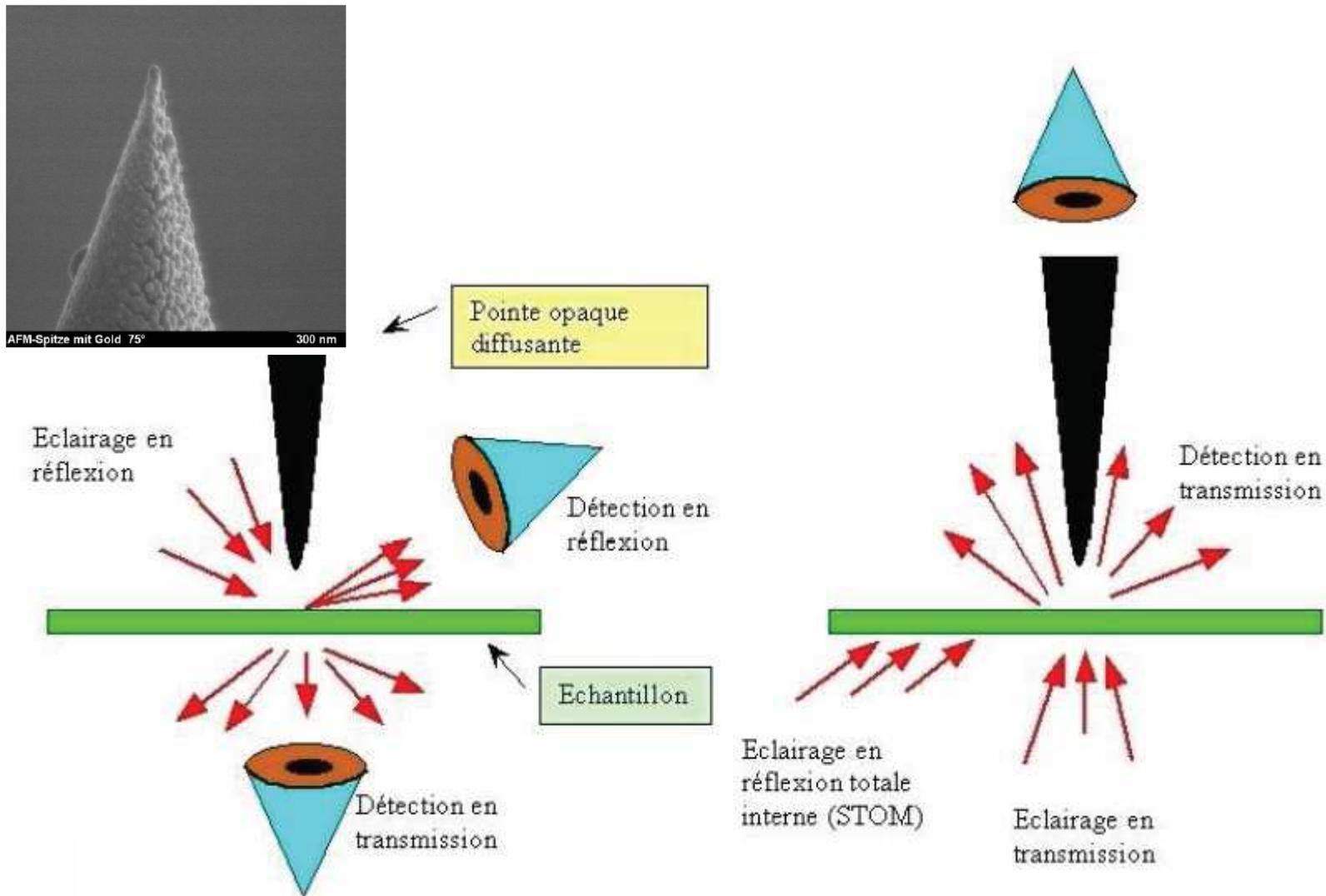


Résolution : $\frac{\lambda}{20}$

i.e. 25 nm à $\lambda = 488$ nm

SNOM sans ouverture ("apertureless")

Sonde nanométrique métallique ou semiconductrice



Résolution : 20 à 30 nm

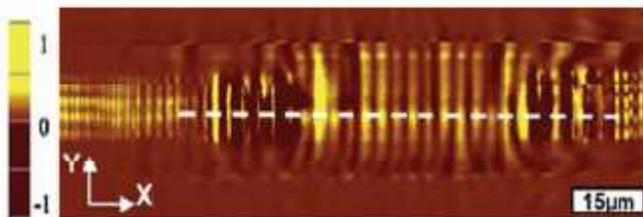
Cartographie du champ proche optique

Réseau de nanostructures
métalliques sur
semiconducteur

AFM (topographie)

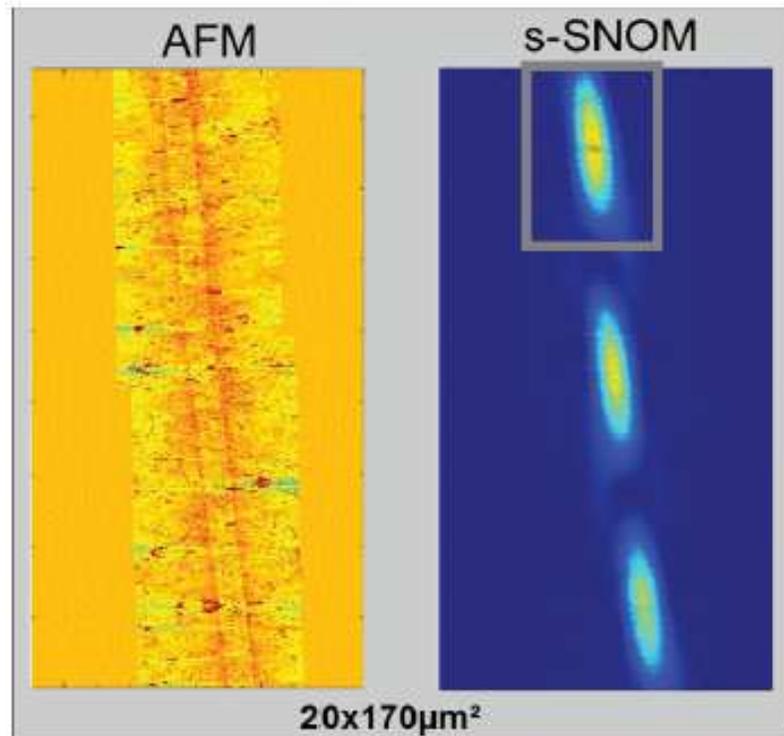


SNOM à $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$



Babuty et al.
PRL 104 226806 (2010)

Guide droit multimode



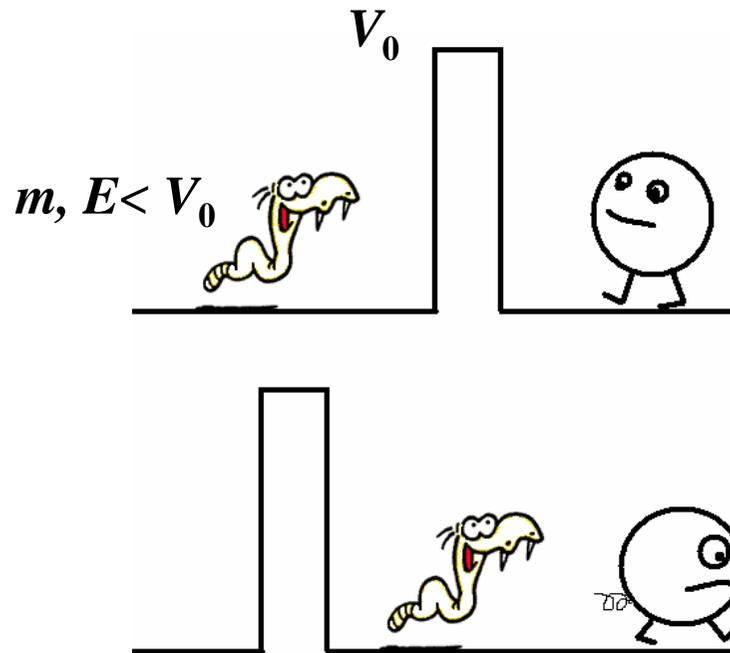
$\lambda \sim 633\text{nm}$

Remarque

Il est également possible d'analyser très localement la réponse des objets aux excitations de différentes longueurs d'onde (spectroscopie locale)

Le Microscope à Effet Tunnel

Barrière de potentiel quantique



Barrière de potentiel

$$V(z) = \begin{cases} V_0 & \forall 0 < z < s \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases}$$

Équation de Schrödinger

$$\frac{d^2\psi(z)}{dz^2} - \frac{2m}{\hbar^2}(V_0 - E)\psi(z) = 0$$

Probabilité d'effet tunnel de l'électron (masse m , énergie E) :

$$P(E) \propto e^{-2\beta \cdot s} \quad \beta = \sqrt{2m(V_0 - E) / \hbar^2}$$

TD

Évaluation de la résolution du microscope à effet tunnel

On considère deux plaques métalliques de même composition chimique parallèles entre elles et séparées l'une de l'autre par un intervalle vide d'épaisseur s . Le métal constituant les deux plaques est caractérisé par son énergie de Fermi E_F et son énergie d'extraction ϕ . On applique une différence de potentiel entre les deux plaques de telle manière que l'une des deux plaques est au potentiel 0, l'autre au potentiel $V > 0$, et le champ électrique \mathcal{E} régnant dans l'intervalle est uniforme.

1. Représenter la position des niveaux de Fermi ainsi que la variation du niveau du vide quand on passe d'une plaque à l'autre en parcourant l'axe z (dans l'hypothèse $eV < E_F$).
2. Évaluer le nombre n d'électrons par unité de volume qui, situés dans une des plaques, ont l'énergie suffisante et la direction satisfaisante pour pouvoir occuper des places disponibles dans l'autre plaque. On se place dans les hypothèses simplificatrices suivantes : $T = 0K, eV \ll E_F$. On devra donc évaluer la densité électronique contenue dans une fraction $\Delta\Omega$, de la couronne sphérique comprise entre deux sphères de rayon k_{F_1} et k_{F_2} avec $\Delta\Omega = \frac{1}{6}$ sterad. (valeur arbitraire)

.../...

3. En fait, la probabilité $T(E)$ pour que de tels électrons traversent la barrière de potentiel située dans l'intervalle $0 \leq z \leq s$ est donnée en mécanique quantique par l'expression (approximation W.K.B.) : $T(E) = e^{-a}$ avec $a = 2 \int_0^s |\beta(z)| dz$ dans laquelle $|\beta(z)|$ représente le vecteur d'onde (imaginaire) de l'électron en un point z situé dans la barrière. En considérant que les électrons passant de l'électrode 1 à l'électrode 2 ont une composante $k_z \approx k_F$, montrer que $T(E)$ prend la forme $T(E) = e^{-2k_0s}$. Expliciter k_0 .
4. En déduire l'expression de la densité de courant j_z circulant entre les deux électrodes et montrer qu'elle prend la forme $j_z = AVe^{-2k_0s}$. Expliciter A .
5. Application numérique : $\phi = 0,5\text{eV}$; $E_F = 5\text{eV}$; $V = 0,05\text{V}$; $s = 5\text{\AA}$. Quelles sont les valeurs numériques prises par $2k_0$ (en \AA^{-1}), A (en $\Omega^{-1}.\text{m}^{-2}$) et j (en A/cm^2).
6. En fait, l'une des électrodes est constituée d'une pointe très fine (terminée par un atome !) sans que cette forme ne modifie sensiblement les résultats ci-dessus. Sachant qu'il est possible de discerner des variations relatives de courant de l'ordre de 10%, évaluer la variation de s , soit Δs susceptible d'être ainsi discriminée (résolution en profondeur du microscope tunnel) pour $s = 5\text{\AA}$.
7. Évaluer la résolution latérale l du microscope sachant que l'essentiel du courant circule (entre la pointe et la deuxième électrode) à l'intérieur de l'angle solide $\Delta\Omega \approx \frac{\pi l^2}{s^2}$.

Données : $e = 1,60 \times 10^{-19}$ C ; $\hbar = 1,05 \times 10^{-34}$ J.S ; $m = 9,10 \times 10^{-31}$ kg