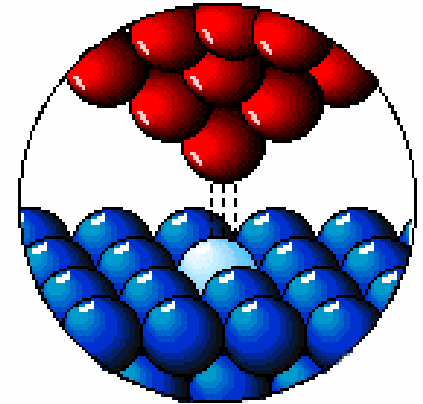


Le microscope à effet tunnel

Principe

Une mince barrière isolante sépare une pointe conductrice d'une surface métallique.

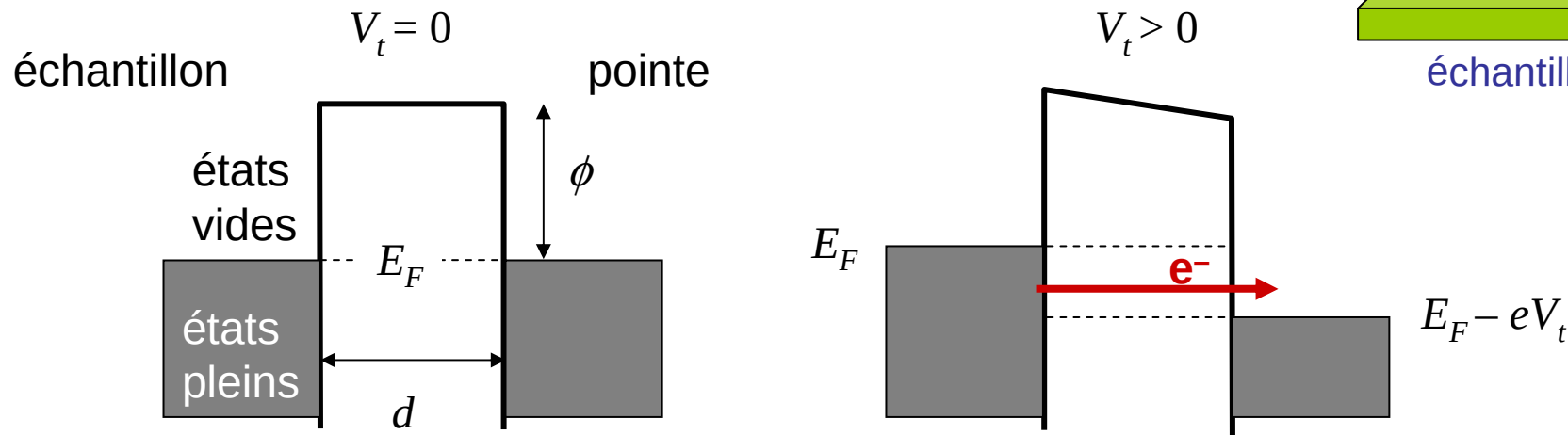
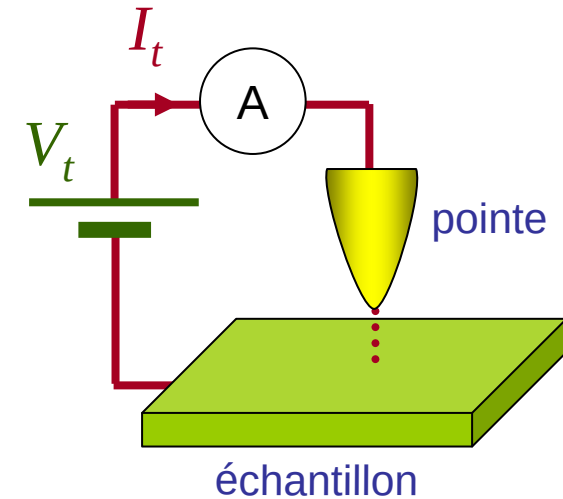
Un courant électrique s'établit par effet tunnel des électrons au travers de la barrière isolante.



L'effet tunnel électronique

Jonction métal-vide-métal

Barrière de potentiel 1D de hauteur ϕ



Approximation $e.V_t \ll \phi$:

$$I_t \propto V_t \underbrace{\rho_S(E_F)}_{\text{LDOS}} \exp(-2\beta d) \quad \text{avec} \quad \beta = \sqrt{2m_e \phi} / \hbar$$

Densité Locale D'États de la surface (**LDOS**): $\rho(E_F) = \frac{1}{eV_t} \sum_{E_n=E_F-eV}^{E_F} |\Psi_n(0)|^2$

Résolution du microscope à effet tunnel

Hypothèses :

- surface : milieu continu axe (Ox)
- pointe : milieu continu triangle équilatéral
- les électrons "tunnellent" verticalement
- ρ_S homogène $\Rightarrow$ courant au point d'abscisse x :

$$dI(x) \sim \exp(-2 \beta z(x))$$

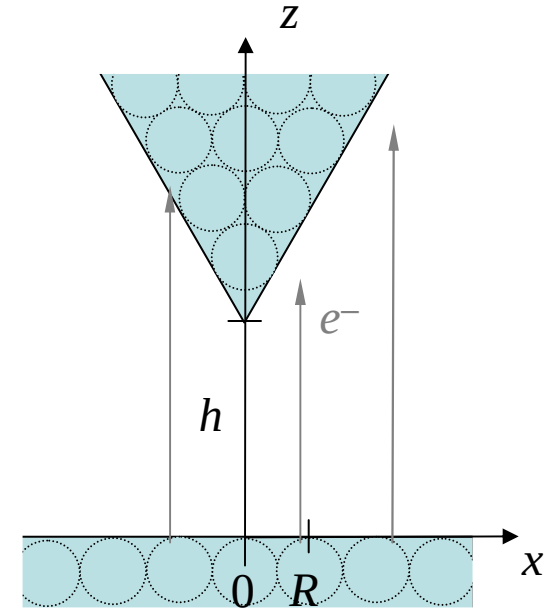
avec $\beta \approx 1 \text{ \AA}^{-1}$ si x et z en $\text{\AA}$ et $z(x) = h + \sqrt{3} x$

$$I_{total} = 2 \int_0^{\infty} \exp(-2 (h + \sqrt{3} x)) dx = \frac{\exp(-2 h)}{\sqrt{3}}$$

$$I_{apex} = 2 \int_0^{R/2} \exp(-2 (h + \sqrt{3} x)) dx = \frac{1 - \exp(-\sqrt{3} R)}{\sqrt{3}} \exp(-2 h)$$

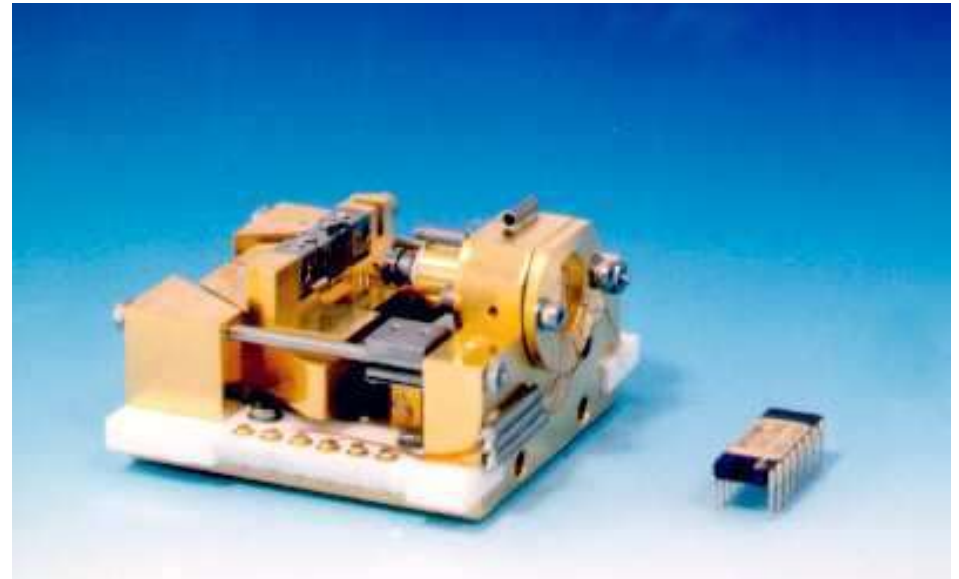
Soit $R \approx 2 \text{ \AA} \rightarrow$

$$I_{apex} = 0,97 \cdot I_{total} \Rightarrow \text{Résolution atomique !!!}$$



L'instrument : STM (*Scanning Tunneling Microscope*)

inventé par
Binnig, Rohrer Gerber, Weibel
en 1982 à IBM Zurich.
pour cette invention → prix
Nobel de Physique en 1986



Capacités du microscope à effet tunnel

Visualisation d'une surface conductrice avec la résolution atomique dans l'espace réel.

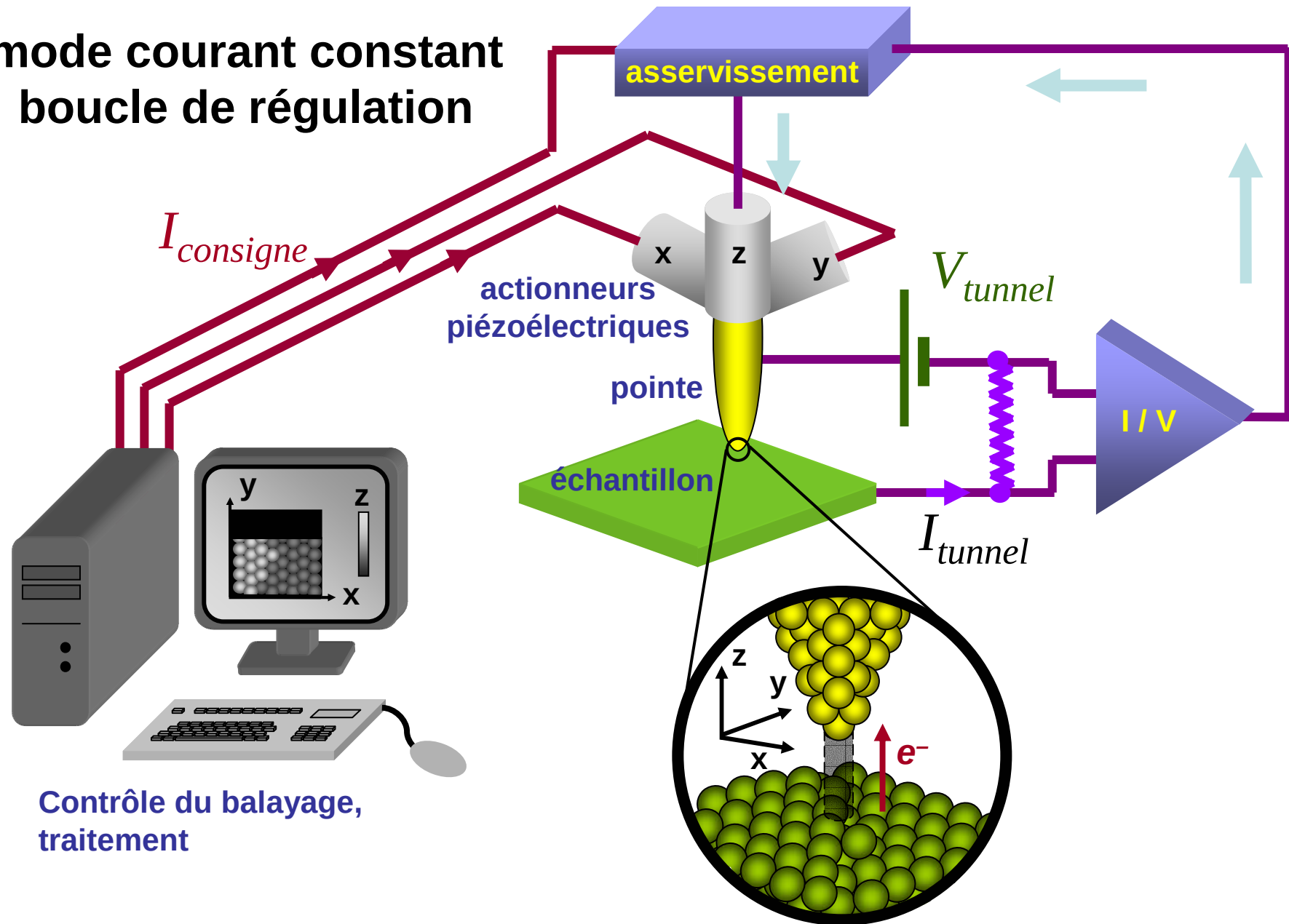
Fabrication de nanostructures par manipulation atomique.

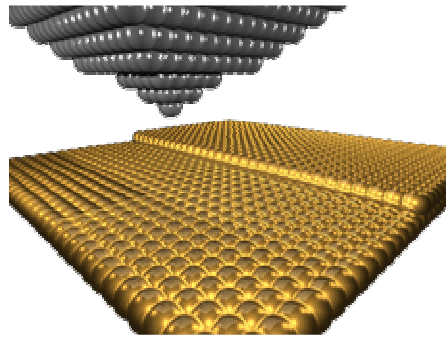
Caractérisation des propriétés électroniques des surfaces et des nanostructures.

Limitation : échantillon conducteur.

Obtention d'une image

mode courant constant
boucle de régulation



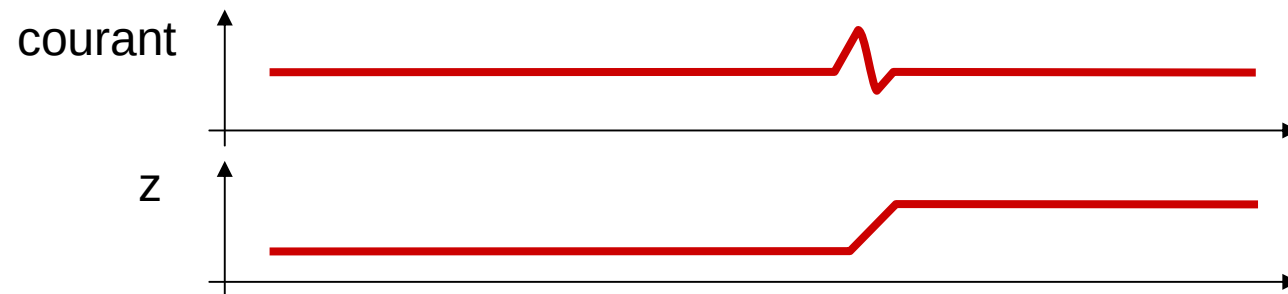
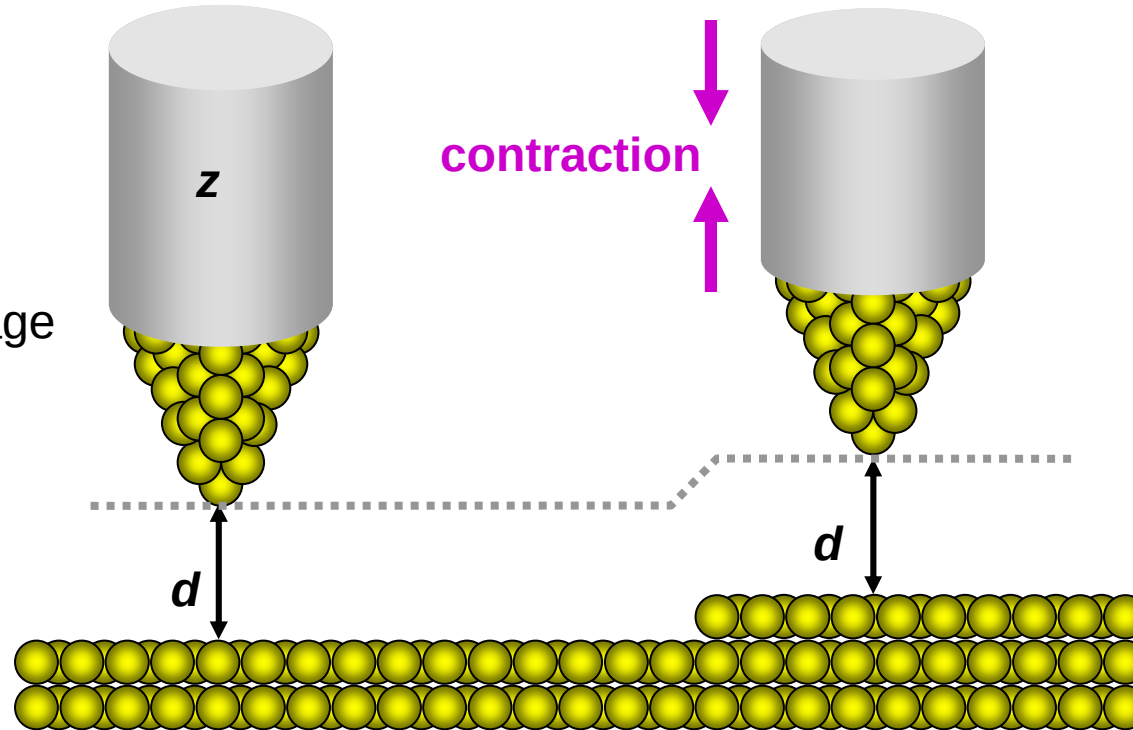


Imagerie à $I_t = \text{cste}$

Franchissement d'une marche atomique

Sens du balayage

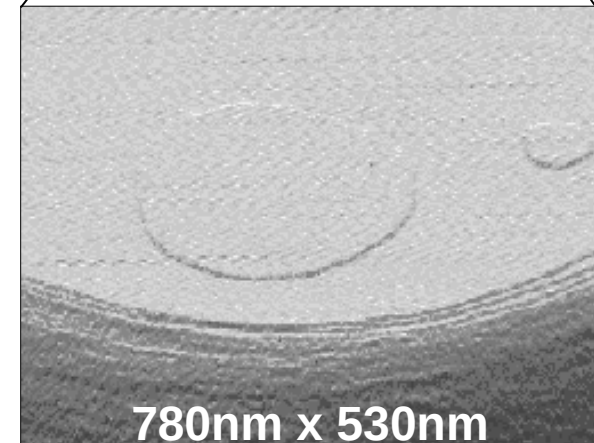
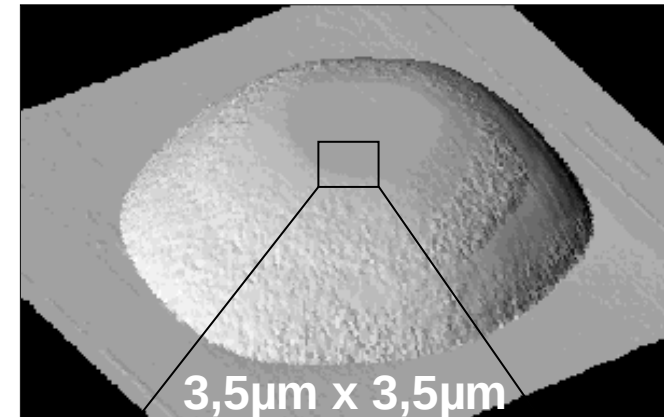
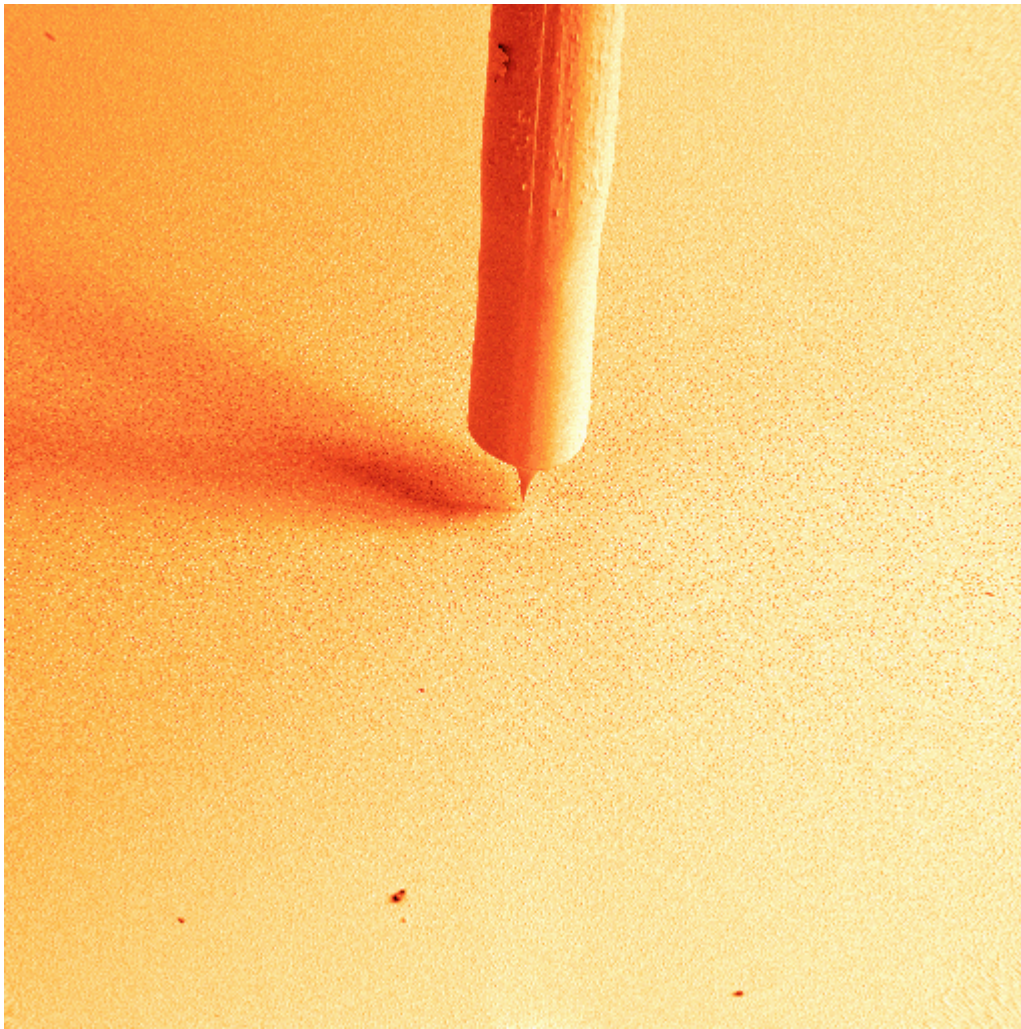
Trajet suivi
par la pointe



Le STM en action

particules de Pb sur surface Ru(001)

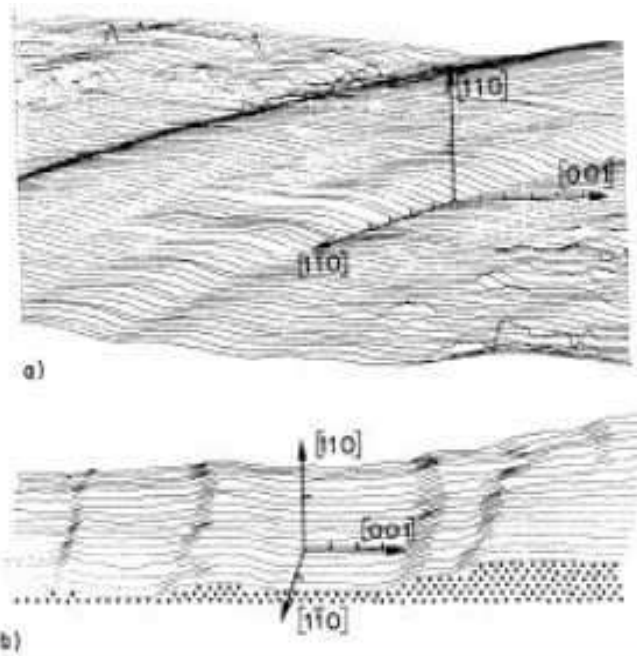
mode courant constant (scan : $6\mu\text{m} \times 6\mu\text{m}$)



marches atomiques

Images STM topographiques d'hier et d'aujourd'hui

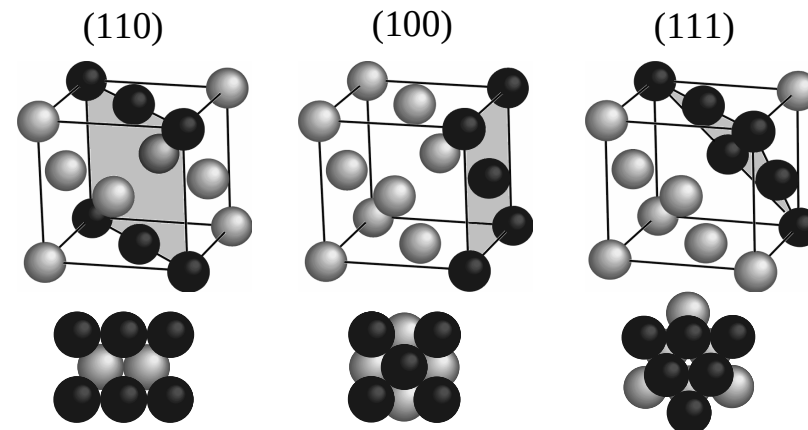
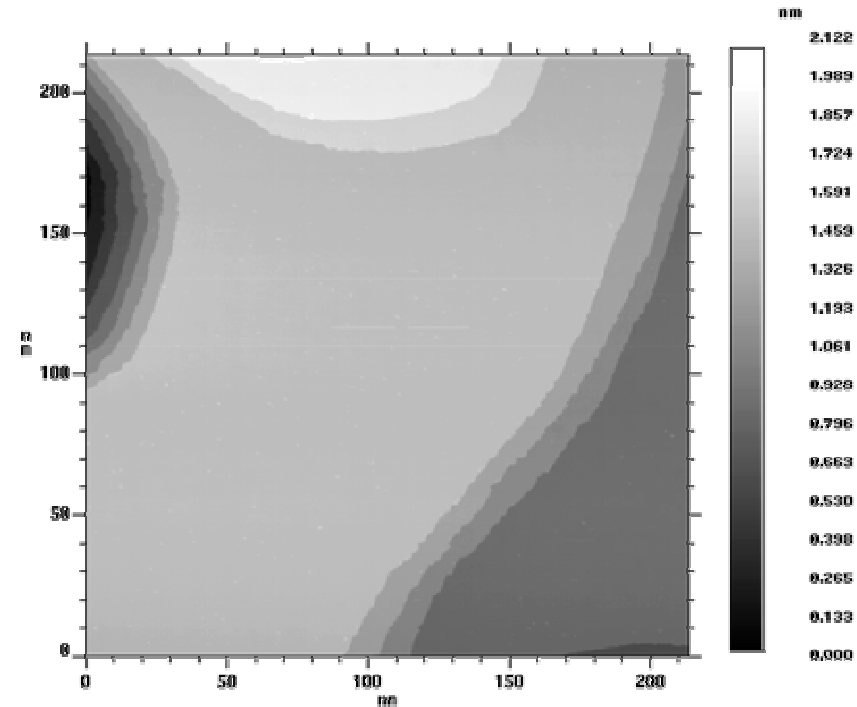
marches atomiques sur Au(110)



*Binnig, Rohrer (IBM Zurich)
Phys. Rev. Lett. 1982*

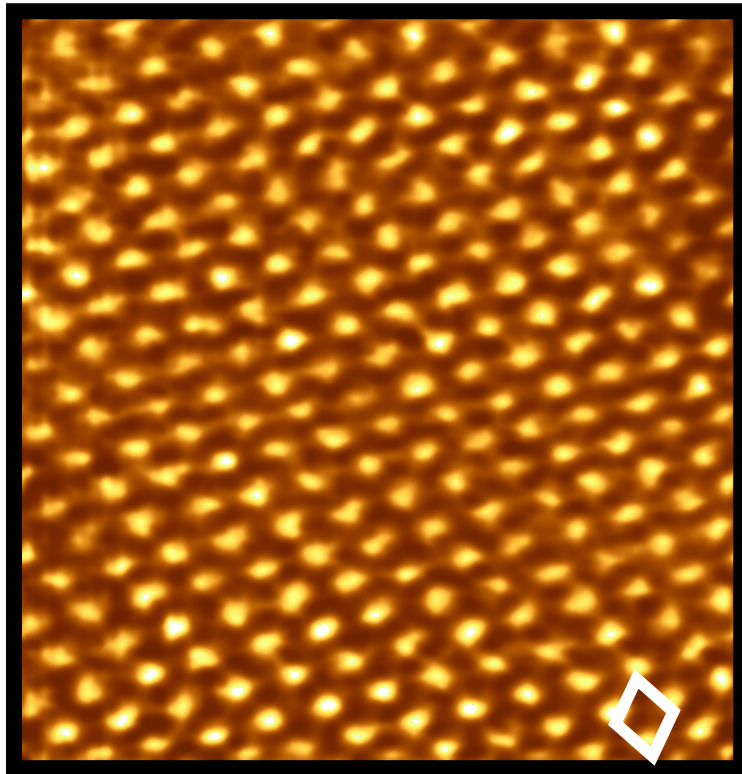
Surfaces planes des cristaux
cubiques à faces centrées

marches atomiques sur Pt(111)



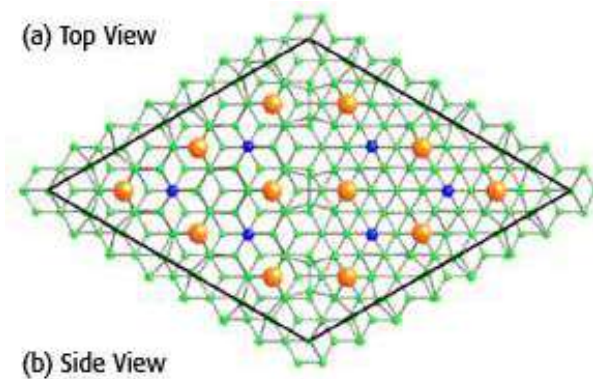
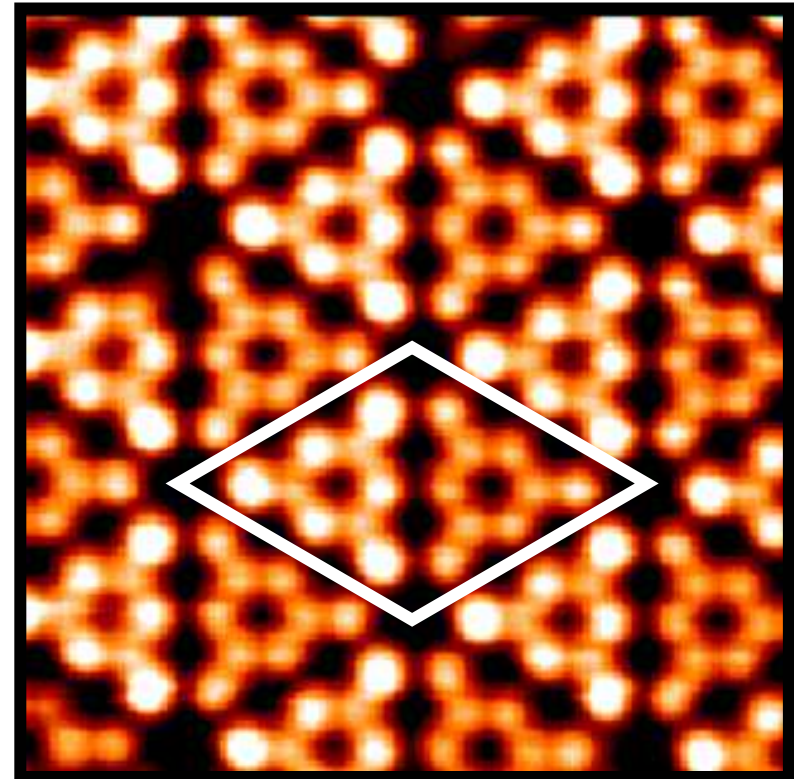
Images en résolution atomique : variations de LDOS

Surface Au(111)



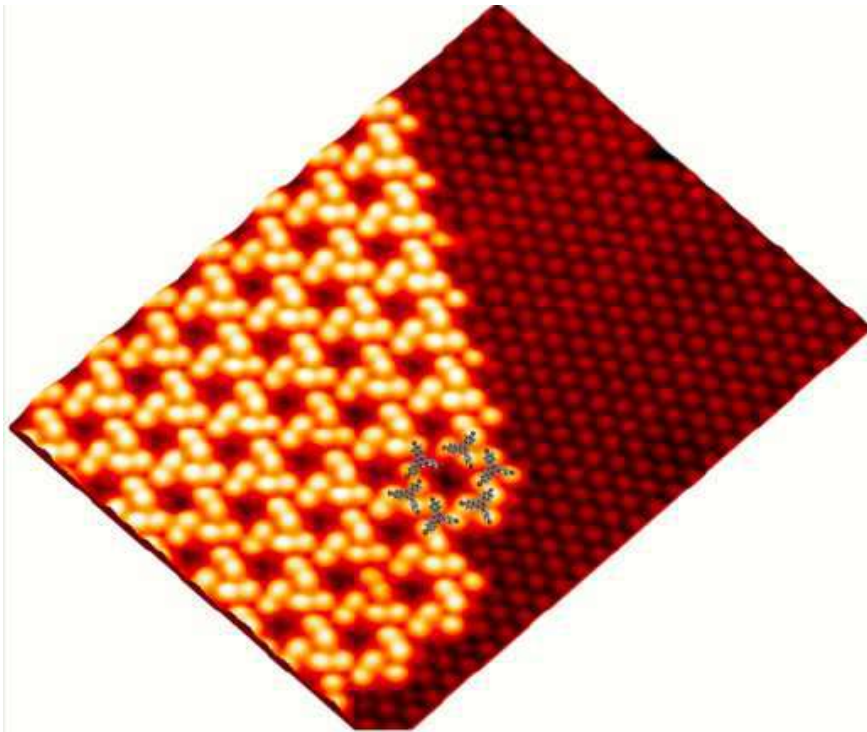
Maille 2,88 Å

Surface Si(111) 7x7



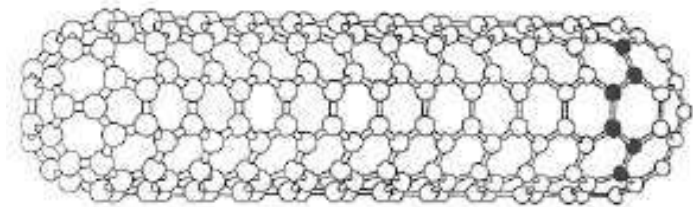
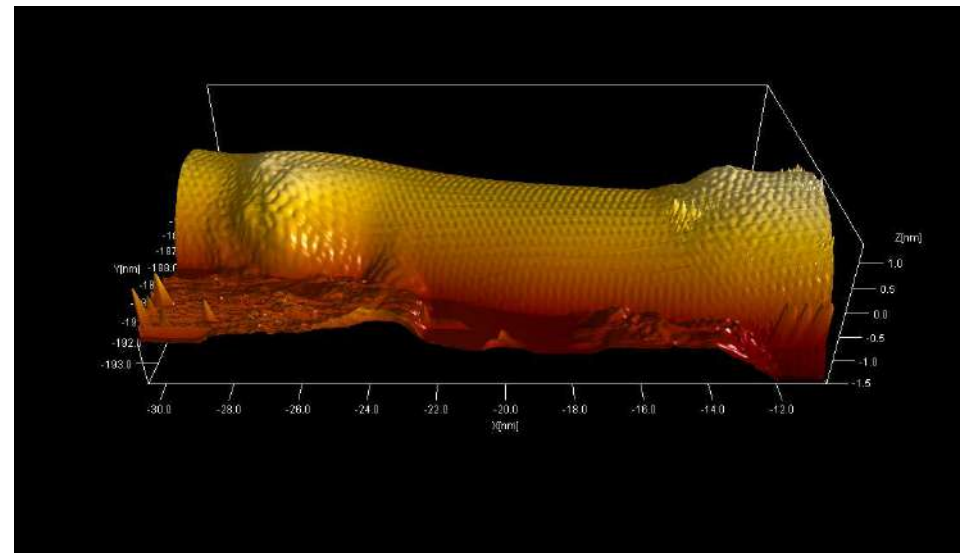
Applications du STM

Auto-assemblage moléculaire



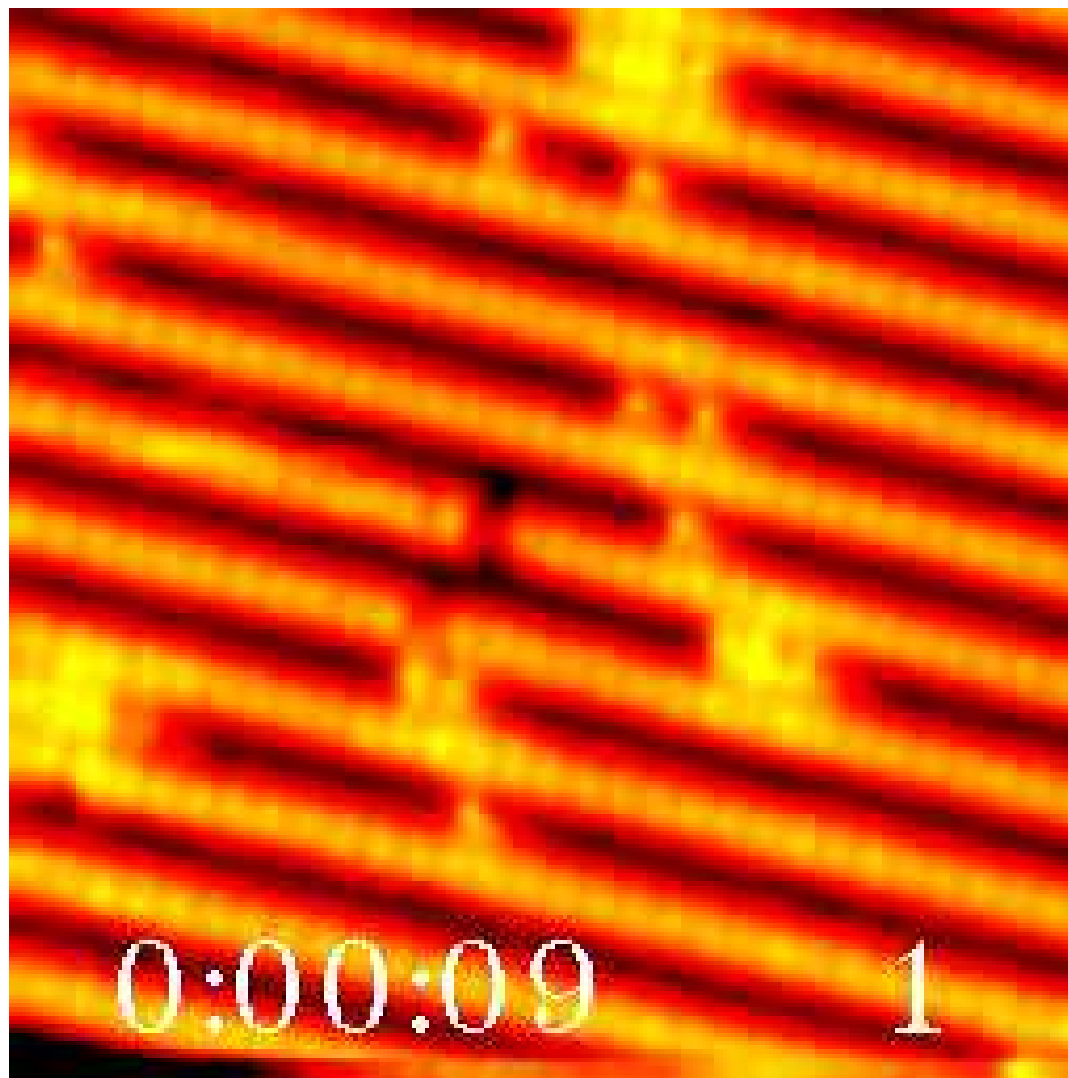
1,3,5-tri(4'-bromophenyl)benzene sur Si(111)
F. Palmino – *Angew. Chem* (2011)

Défauts atomiques dans un nanotube de carbone



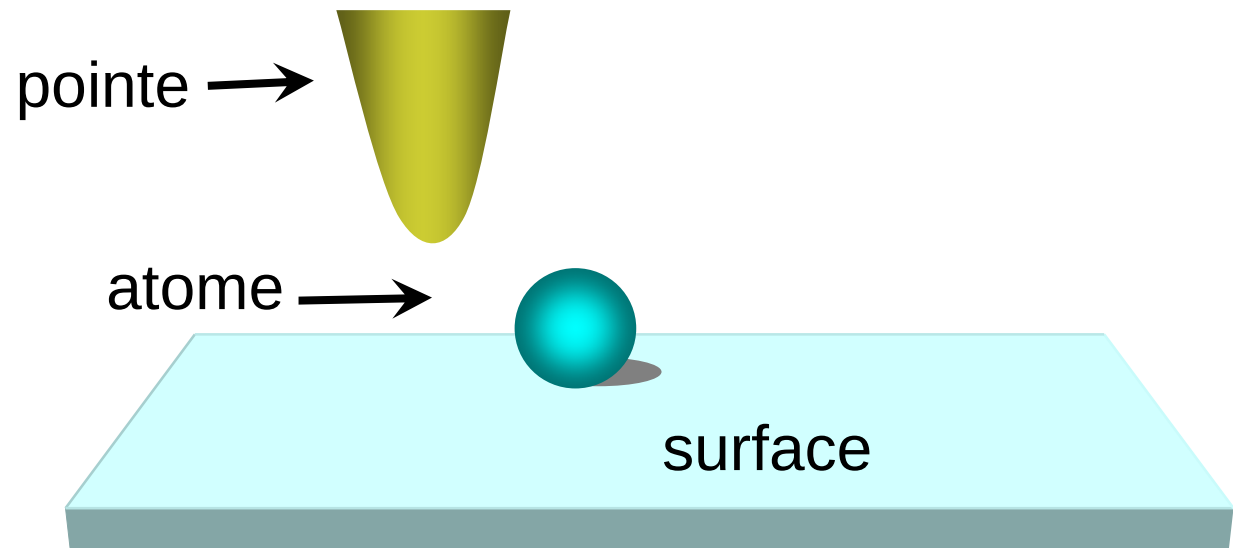
Les atomes en mouvement

Diffusion de Pt sur Pt(110)–(1x2) (4,6x4,6 nm²)

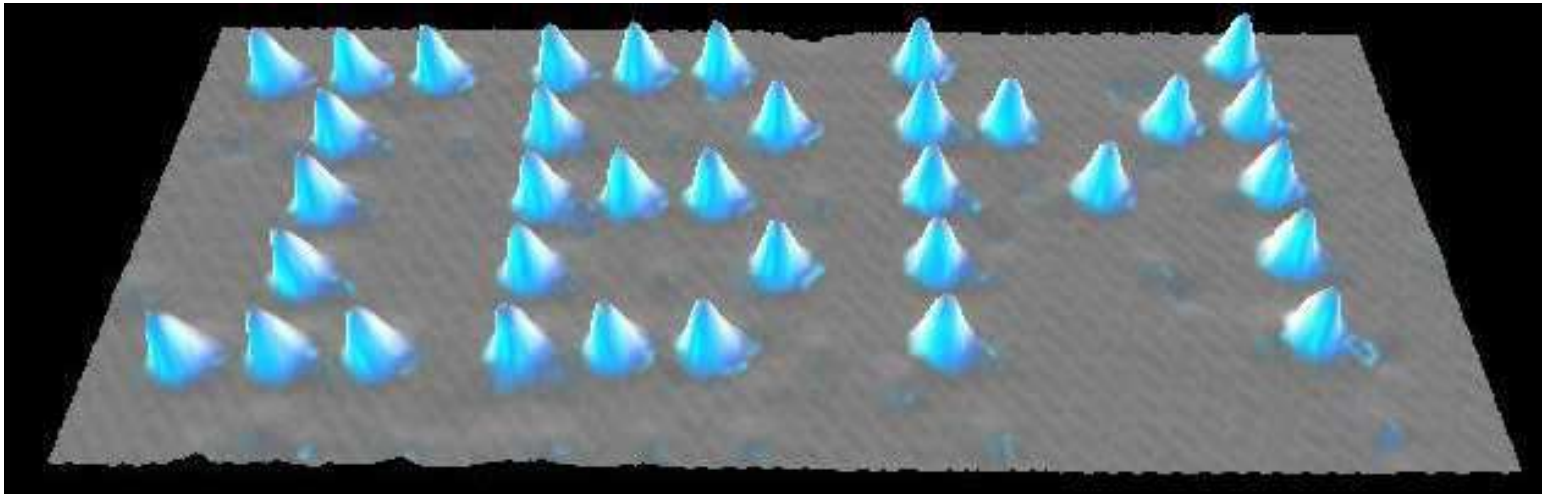


9 s par image $V_t = 7 \text{ mV}$ $I_t = 1,1 \text{ nA}$

Manipulation atomique



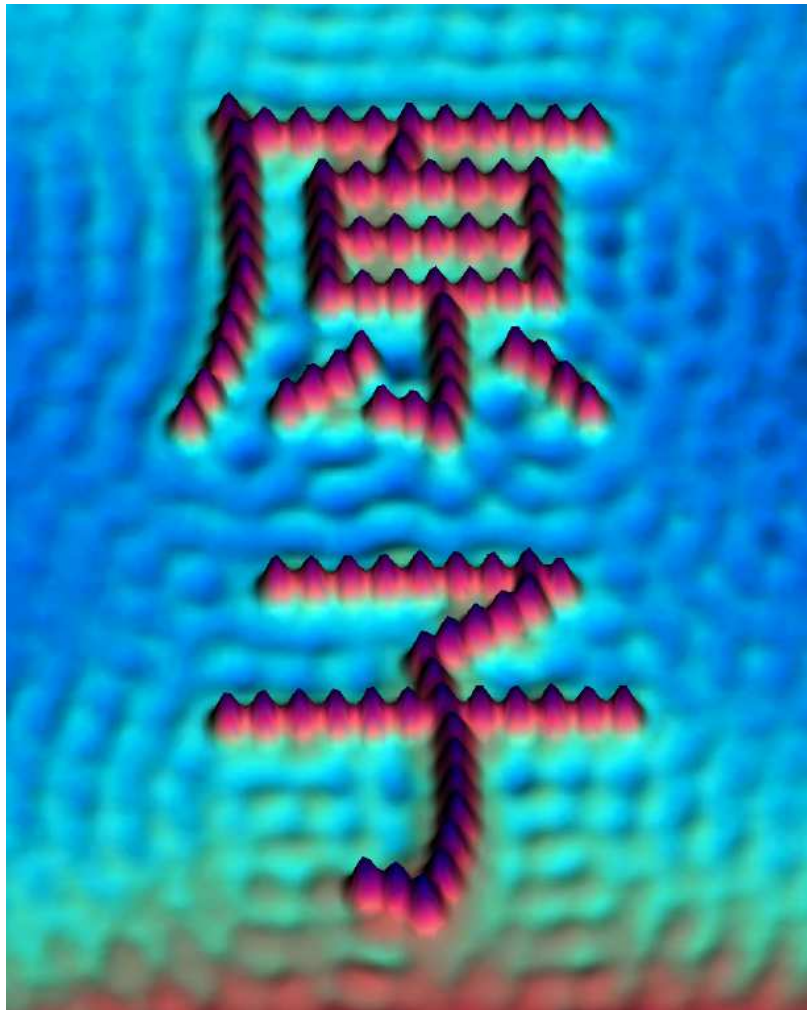
Première démonstration de manipulation atome par atome :



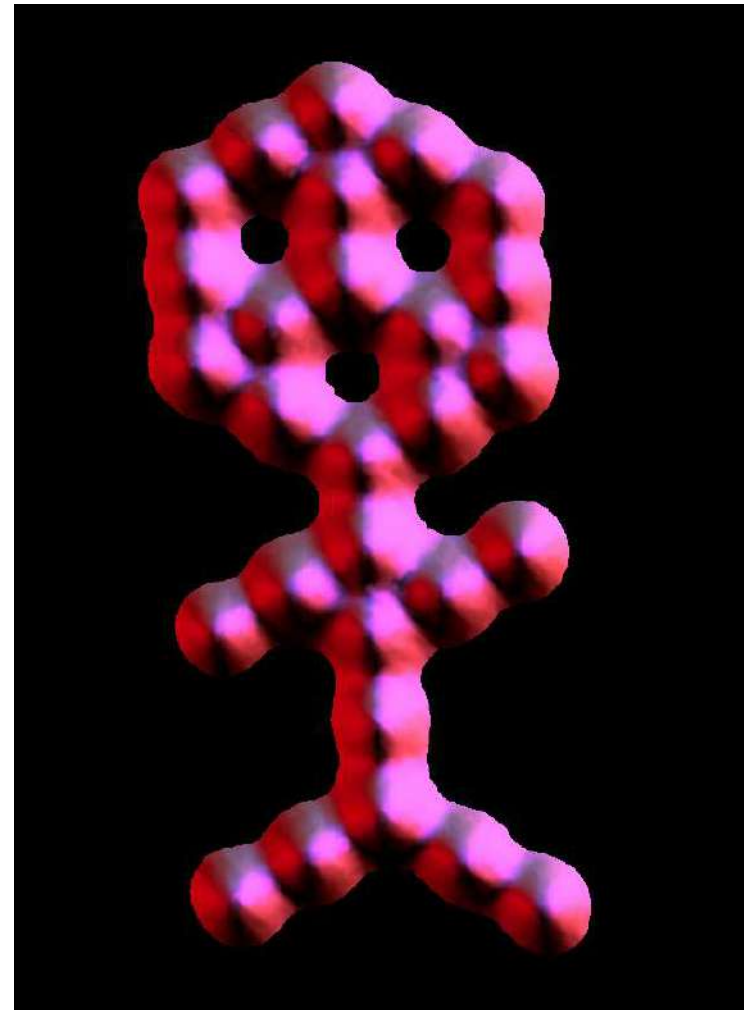
Xe/Ni(111) D.M. Eigler, E.K. Schweizer – Nature 344 (1990) 524

Manipulation d'atomes et de molécules

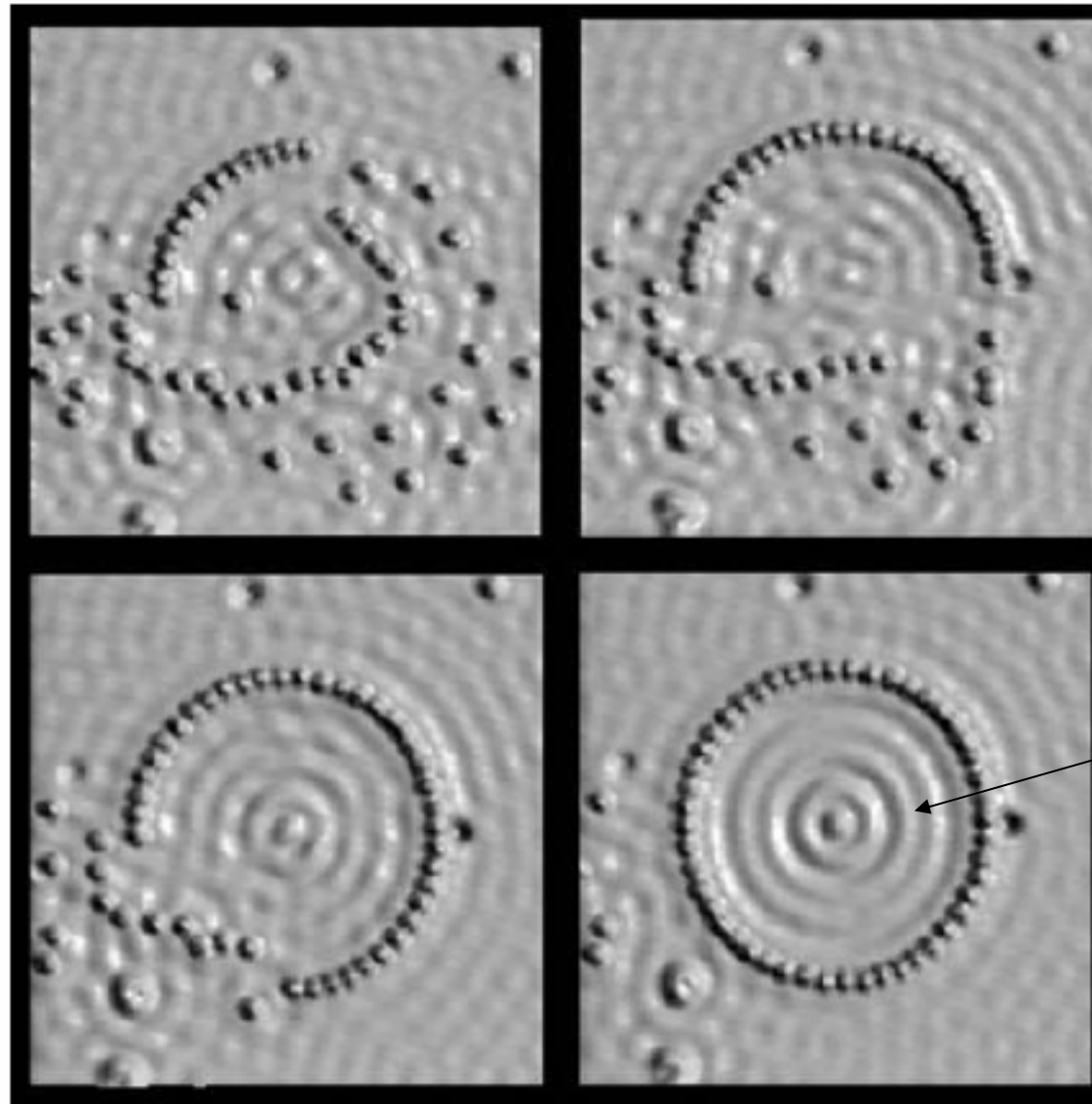
Idéogramme "atome"



Bonhomme CO



Elaboration atome par atome d'un corral quantique

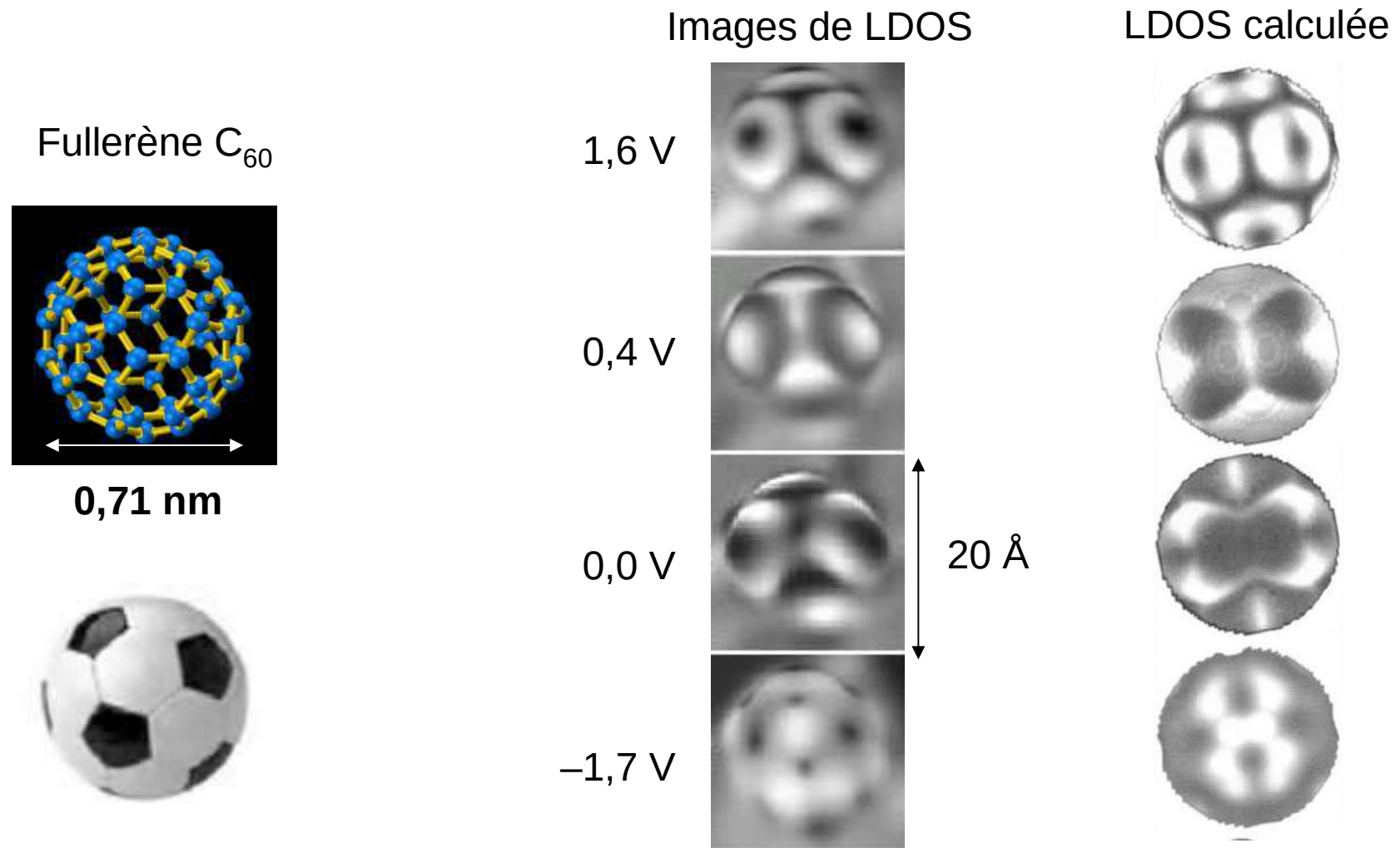


Ondes
électroniques
stationnaires

48 atomes de fer sur la surface de cuivre (111)

Spectroscopie par microscopie tunnel

Visualisation des carrés des fonctions d'ondes électroniques dans une molécule (boîte quantique) par cartographie de conductance



Xinghua Lu, M. Grobis, K. H. Khoo, Steven G. Louie, and M. F. Crommie
Phys. Rev. Lett. 90 (2003) 096802