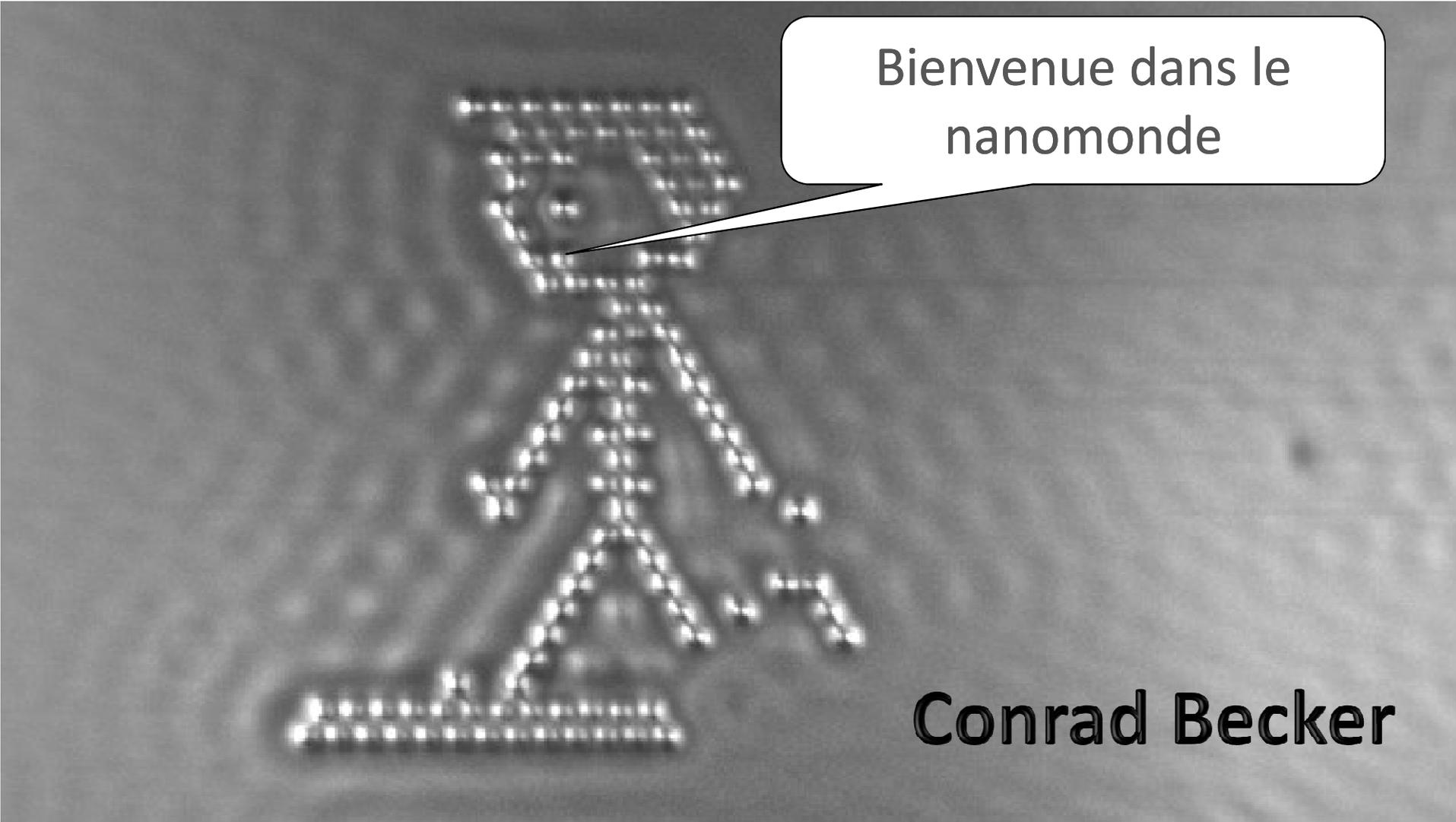


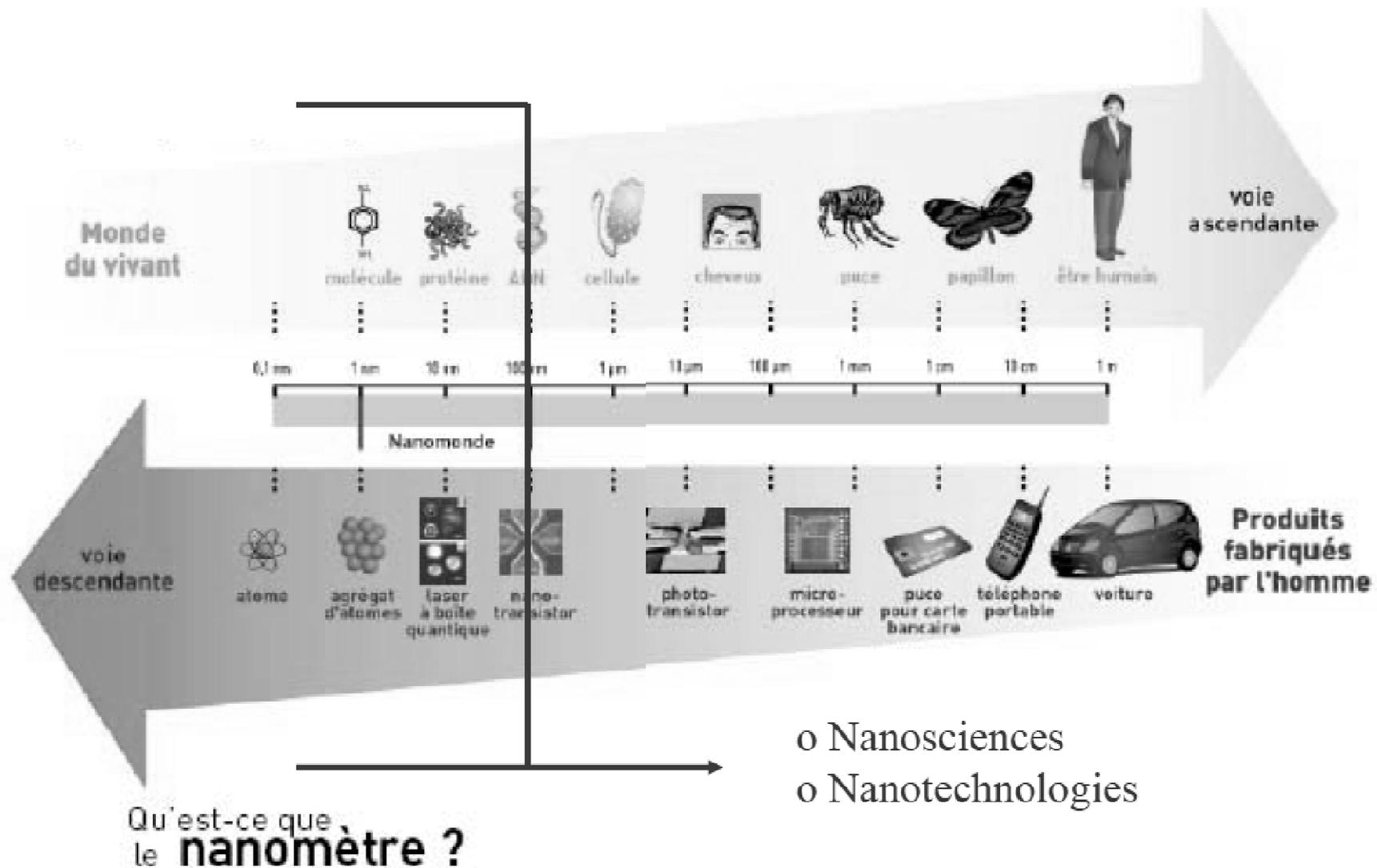
Voir et manipuler les atomes



Bienvenue dans le
nanomonde

Conrad Becker

« Nano » : qu'est-ce que c'est ?



There is plenty of room at the bottom

« Il y a plein de place au fond »

Richard Feynman (1918 – 1988), Prix Nobel 1965,
a prononcé ces mots le 29 décembre 1959.

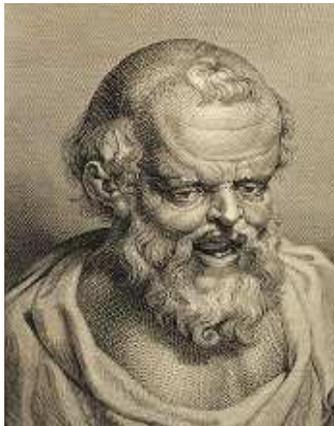


Il a envisagé de :

- ⊙ Construire des microscopes pour une vision atomique
- ⊙ Stocker l'information à l'échelle nanométrique
- ⊙ Miniaturiser l'ordinateur (interconnexions de 20nm)
- ⊙ Manipuler la matière atome par atome
- ⊙ ...

Qu'est-ce que c'est un atome ?

Démocrite
400 av. JC



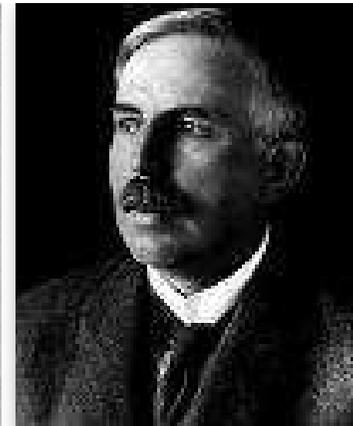
John Dalton
1803



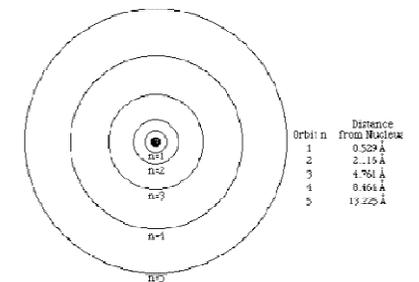
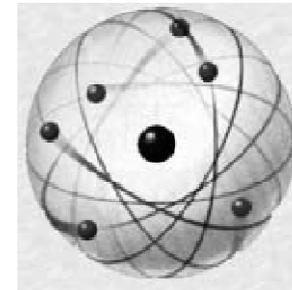
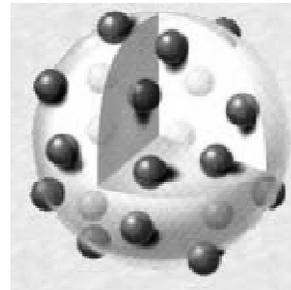
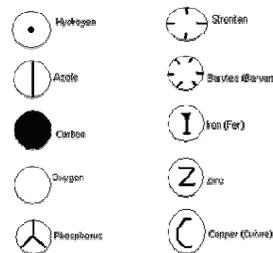
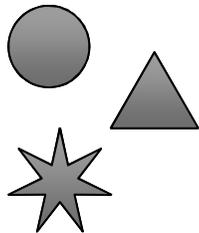
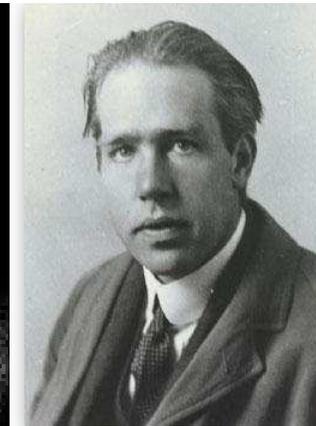
J.J. Thomson
1897



Ernest Rutherford
1911



Niels Bohr
1913

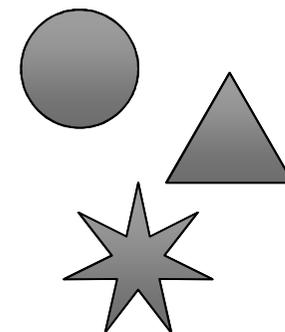
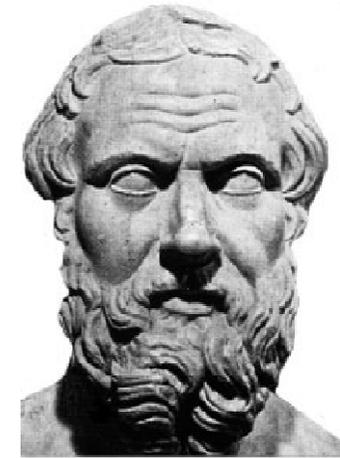


Démocrite 460 – 360 av. J.-C.

La matière est formée de grains invisible :
les atomes (du grec ἄτομος [atomos], « qui ne
peut être divisé »)

Les atomes sont pleins mais tous différent
(crochus, ronds etc... pour les emboîter ensemble)

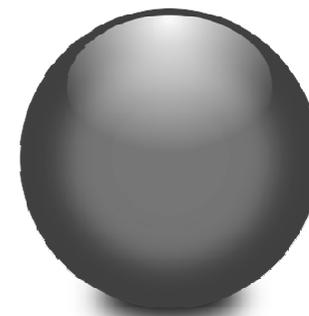
Aucune preuve expérimentale et sa démarche n'est
que philosophique



John Dalton (1766 – 1844)

« La matière est constituée d'atomes indivisibles et indestructibles, et un atome d'un élément donné a toujours la même masse »

Il donne d'ailleurs une liste de poids relatifs, par rapport à l'hydrogène, de quelques atomes (azote, carbone, oxygène...).



Joseph John Thomson (1856-1940)

Découverte de l'électron, particule chargée négativement.

Les atomes émettaient parfois de petites particules de charges électriques négatives (des électrons).

Modèle de « plum pudding » de l'atome

Les électrons se déplacent à l'intérieur de l'atome dans d'une mer de charges positives

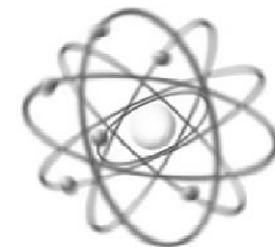


Ernest Rutherford (1871-1937)

L'atome est composé en majeure partie de vide

La masse de l'atome est concentrée dans le noyau

Les électrons de masse négligeable orbitent autour du noyau un peu comme des planètes autour du soleil



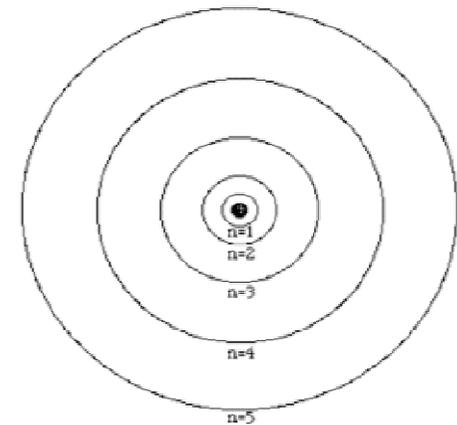
Niels Bohr (1885 - 1962)

Se base sur l'idée de Rutherford

Mais les électrons ont des niveaux d'énergie précis

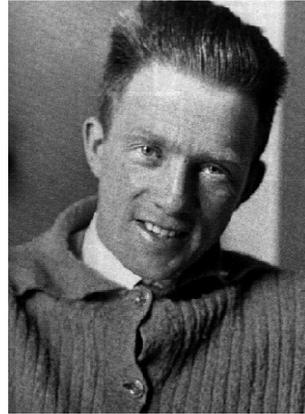
Ils se déplacent à une vitesse constante autour du noyau comme les planètes autour du soleil

Ils ne changent pas de niveau sans avoir la quantité d'énergie nécessaire.



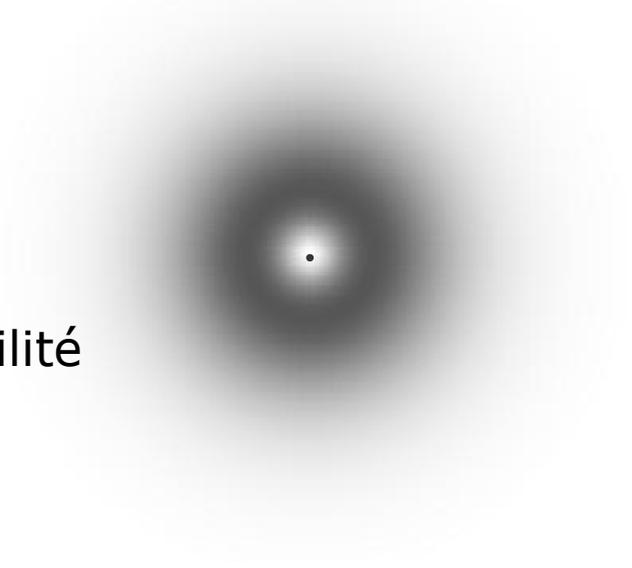
Le modèle quantique (1925)

Werner Heisenberg
Erwin Schrödinger
Max Planck



L'électron à des propriétés ondulatoires
(Louis de Broglie)

La position de l'électron n'est qu'une probabilité



L'atome d'hydrogène (H)

L'électron est délocalisé d'une manière sphérique (nuage électronique) autour du noyau.

La probabilité de trouver l'électron est maximale au voisinage d'une sphère de rayon 52,9 pm (52917 fm).

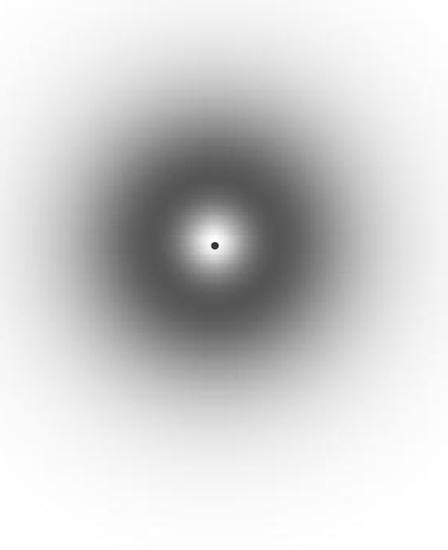
(Rayon de Bohr)

Le rayon d'un proton est 0,84184 fm

($r_a/r_p=62847$)

La masse est concentrée dans le noyau

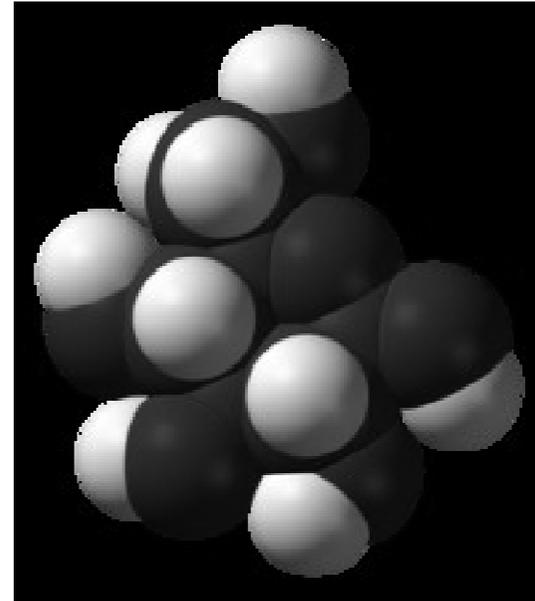
($m_p/m_e=1835$)



Une molécule

Par exemple :

Le glucose (sucre) - $C_6H_{12}O_6$



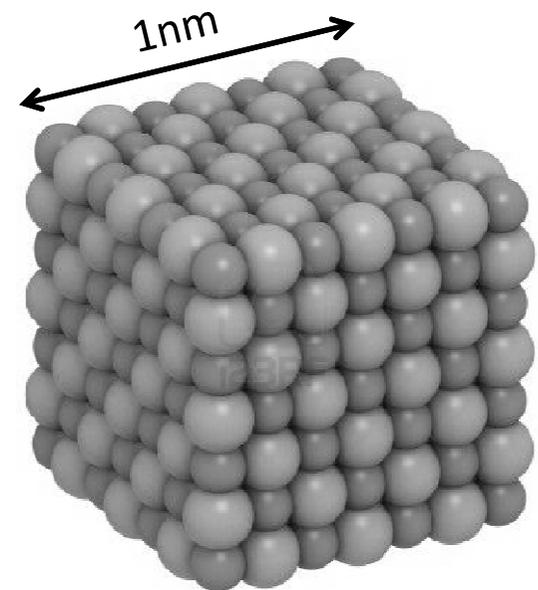
1mm

Un réseau cristallin

Par exemple :

Le chlorure de sodium - NaCl

Un arrangement particulièrement ordonné



Peut-on voir les atomes ?

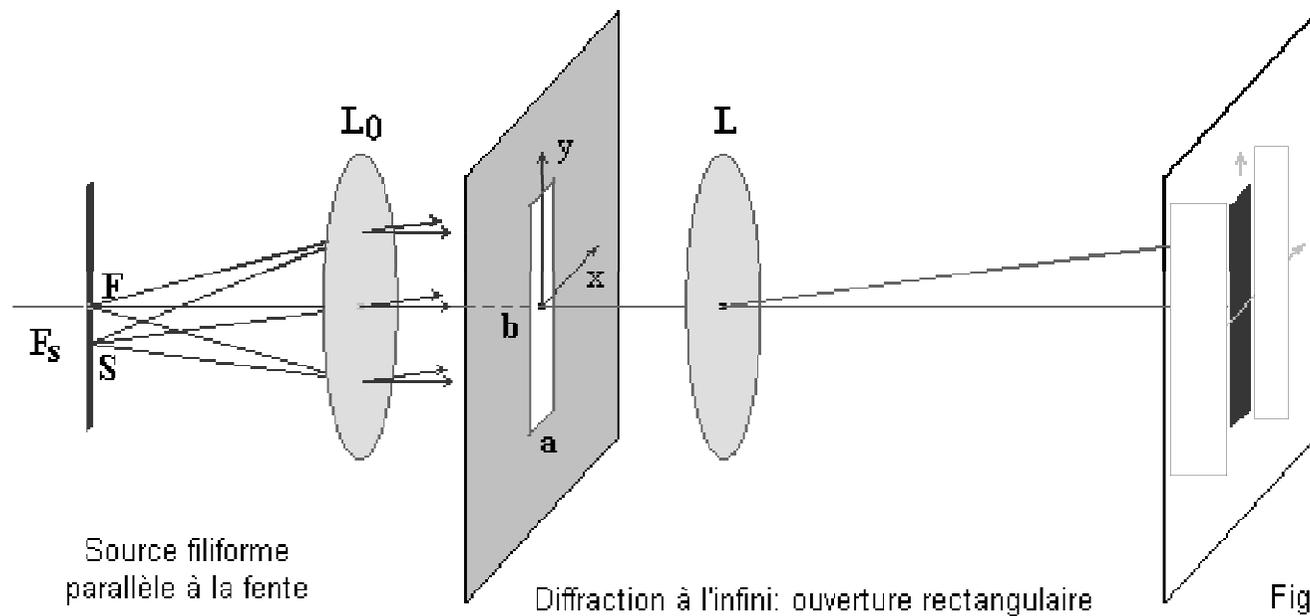
Non, mais on peut les rendre visible.

Pour cela nous utilisons des microscopes :

- ⊙ Le microscope électronique à transmission (TEM)
- ⊙ Le microscope ionique à effet de champ (FIM)
- ⊙ Le microscope à effet tunnel (STM)
- ⊙ Le microscope à force atomique (AFM)

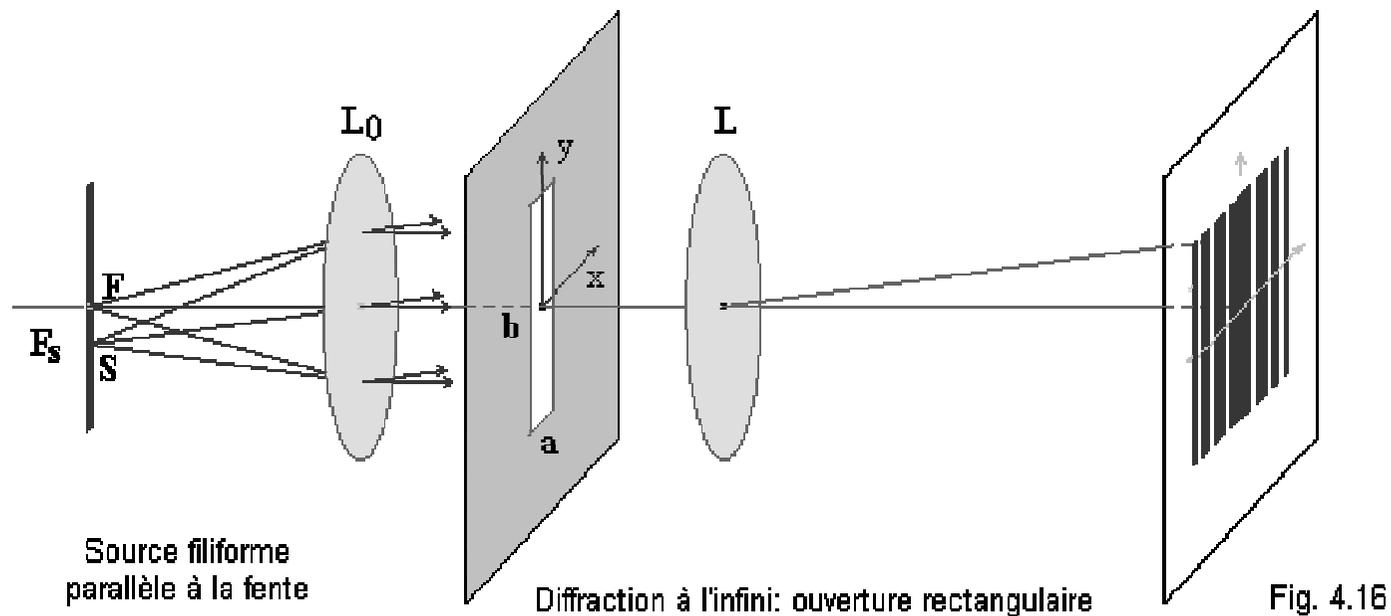
Quid le microscope optique ?

L'image d'une fente de largeur $a=1\text{mm}$



Quid le microscope optique ?

L'image d'une fente de largeur $a=100\text{nm}$



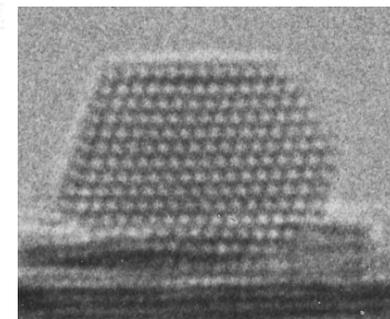
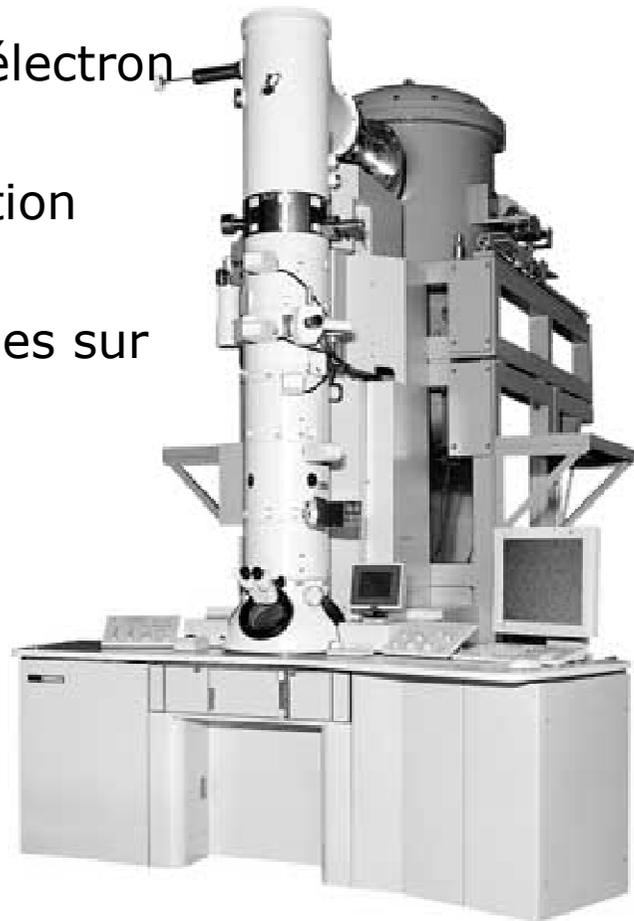
Le phénomène de diffraction rend l'image « flou »

Le microscope électronique à transmission

Ernst Ruska 1933 (Prix Nobel 1986)

Caractère ondulatoire de l'électron
 $200\text{keV} = 2,75\text{pm}$
Pas de problème de diffraction

On peut visualiser les atomes sur
un écran



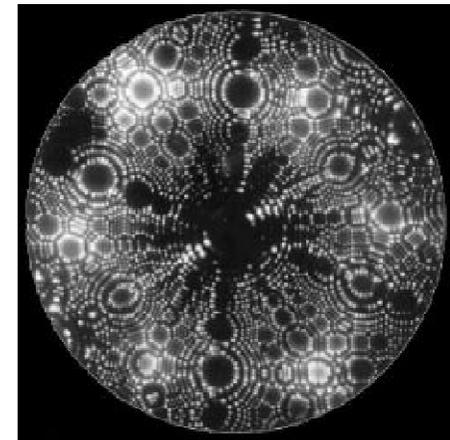
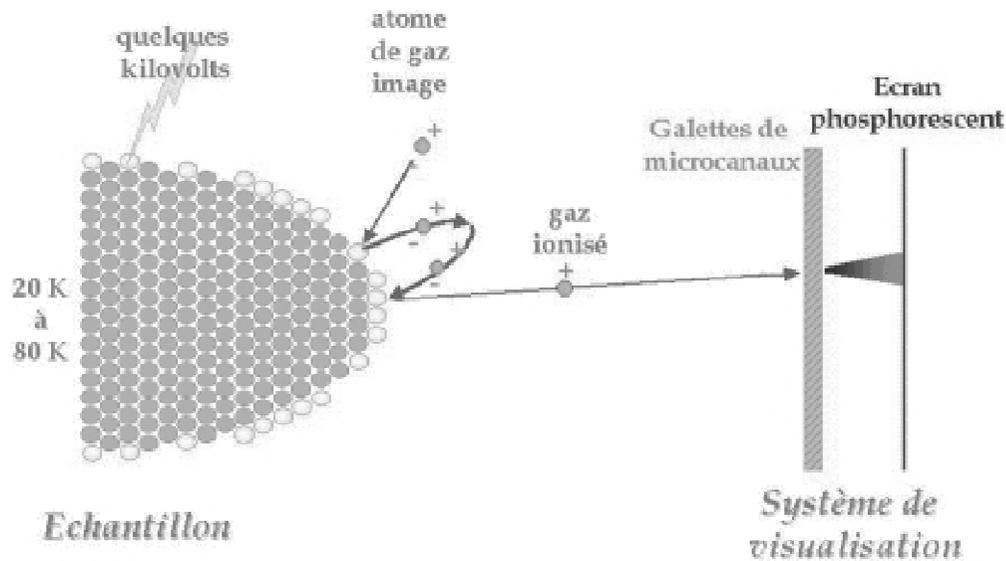
Au sur MgO
S. Giorgio



Le microscope ionique à effet de champ (FIM)

Erwin Müller 1951

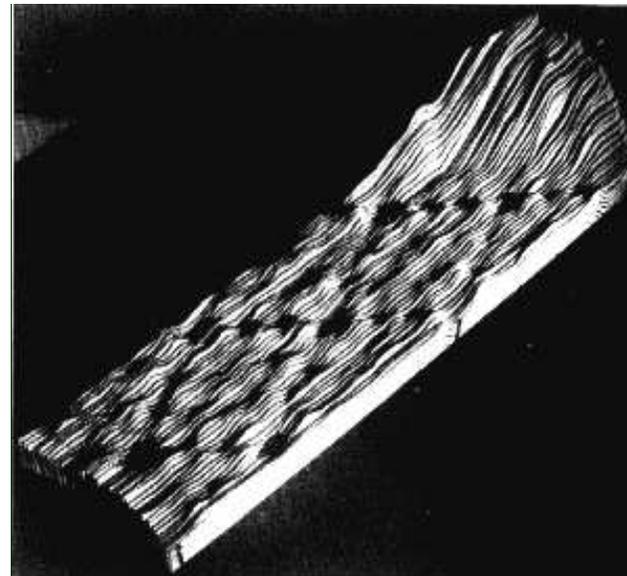
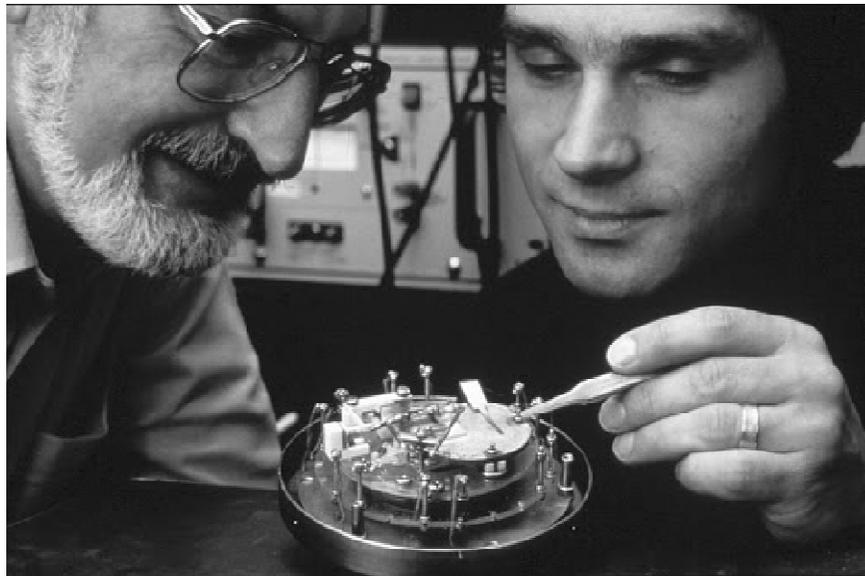
Grandissement par projection d'un gaz image



Le microscope à effet tunnel (STM)

Gerd Binnig et Heinrich Rohrer 1981
(Prix Nobel 1986)

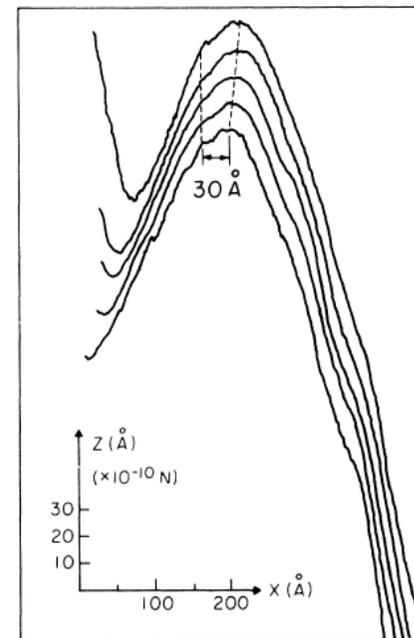
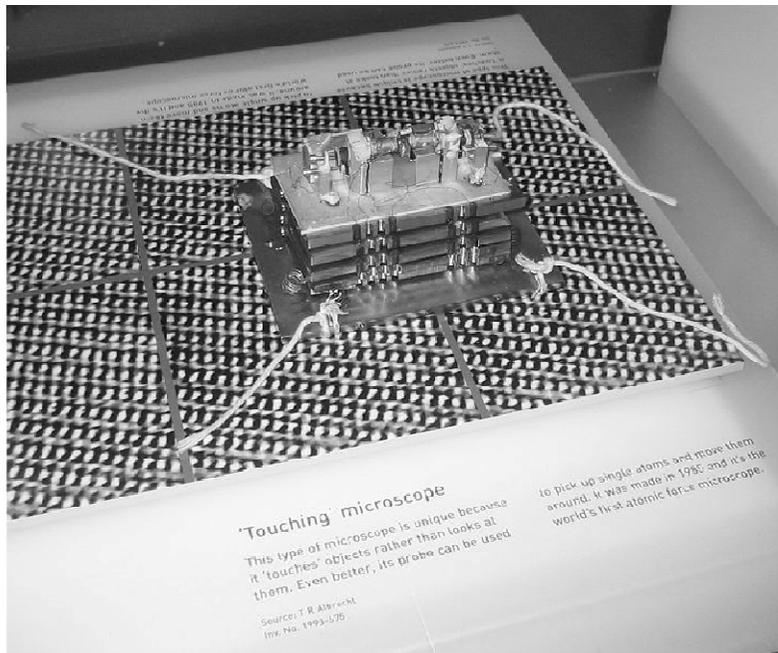
Les deux ont osé l'impossible :
Visualiser les atomes par une mesure mécanique avec une précision atomique



Le microscope à force atomique

Gerd Binnig et Carl Quate 1985

Un principe de mesure mécanique qui ressemble beaucoup à un STM



Un STM en action

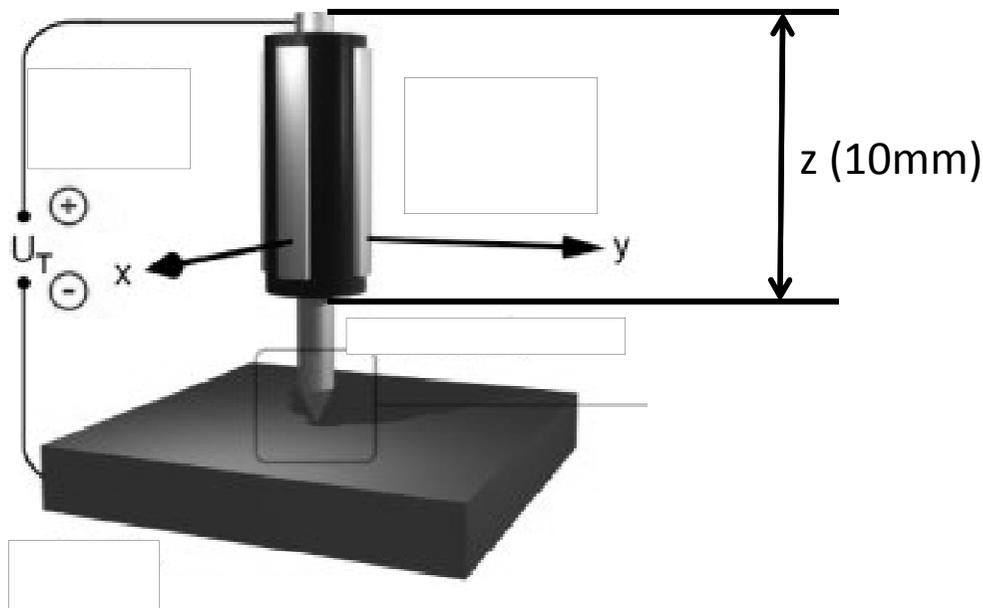


Mais, comment ça marche ?

On utilise un tube piézocéramique comme « moteur » pour balayer une fine pointe dessus une surface

On garde la distance entre la pointe et la surface constante

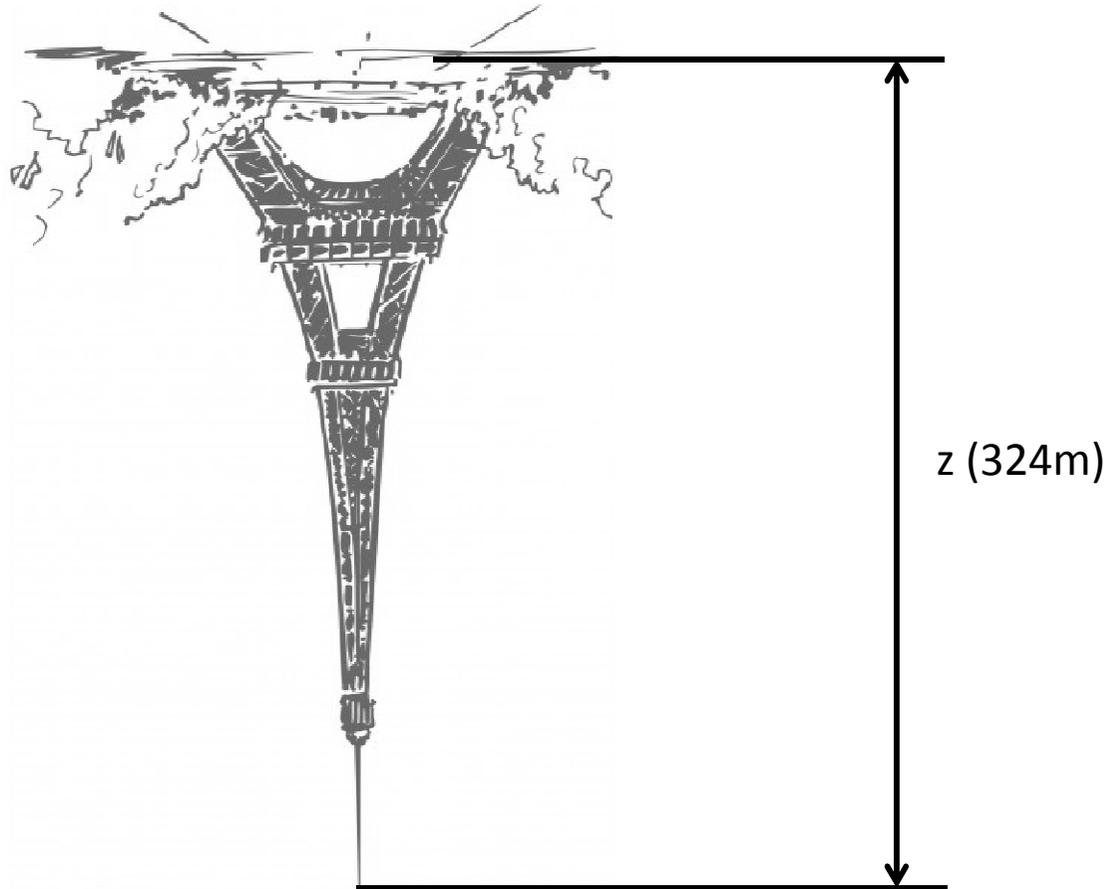
On mesure le changement de l'élongation du tube (z) en fonction de sa position (x, y) sur la surface



La Tour Eiffel

Le défi :

Mesurer la taille un grain de sable avec la pointe de la Tour Eiffel

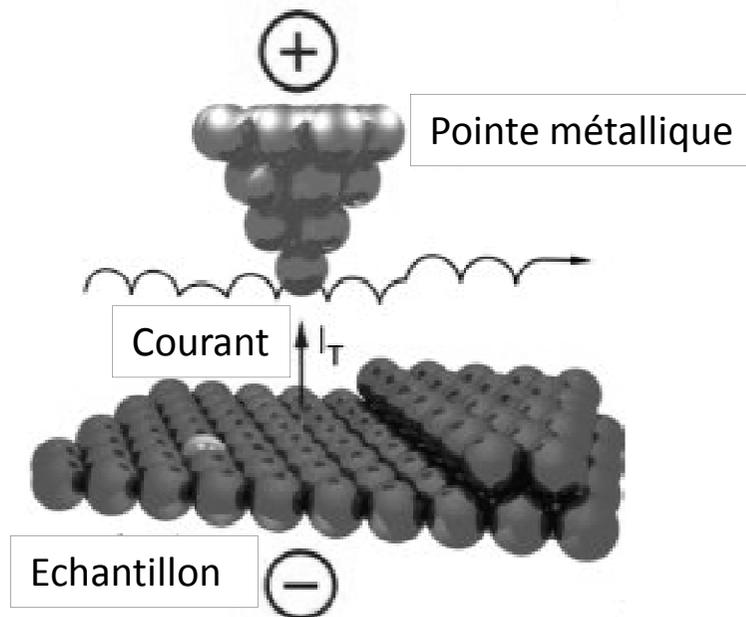


Le détail à l'échelle atomique

Quand on applique une tension entre une pointe métallique et un échantillon métallique un courant circule même sans contact (effet tunnel)

Intensité du courant tunnel (I_T) dépend de la distance : $I_T \propto e^{-cd}$

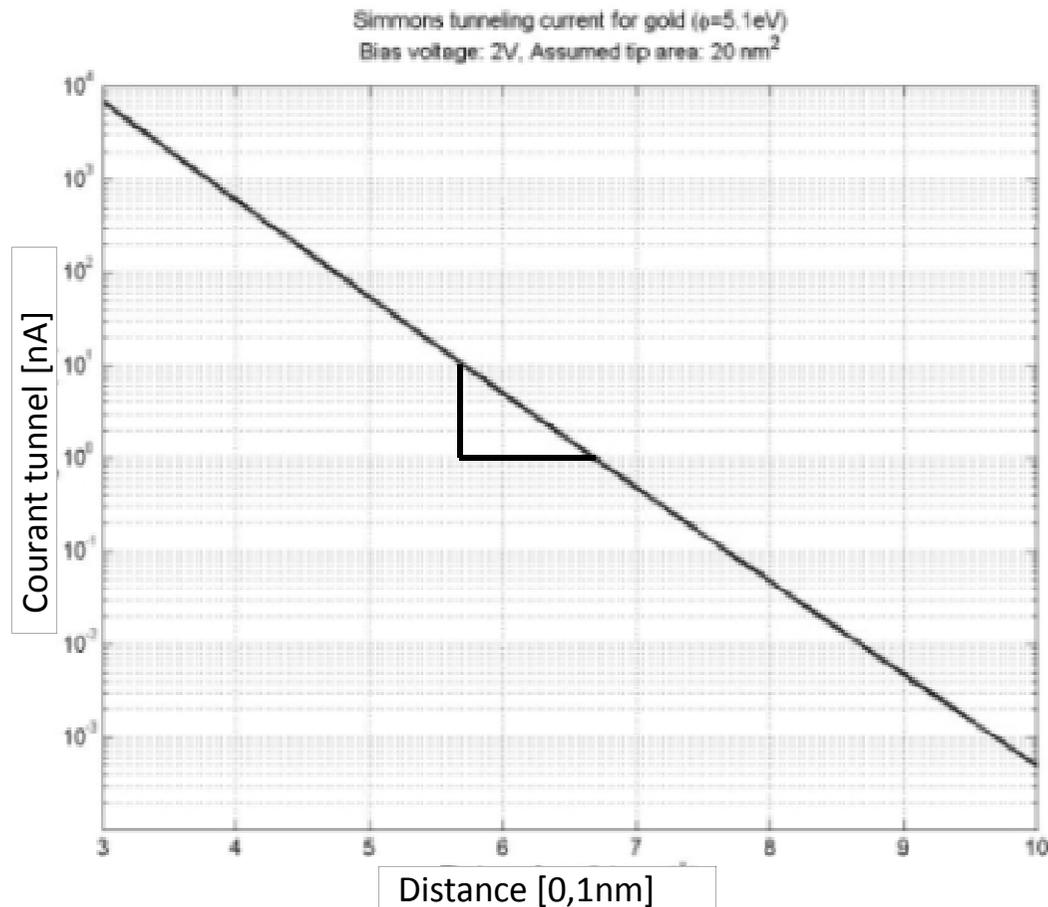
En gardant I_T constant on garde la distance d constant



Quelle est l'intensité du courant ?

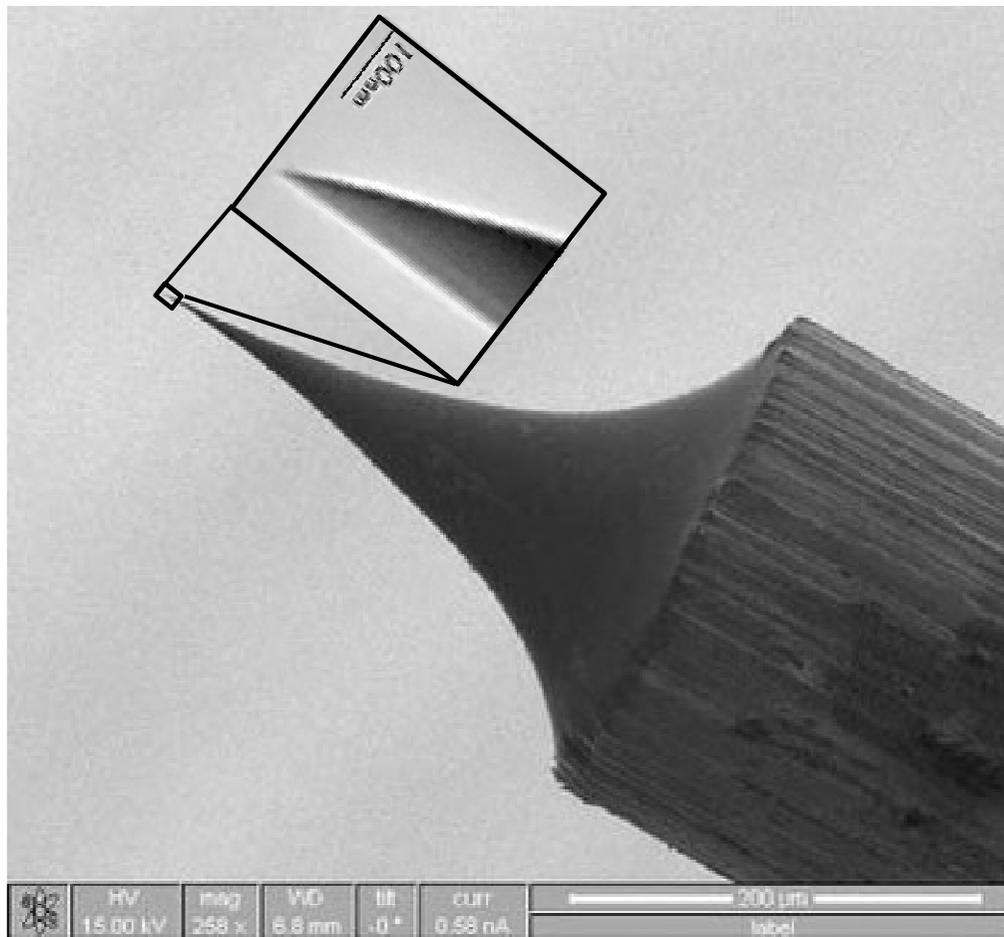
Le courant tunnel est de l'ordre 1nA

Un déplacement de 0,1nm enduit un changement d'un facteur 10



A quoi ressemble une pointe STM ?

Une pointe STM en tungstène (W)



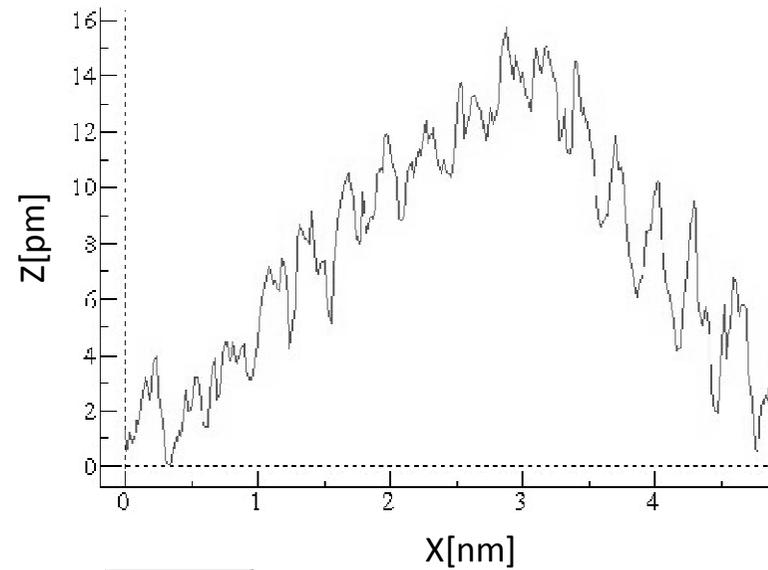
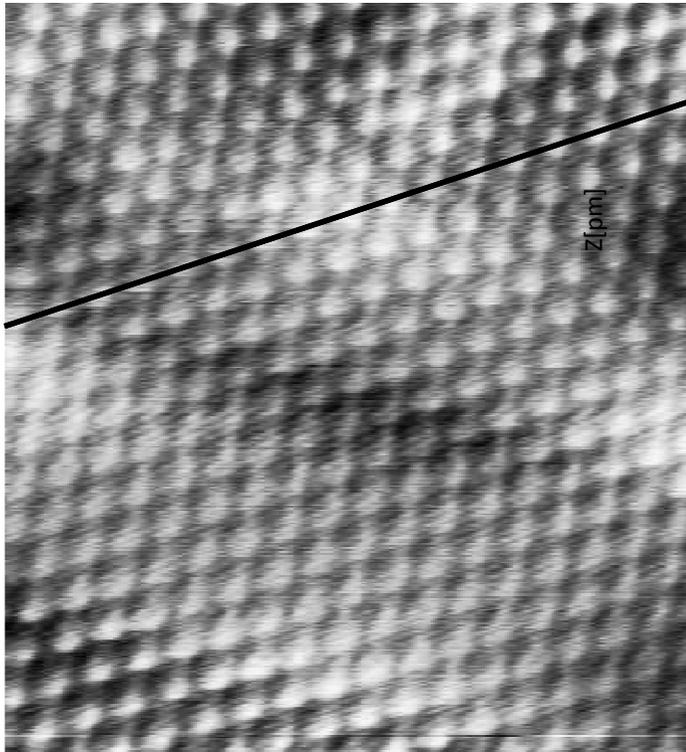
L'imagerie avec un STM



La résolution atomique

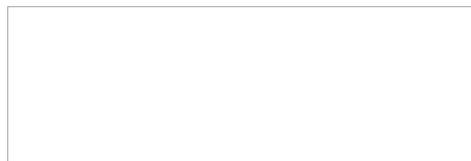
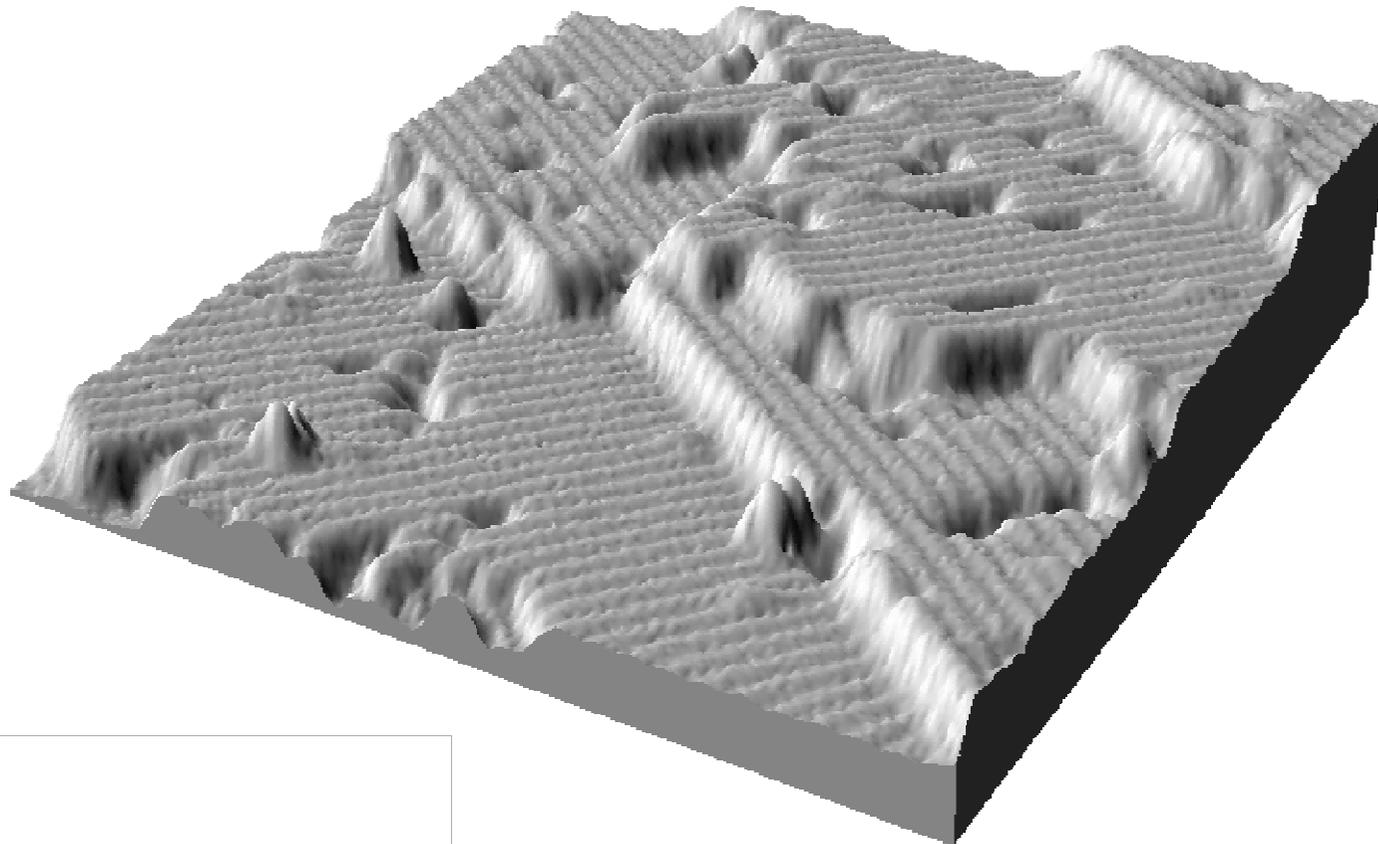
Une surface d'or à très basse température (5K)

La résolution en hauteur (Z) est de $\sim 2\text{pm}$



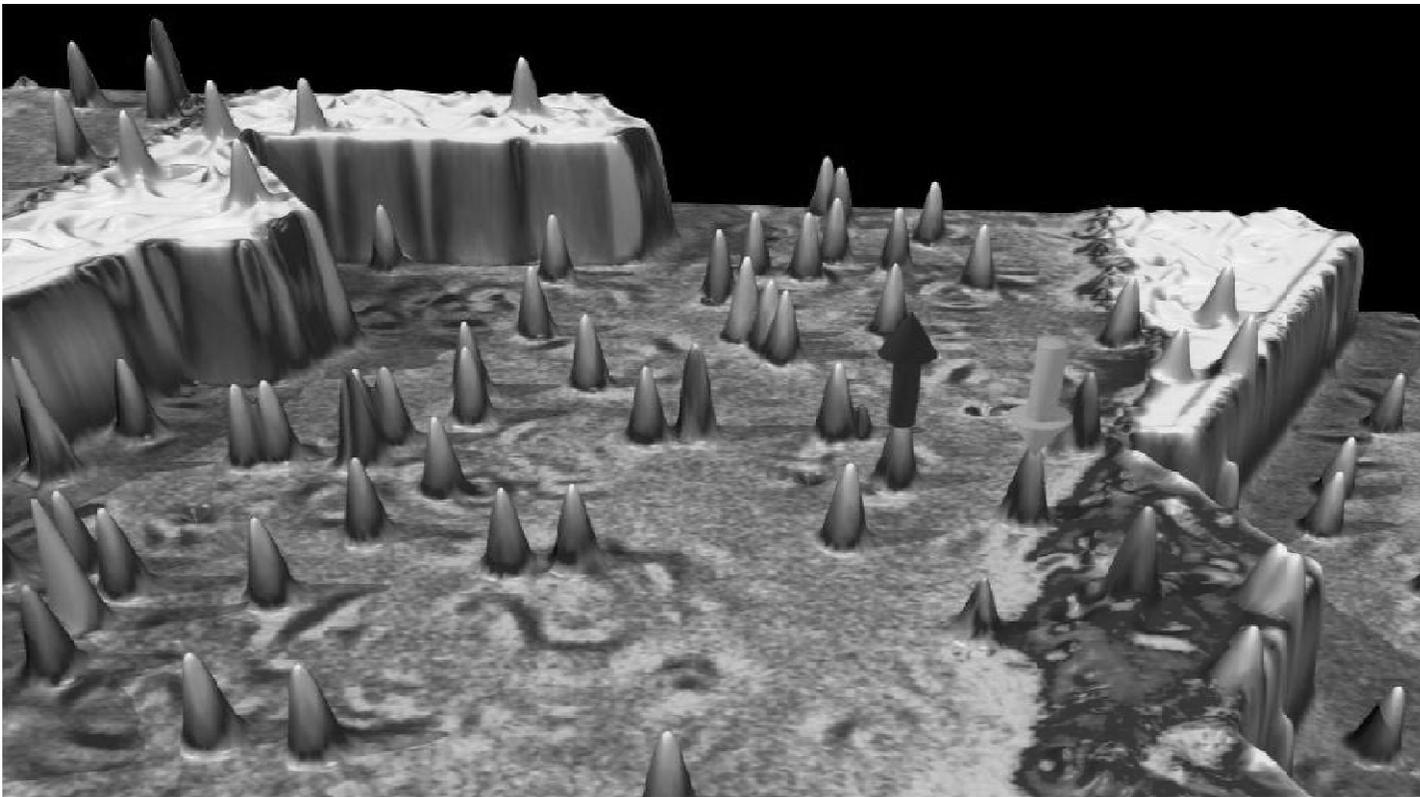
Un paysage atomique

Silicium (B.S. Swartzentruber, Sandia National Laboratories)



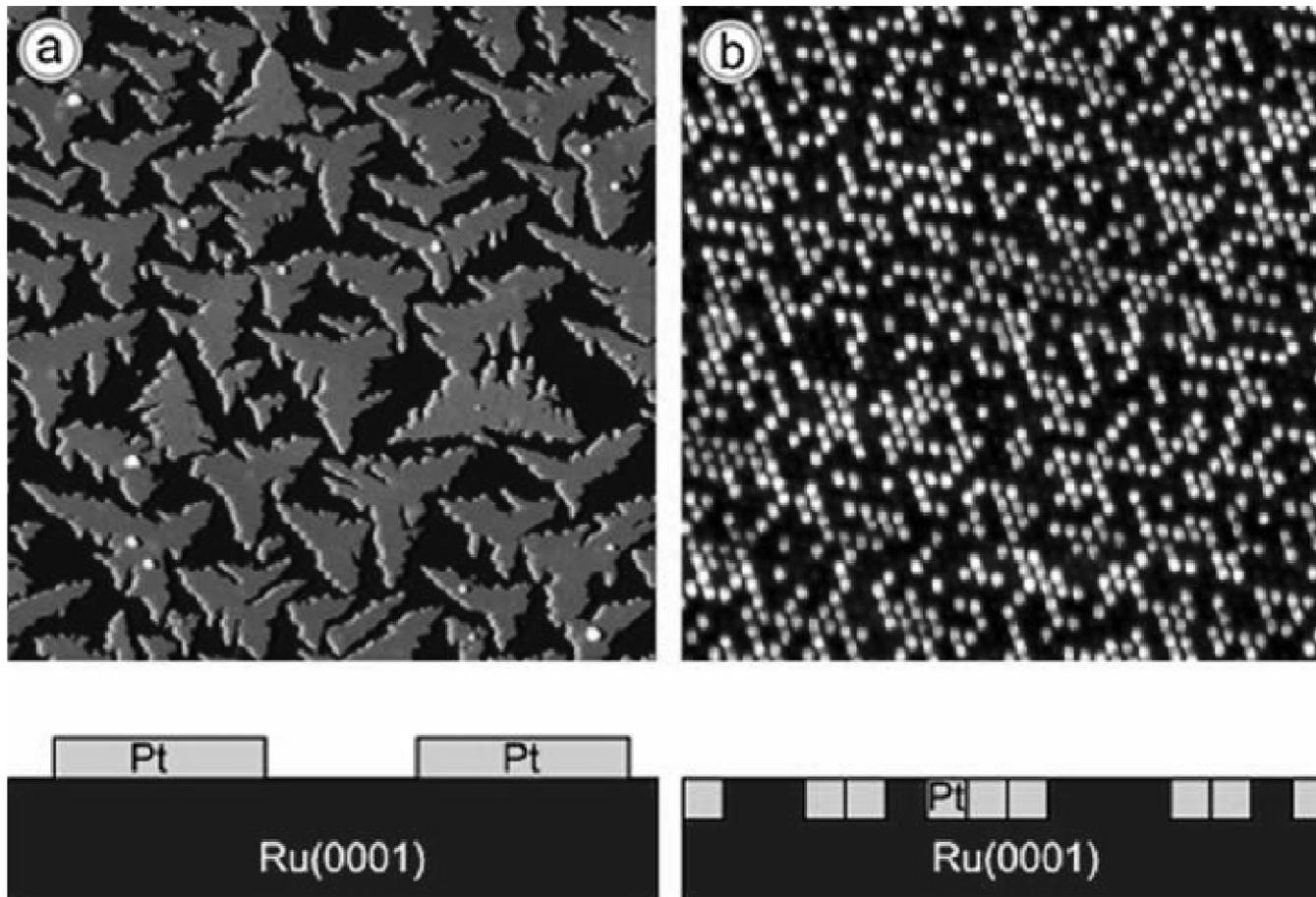
Un autre paysage atomique

Cobalt sur platine (R. Wiesendanger, Univ. Hambourg)



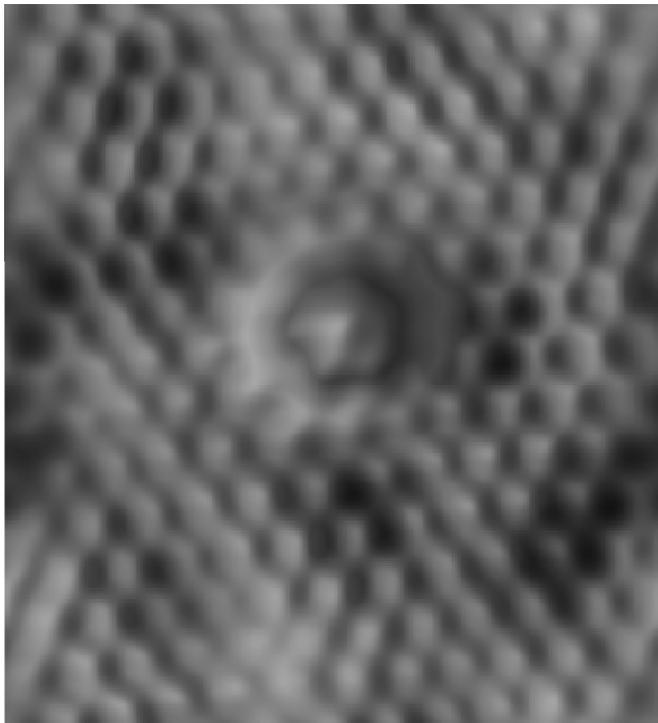
La résolution chimique

Platine (Pt) et Ruthenium (Ru), (J. Behm, Univ. Ulm)



Nanoparticules

Une nanoparticule de fer sur une couche mince de saphir

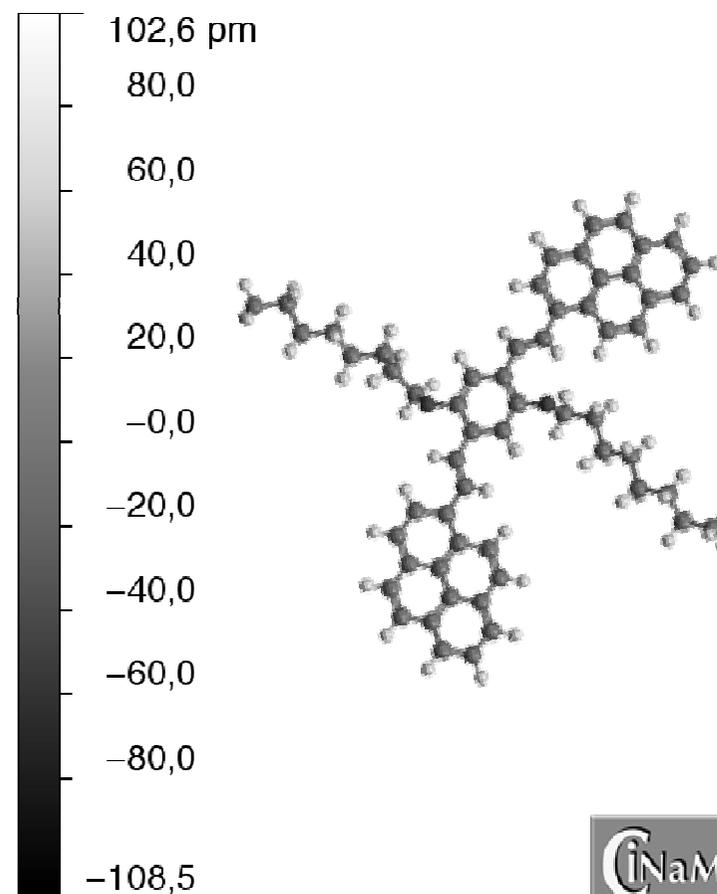
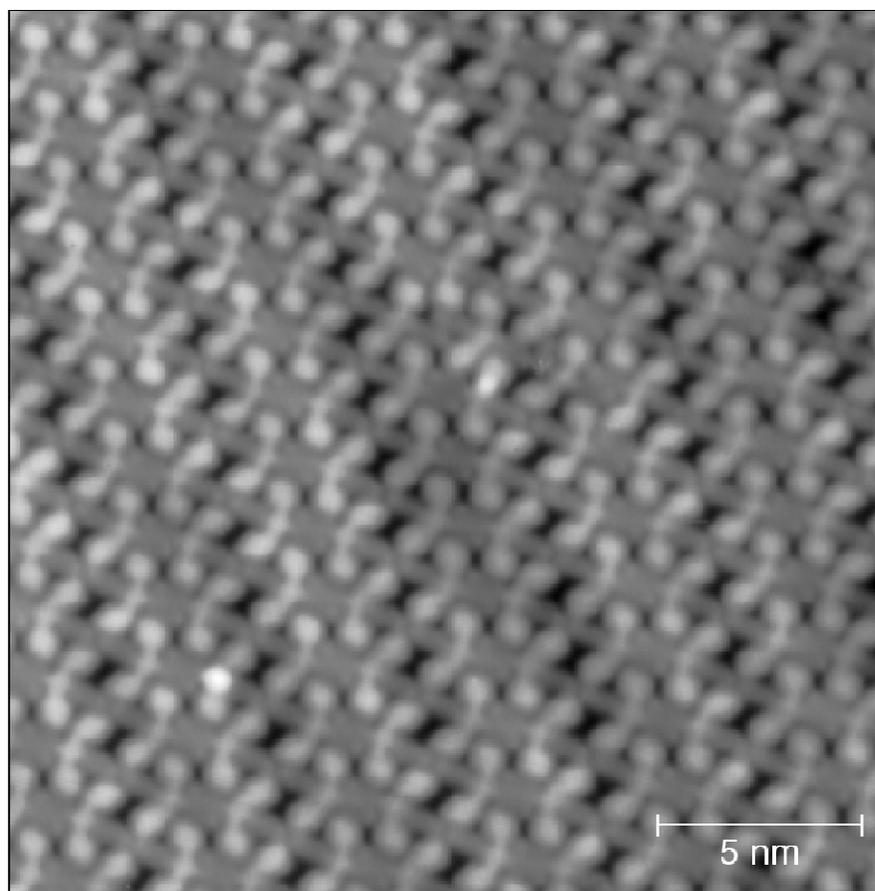


6,2nm

universität  **bonn**
S. Degen

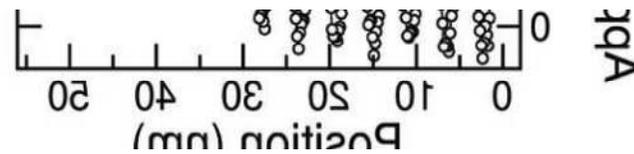
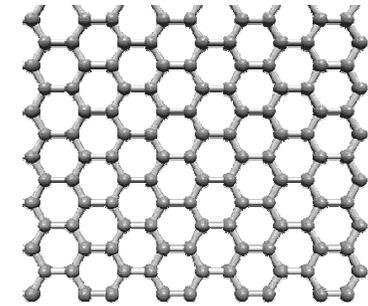
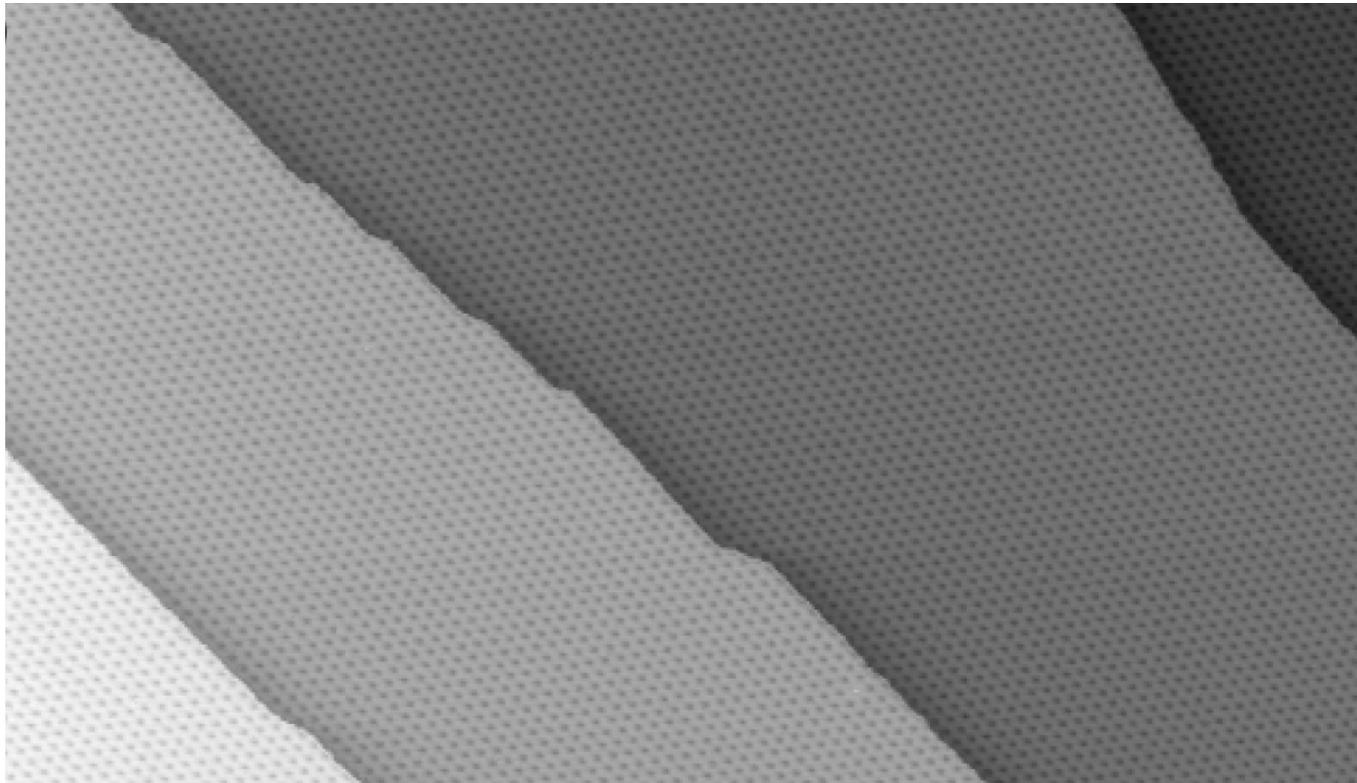
Couches moléculaires auto-organisées

Oligophénylènevinylène



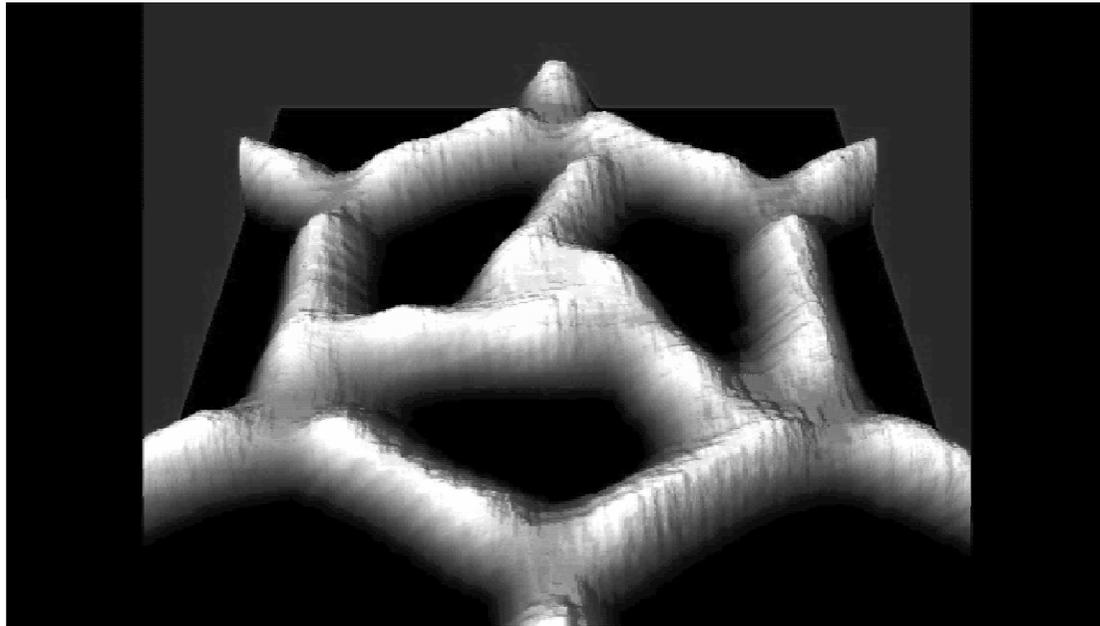
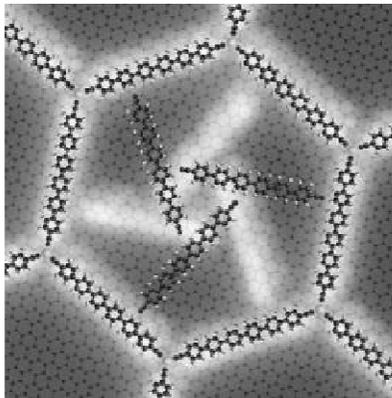
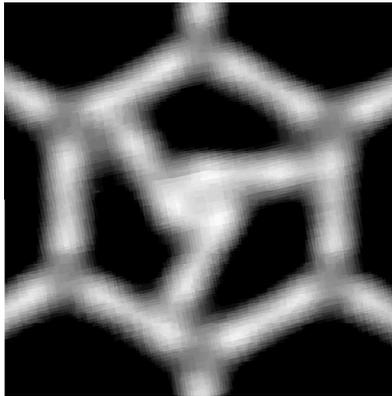
Un tapis en carbone

Graphène sur iridium (Ir) T. Michely, Univ. Cologne



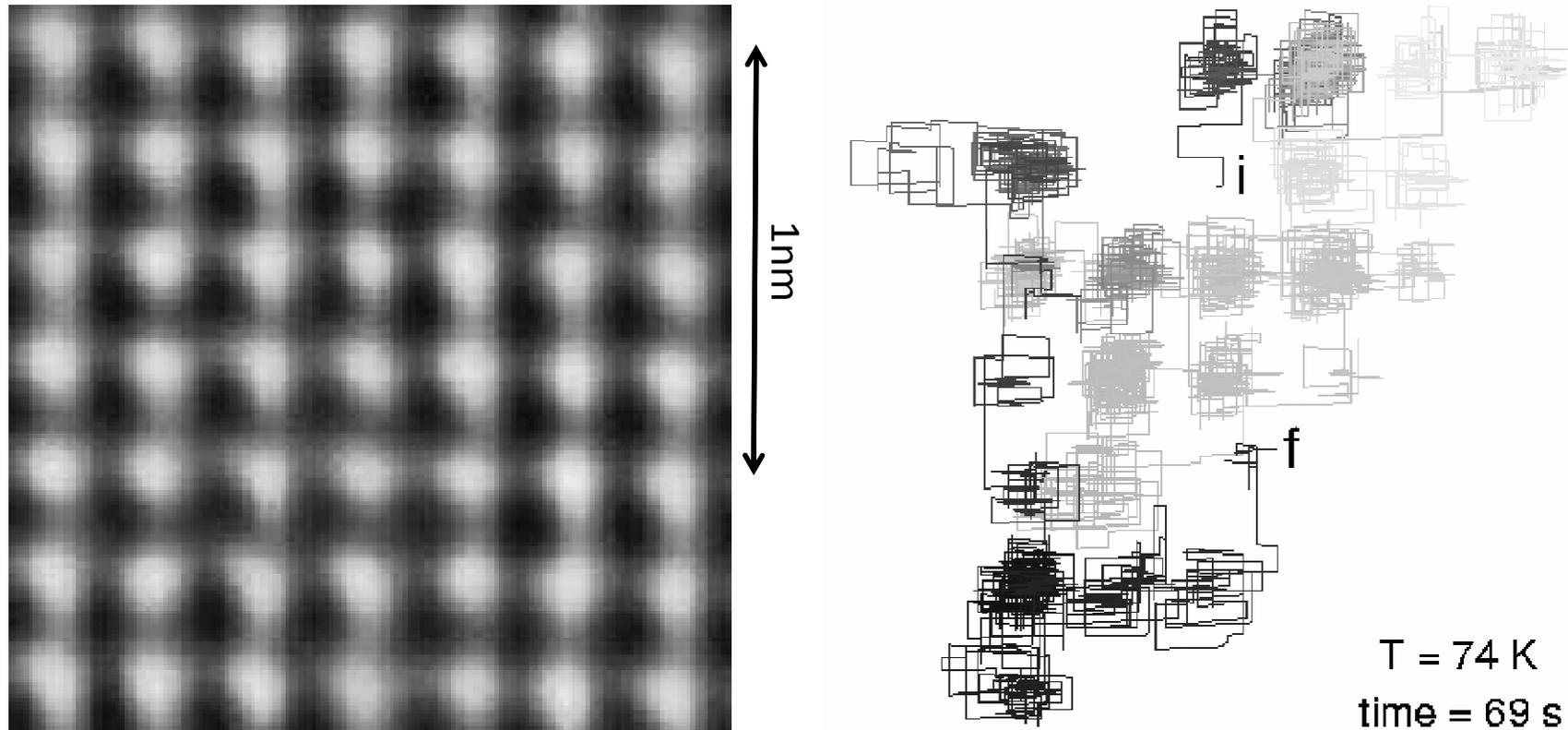
Ça tourne !

Architecture moléculaire, J. Barth, TUM Munich
(sexiphenyl-dicarbonitrile)



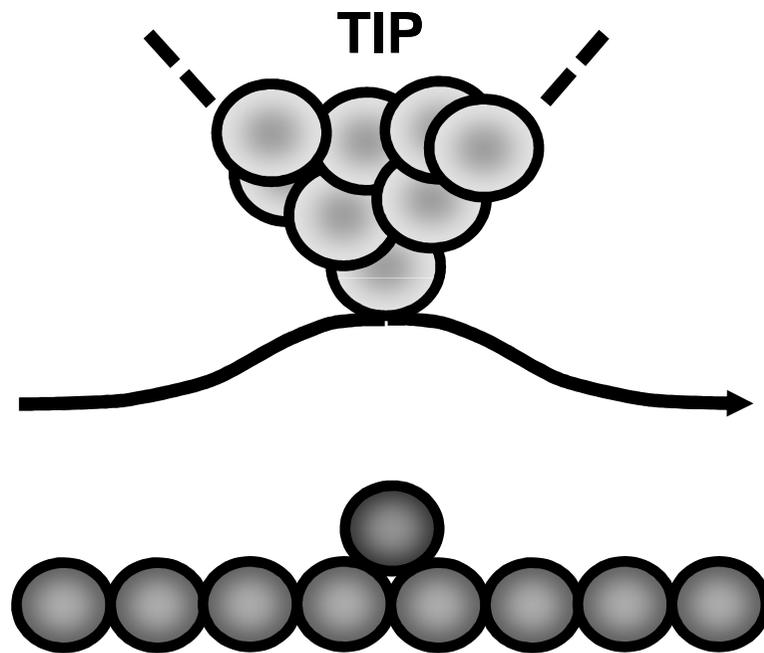
Traquer un atome d'hydrogène

Sur une surface de nickel (Ni), W. Ho, UC Irvine

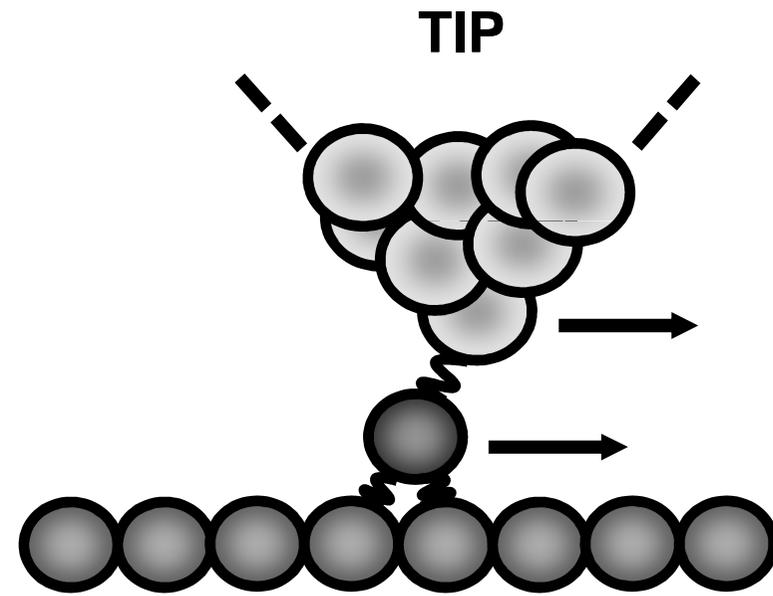


Imagerie et manipulation

Imagerie

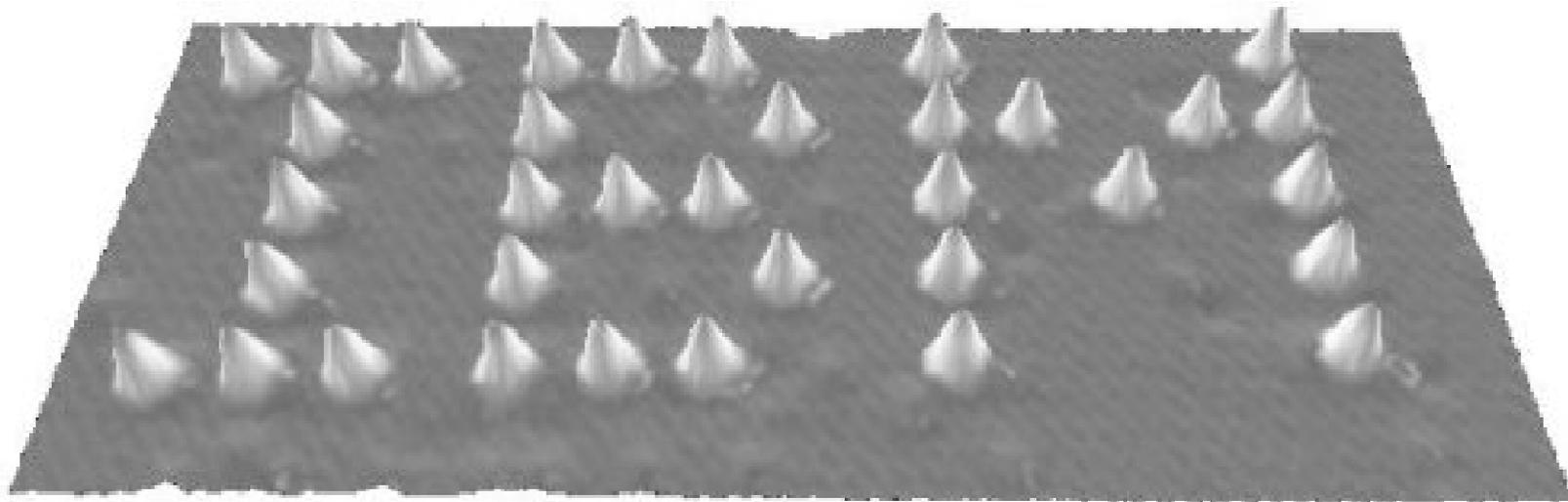


Manipulation



Manipuler les atomes : la première

Xenon sur nickel (D. Eigler, IBM, San Jose, 1989)

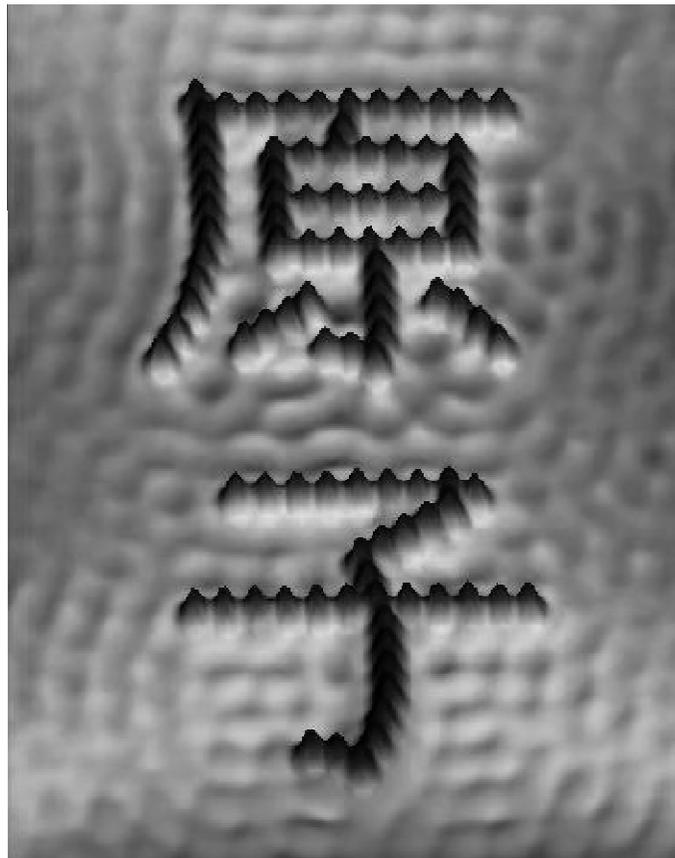


La manipulation avec un STM



L'encre métallique

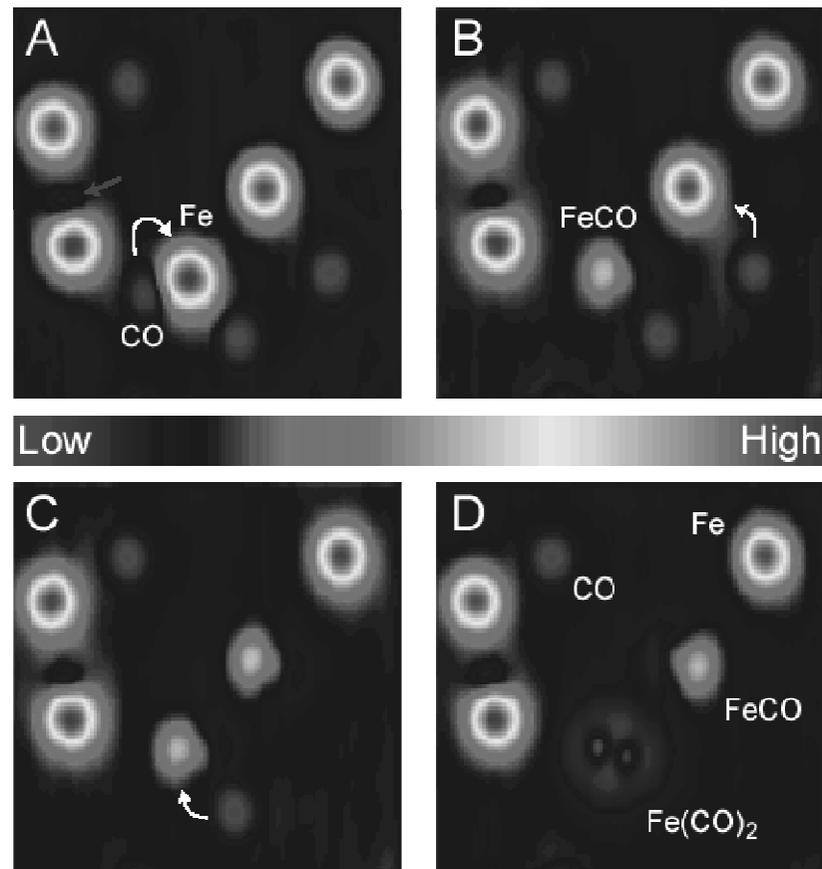
Le mot « atome » en re Kanji crit avec des atomes de fer
(P. Zeppenfeld & D. Eigler, IBM, San Jose)



Nanochimie

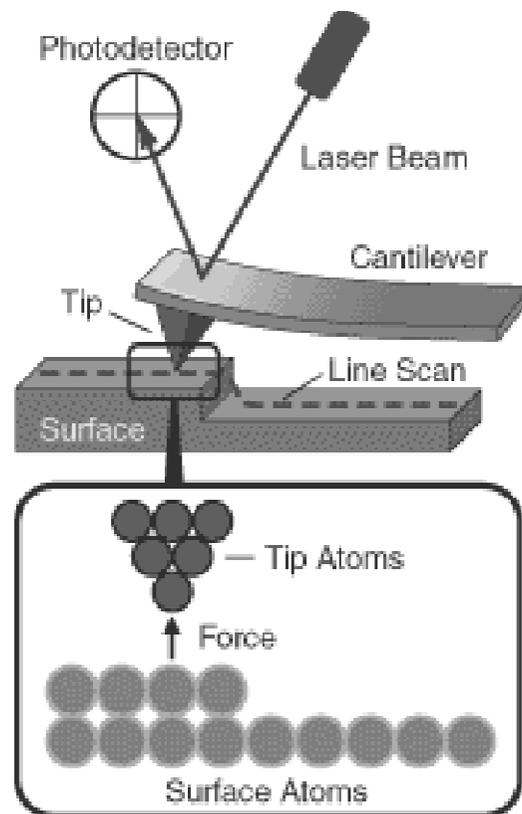
Tisser des liaisons avec le STM

Fe + CO pour créer FeCO et Fe(CO)₂ (W. Ho, UC Irvine)



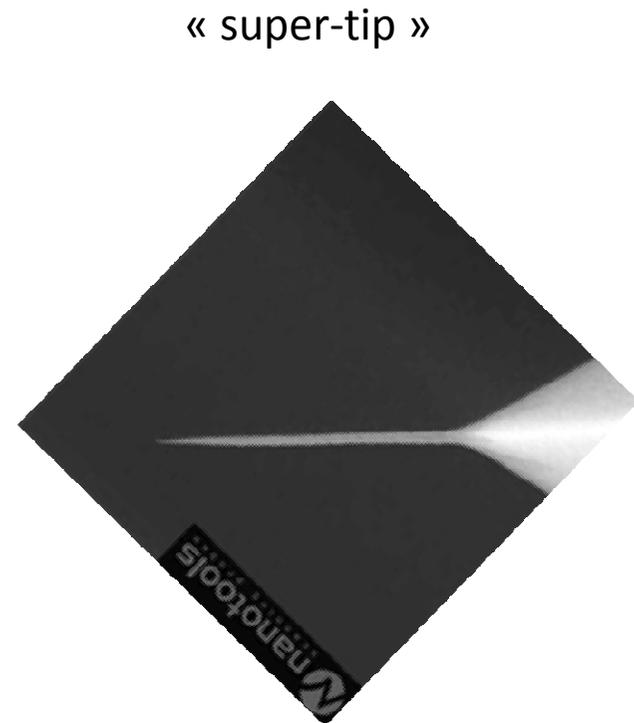
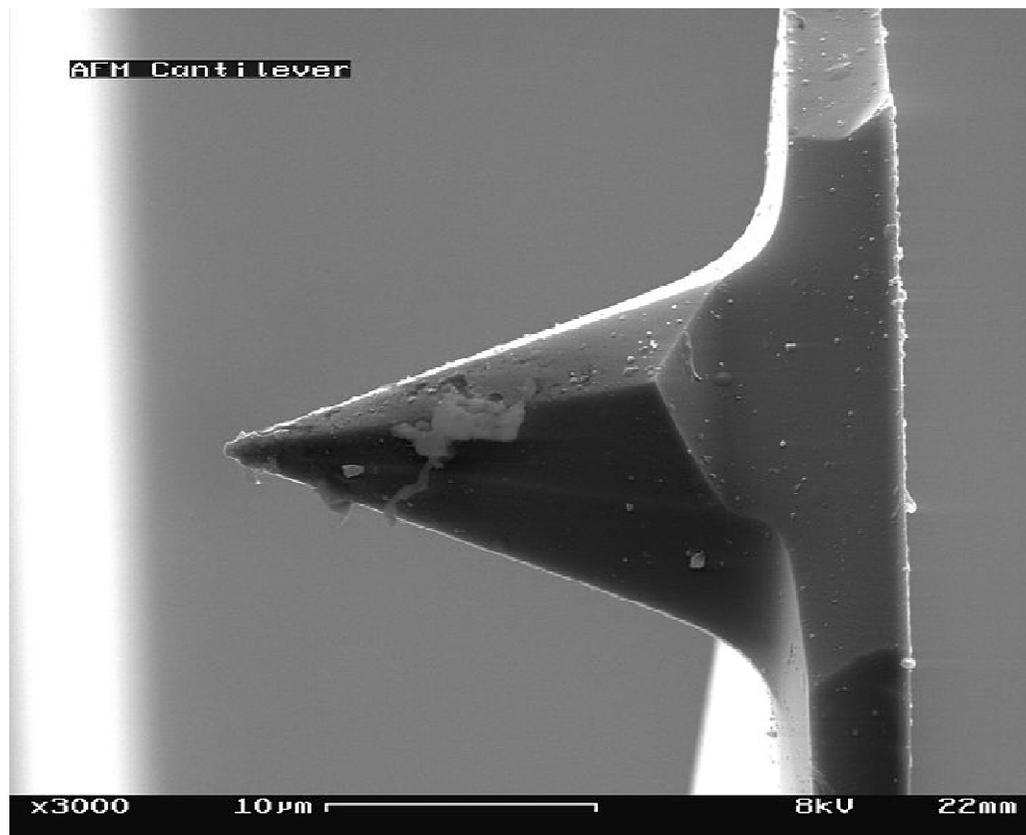
A quoi ressemble un AFM ?

C'est un levier qui porte un pointe



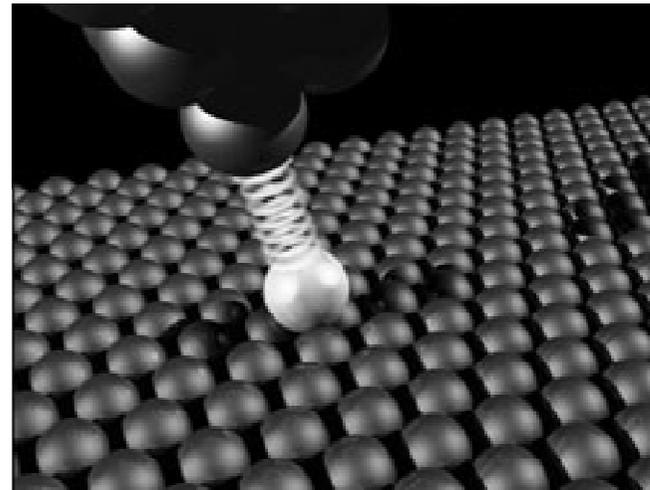
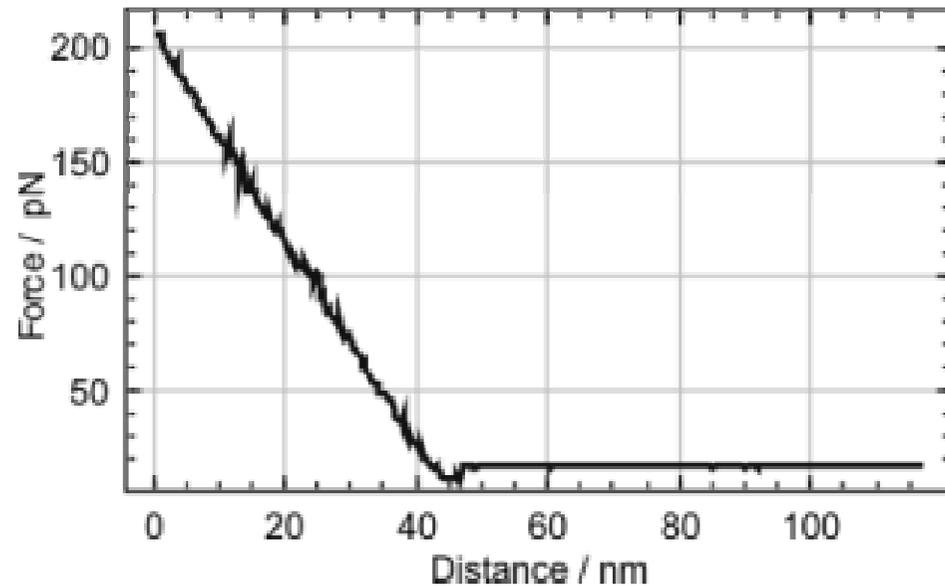
A quoi ressemble une pointe AFM ?

Une pointe AFM en nitrure de silicium (Si_3N_4)

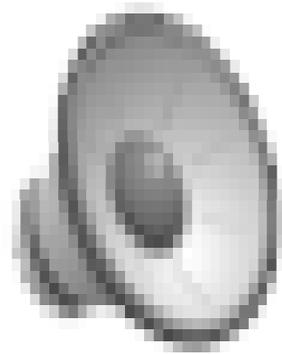


Qu'est-ce qu'on mesure ?

La relation entre la distance et la force

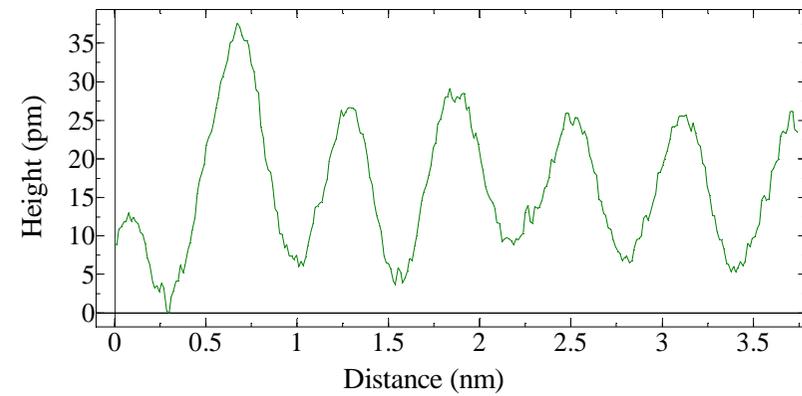
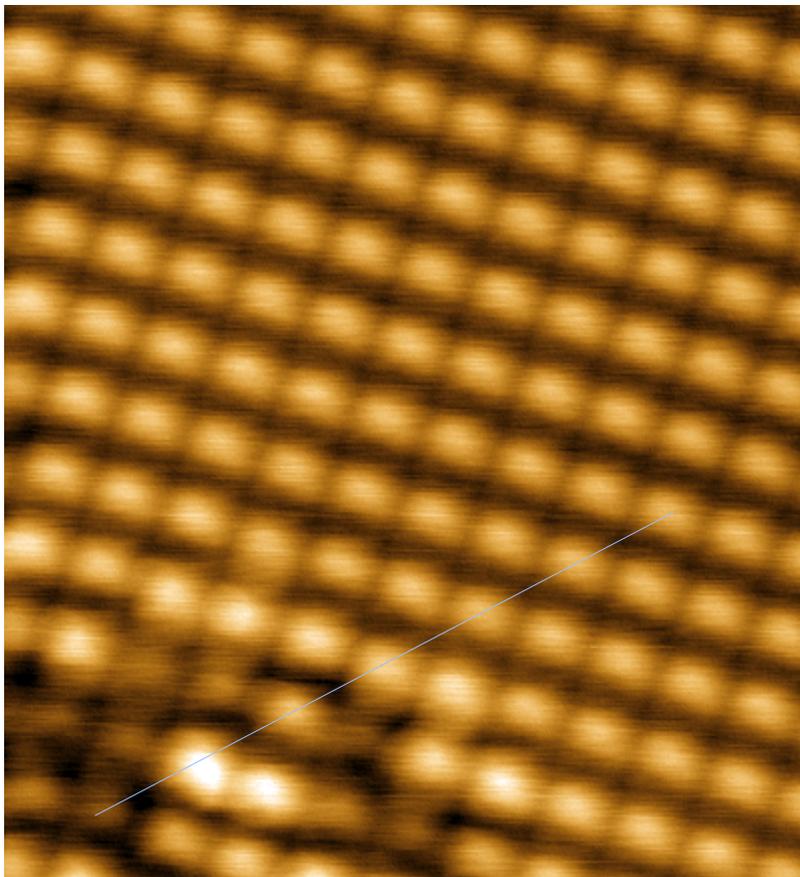


L'imagerie AFM



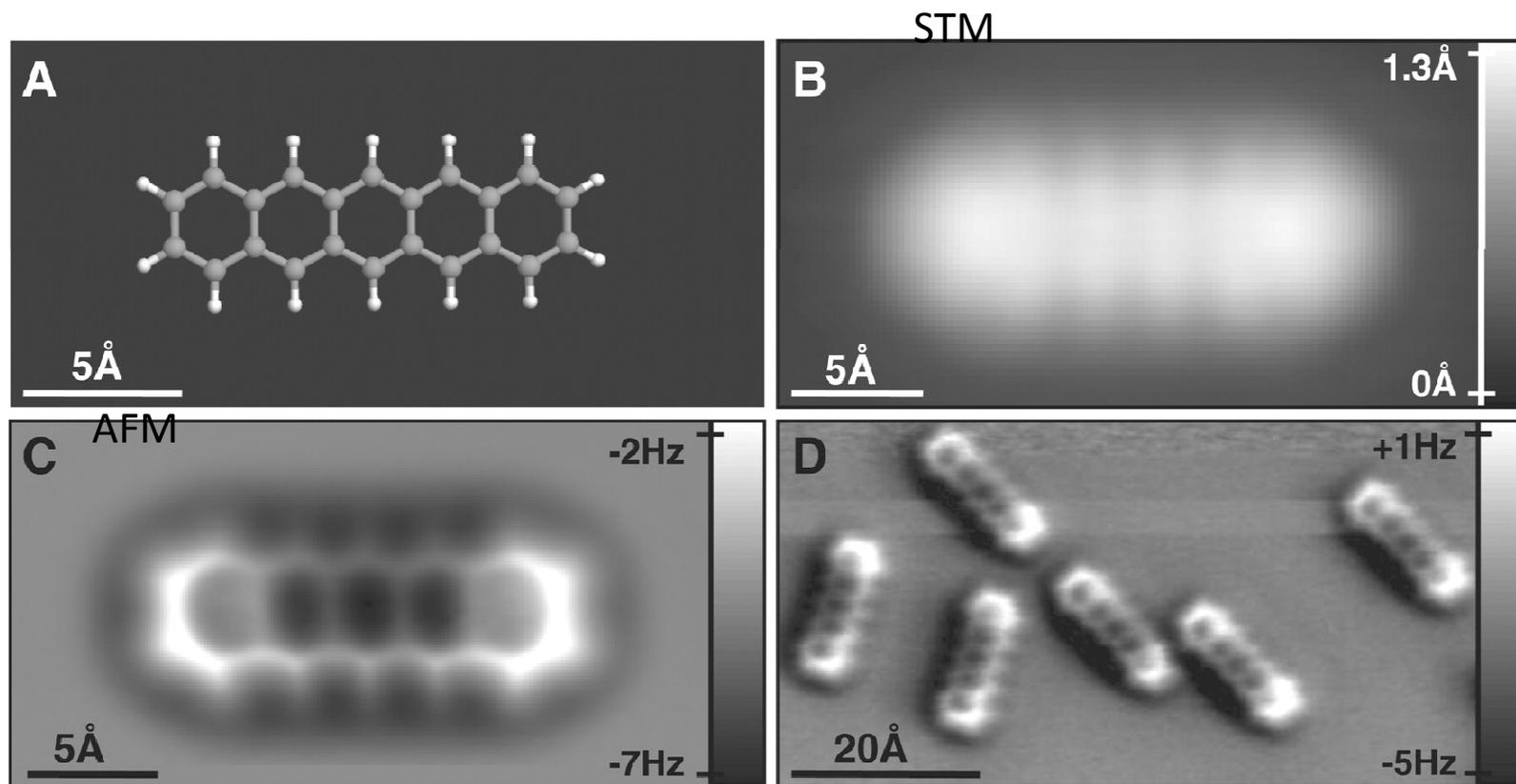
La résolution atomique

Une surface de sel (NaCl)



Imagerie AFM/STM : Molécules

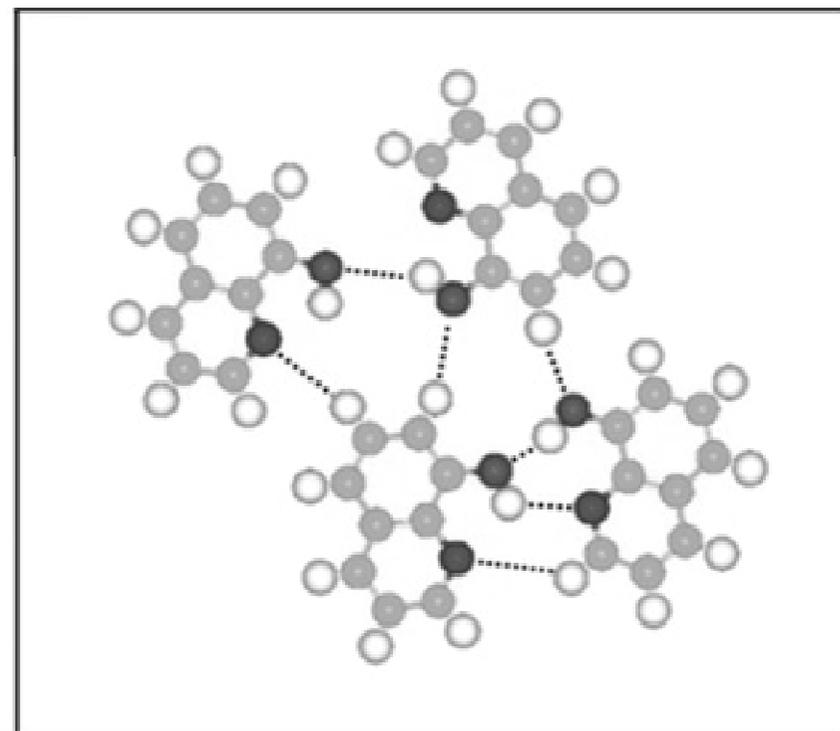
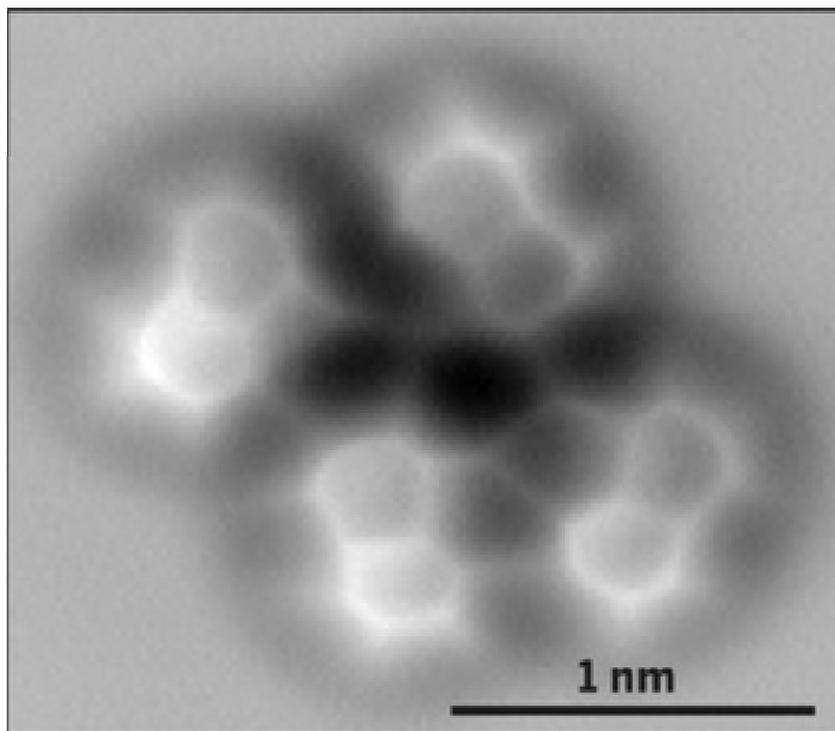
Pentacène sur cuivre (Cu) (L. Gross, IBM, Zurich, 2009)



Visualiser les liaisons faible

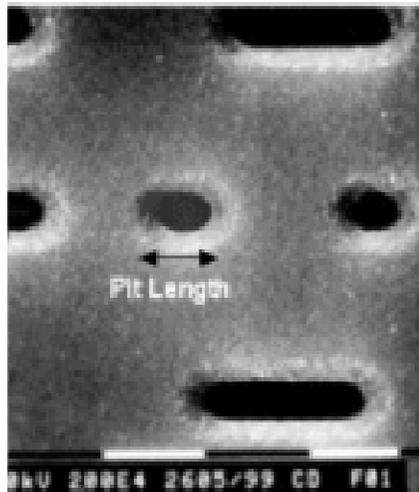
8-hydroxyquinoline sur cuivre (X. Qiu, Pékin, 2013)

C = gris, H = blanc, O = rouge, N = bleu, Cu = orange.



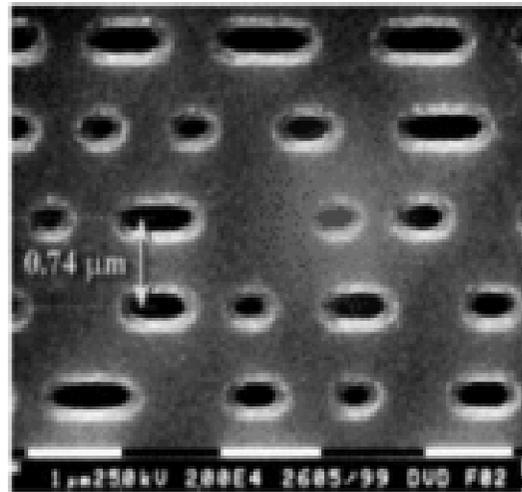
AFM et les médias

CD 0.7 Gbyte



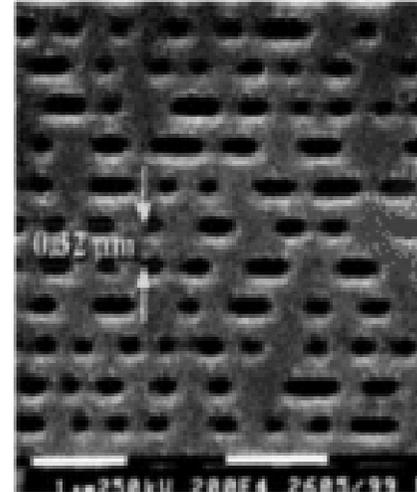
Pitch: 1,6 micron
um Pit Length: 0,8 μm
Storage Density: 0,41 Gb/inch²

DVD 4.7 Gbyte



Track Pitch: 0,74 micron
Minimum Pit Length: 0,4 μm
Storage Density: 2,77 Gb/inch²

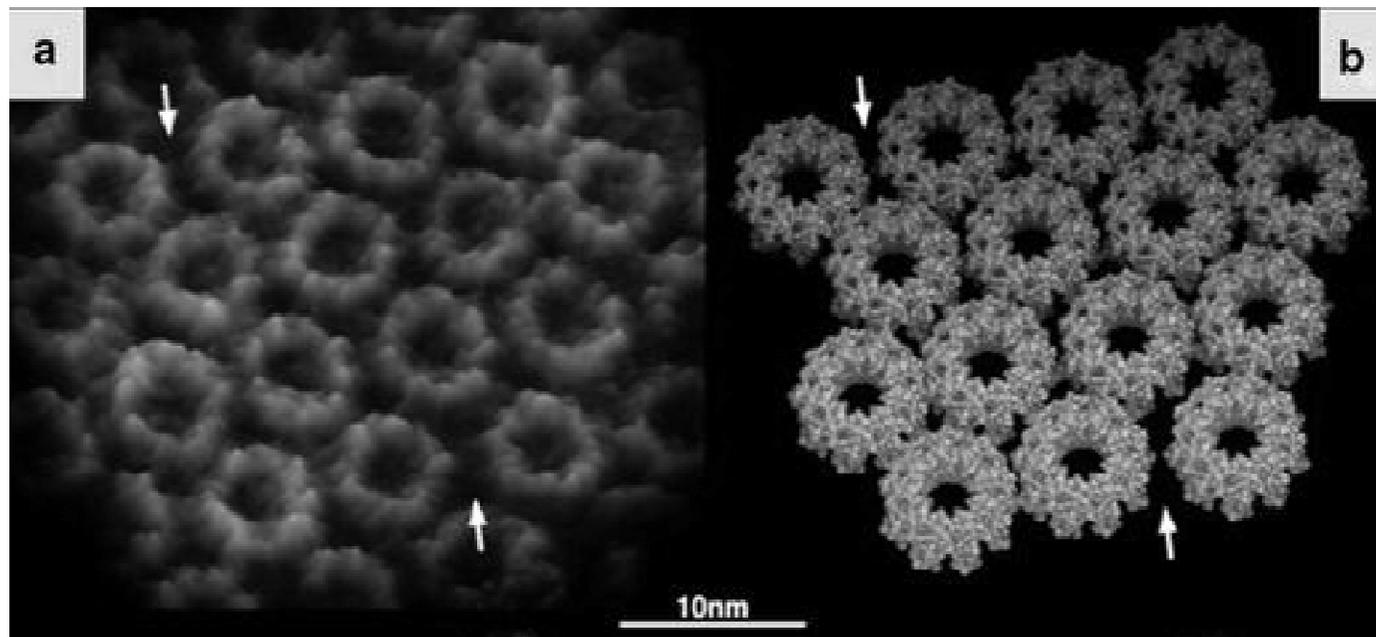
Blu-ray Disc 25 Gbyte



Track Pitch: 0,32 micron
Minimum Pit Length: 0,15 μm
Storage Density: 14,73 Gb/inch²

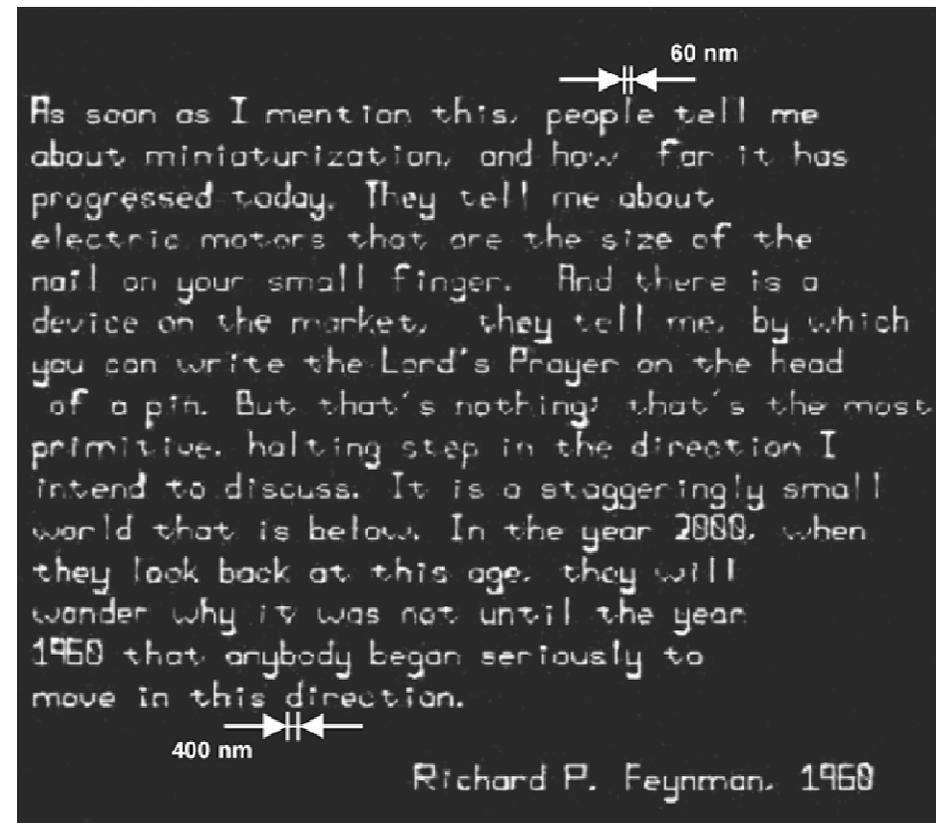
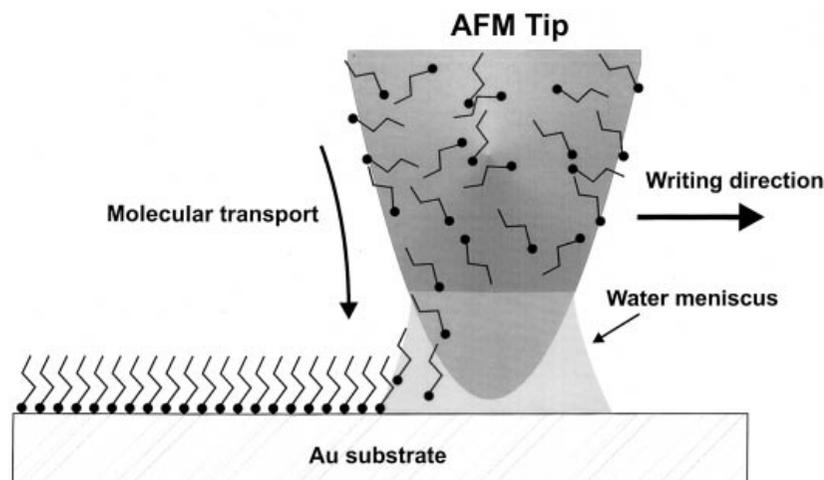
AFM en biologie

Une membrane cellulaire (S. Scheuring, MFAB Luminy)



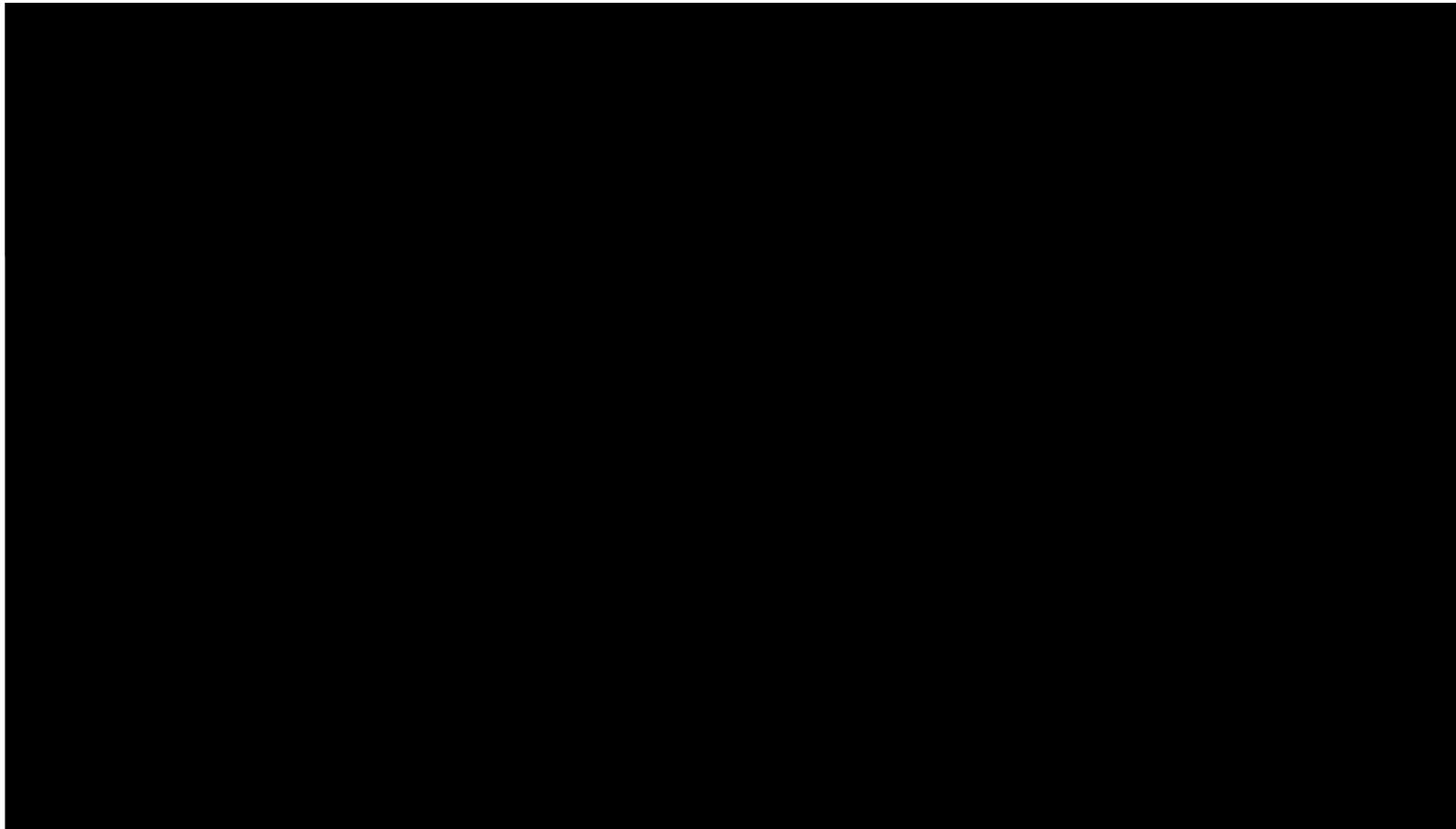
Le nano-stylo

Une transcription du discours de Feynman (C. Mirkin, 1999)



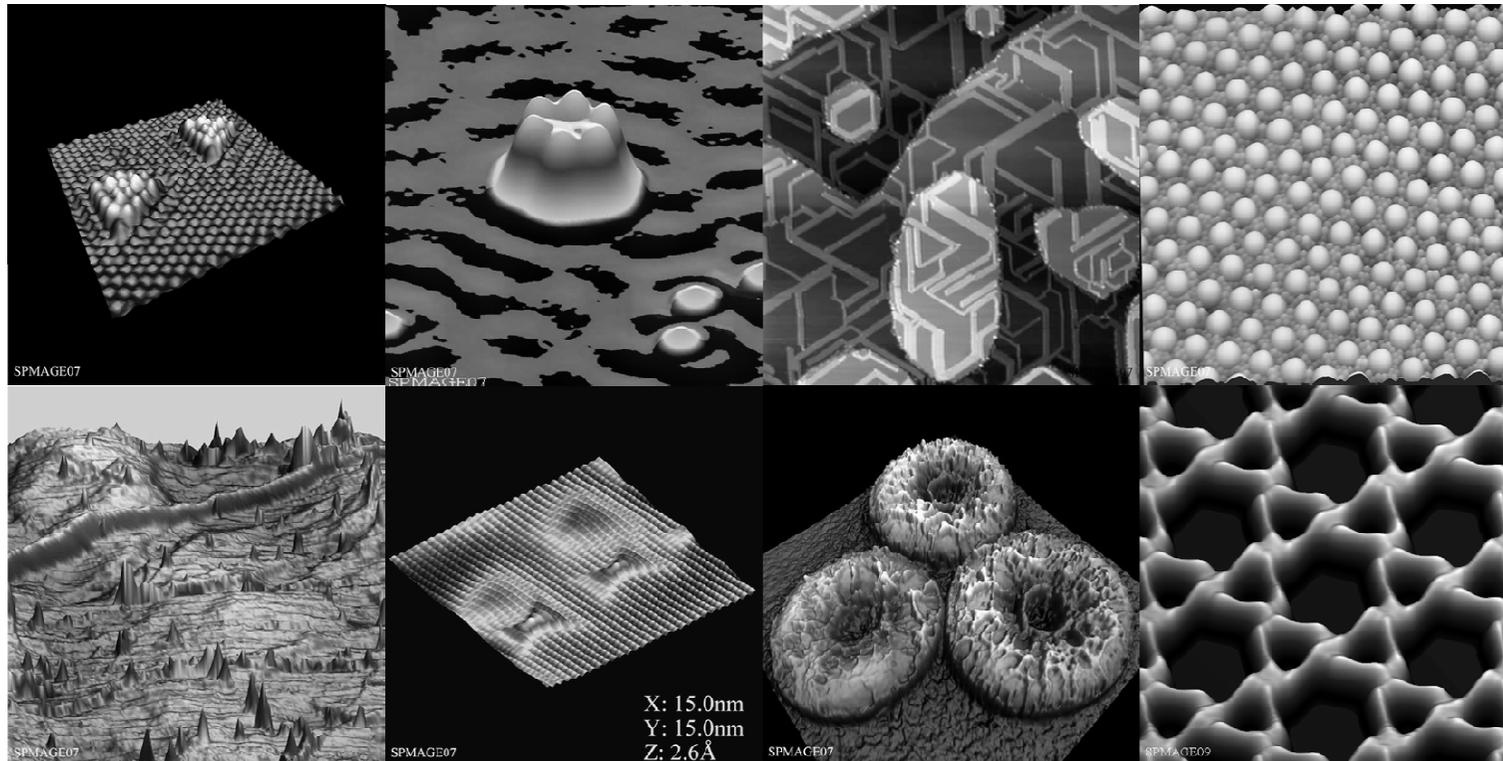
Le plus petit film du monde

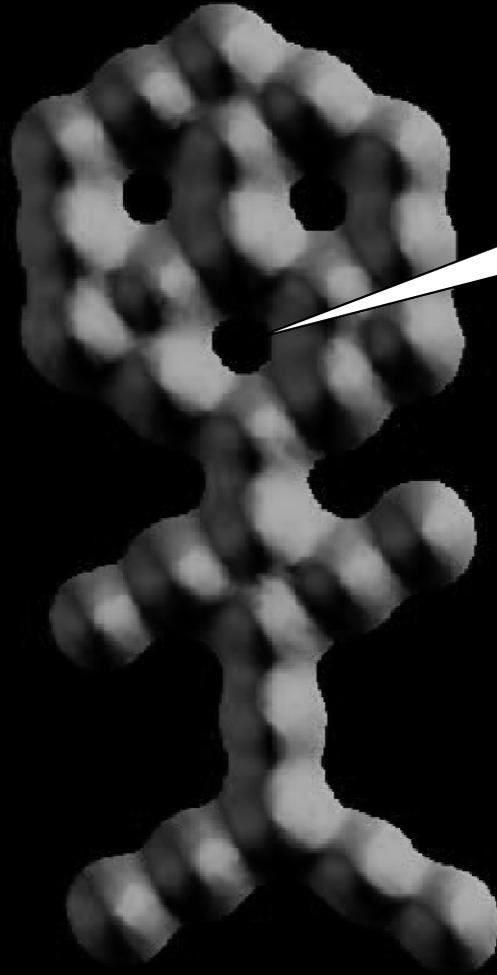
A. Heinrich, IBM, San Jose



Pour les plus belles images

<http://www.icmm.csic.es/spmage/>





À bientôt.