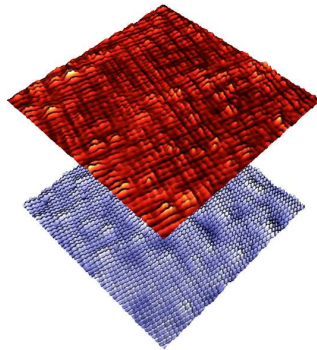


Physique Contemporaine PHQ-171

La nanoscience et les nanotechnologies

Christian Lupien



5 sept et 7 oct 2009

UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE

1

Qui?

- Donne cours de niveau maîtrise: Techniques de caractérisation des matériaux II (nano- et micro-caractérisation)
- Recherche expérimental:
 - Microscopie / Spectroscopie à balayage à effet tunnel
 - Très basses températures (300 mK et 20 mK)
 - Haut champs magnétiques (17 T)
 - Matériaux fortement corrélés (par exemple supraconducteurs à haute température critique)

5 sept et 7 oct 2009

UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE

2

Pour voir petit



GRANDE Destruction!!

5 sept et 7 oct 2009

Pour voir petit



Construction

5 sept et 7 oct 2009

Plan

- Introduction à la nanoscience / nanotechnologie histoire
- Nano-objets
- Nanotubes
- Comment les mesurer ?
- Techniques d'observations et contrôle (SPM)

Deux articles à lire:

<http://www.physique.usherbrooke.ca/taillefer/Contemporaine.html>

Site intéressant:

<http://en.wikibooks.org/wiki/Nanotechnology>

Nanosciences

Nano?



TATA NANO



iPod NANO

Nano est un terme populaire!

Histoire

- Le terme nano-technology provient de Norio Taniguchi lors d'une conférence en 1974 à propos du contrôle des couches minces dans les semiconducteurs.
- Populaires depuis années 90...
 - Buzzword: nano-(science, technologie, fluide...)
 - Populaire Financement
 - Centres et Groupe de recherche nano (Nano Québec)
- Vieille science dans certains cas:
 - Crème solaire, pigment peinture, certain catalyseur
- La science fiction se fait rattraper tranquillement

Prix Nobel de 2007

Albert Fert

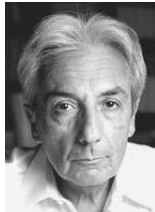


Photo: B. Fert, Invisuphoto

Peter Grünberg



Photo: © Forschungszentrum Jülich

Découverte de la magnétorésistance géante

1988

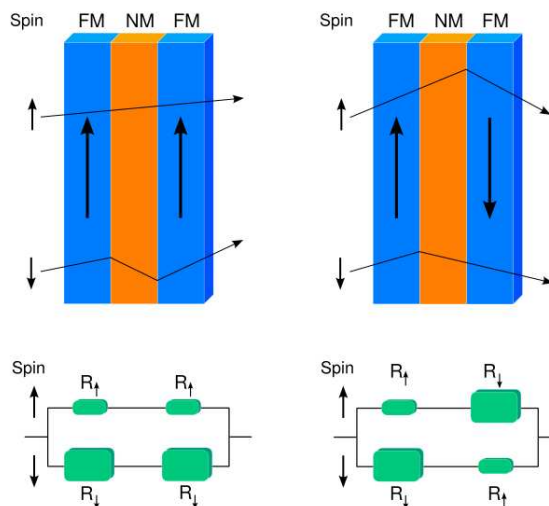
Multicouches magnétique/non-magnétique : spintronique

Tête de lecture des disques durs moderne

(1er disponible en 1997 par IBM, 16.8 GB)

5 sept et 7 oct 2009

GMR



GNU Free Documentation License

5 sept et 7 oct 2009

Vision du futur

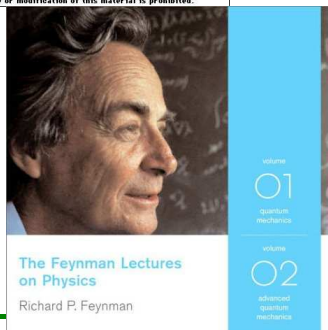
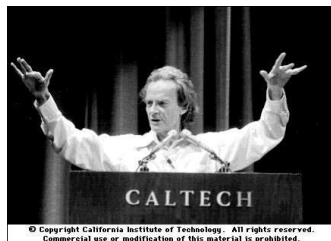
Le 29 décembre 1959, Richard P. Feynman a fait une présentation très connu à Caltech:

There's Plenty of Room at the Bottom
An Invitation to Enter a New Field of Physics

Peut-être lu à:

<http://www.zyvex.com/nanotech/feynman.html>

Richard P. Feynman



Vision du futur

- Plusieurs prédictions/suggestions de Feynman sont devenues réalité
- 1959: premier circuits intégrés (dizaine de transistors)
- 2007: on atteint les milliards de transistors et des dimensions de 45 nm (loi de Moore: densité double tous les 24 mois)
- Années 80s : microscopes à balayage de sonde (SPM) – outils atomiques
- Années 90s : C60, nanotubes ...

Nanoscience?

- Définition de nano-: échelle du nanomètre (nm)
 10^{-9} m
- Définition de micro-: échelle du micromètre (μ m, micron) 10^{-6} m
- Autre unités:
 - Ångström (Å) 10^{-10} m: espace inter-atomique, rayon-X
 - Picomètre 10^{-12} m: utiliser en microscopie tunnel
 - Femtomètre 10^{-15} m: dimension du noyau atomique, des proton/neutron, quarks, physique des particules... Détecteur d'ondes gravitationnels

Nanoscience?

- Définition de nanoscience, nanotechnologie:
 - Ce qui a au moins une dimension de l'ordre du nanomètre (nanotube, C60, ADN)
 - La plupart des molécules sont de l'ordre du nanomètre alors toute la chimie est nano?
 - Un peu de design de la structure
 - Pas de définition exacte ou précise.
 - Utilisation de phénomène quantique (confinement)
 - Dimension donne de grande surface \Rightarrow catalyse, supracondensateur ...

Dimension nm

- Miniaturisation n'est pas nécessairement de la nano (électronique à 45 nm)
- Miniaturisation ultime : atome / électron
 - Mémoire à un atome (~ 0.2 nm)
 - Transistor à électron unique -- Single electron transistor (SET)
- Miniaturisation nucléaire ?
 - Non (Seul objet macro fait seulement de nucléon est l'étoile à neutron : pas dans ma cours)

Science interdisciplinaire

- Physique (quantique, surface, état solide ...)
- Chimie (croissance d'échantillon, surfaces, ...)
- Génie (techniques du silicium, miniaturisation, ...)
- Science des matériaux
- Biochimie (machines moléculaires, médicaments, ...)

Théorie

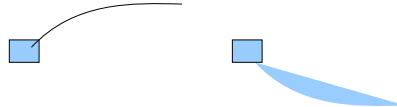
- Équation de base connue (comme pour toute le domaine de la matière condensée):
 - Équation de Schrödinger
 - Force électromagnétique seulement (pas de force faible, forte ou gravité)
- Problème est la quantité de particules qui interagissent → rend calcul difficile ou impossible
- Phénomène quantiques important: confinement (atome artificiel), nombre d'électrons importants, effet tunnel...

Confinement

Prendre une corde de guitare et la faire osciller :



Diminue la longueur en pinçant au milieu



⇒ Fréquence d'oscillation augmente!

Les électrons sont des particules et des ondes (oscillations) et les fréquences représentent l'énergie.

Un atome limite le déplacement d'une électron (champ électrique des protons)

Un point quantique fait la même chose, mais est plus flexible (atome artificiel)

Nanoscience dangereuse?

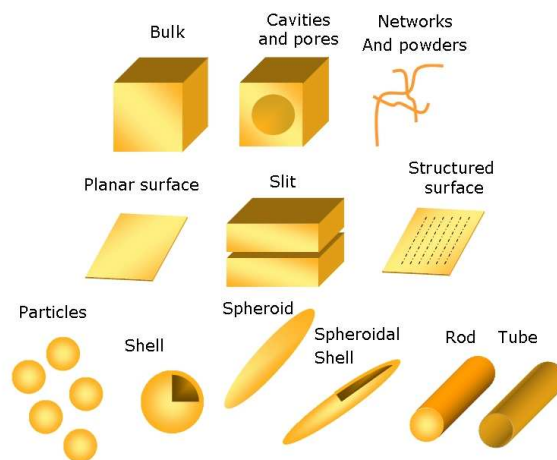
- Problème possible de toxicité
 - Petites particules
 - Effet semblable à l'amiante
- Nano-usine en folie
 - « GREY GOO »
 - Science-fiction présentement

Matériaux

Pour étudier nano, doit avoir objet nano. Il y a deux techniques de construction possible :

- Macroscopique
- Assemblage atomes par atomes (manuellement ou éventuellement avec usine auto-assemblage --- comme les cellules vivantes) : peu utilisé pour l'instant

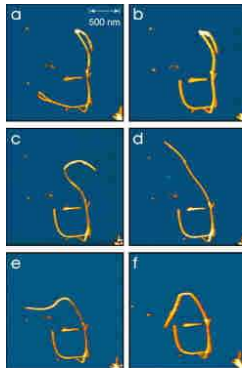
Formes d'objets nano



Ref: Opensource Handbook of Nanoscience and Nanotechnology
<http://en.wikibooks.org/wiki/Nanotechnology>

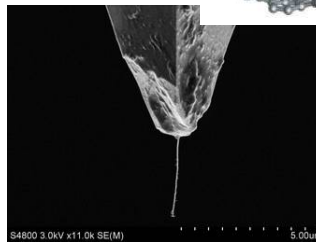
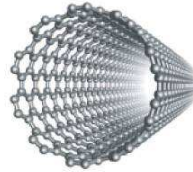
Nanoscience: exemples

- Nanotubes de carbone

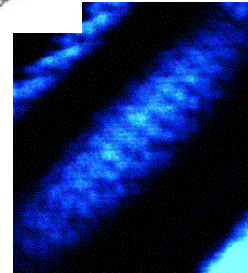


Manipulation d'un nanotube

<http://www.research.ibm.com/nanoscience/manipulation.html>



Arvind Raman, Purdue



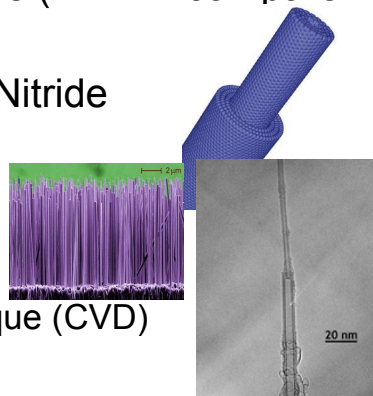
Alex Zettl, Berkeley

5 sept et 7 oct 2009

23

Nanoscience: exemples

- Nanotubes à plusieurs parois (MWNT comparer à SWNT (single))
- Nanotubes de GaN, Boron-Nitride
- Techniques de productions
 - Décharges d'arc
 - Ablation laser
 - Dépôt par vapeur chimique (CVD)
 - Cendres de combustion
- Dimensions (diamètre ~ 1.5 nm, inter-atom 1.4 Å, longueur ...)



Nanotubes GaN, produit ultraviolet

5 sept et 7 oct 2009

24

Utilité des Nanotubes

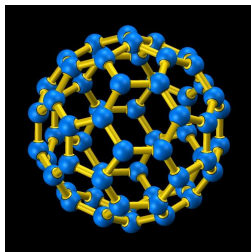
- Électronique
 - Transistors
 - Optique
 - Transport de chaleur
- Catalyseur
- Ascenseur spatial
 - Plus fort que l'acier
 - Léger
 - Nécessite un câble (pas encore fonctionnel)
 - Science-fiction

5 sept et 7 oct 2009

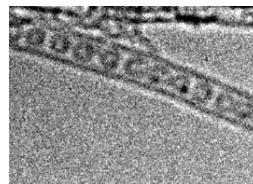
25

Nanoscience: exemples

- Fullerène (bucky-balls) C60...

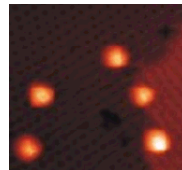


C60
<http://sbchem.sunysb.edu/msl/fullerene.html>



Nanopod (fullerène dans un nanotube)
A. Khobystov, Univ. of Nottingham

C60 par STM
<http://katana.dimes.tudelft.nl/1999/c4/41-nanoics-03.htm>

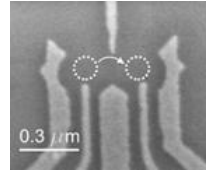


5 sept et 7 oct 2009

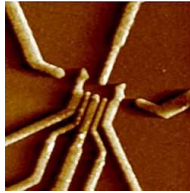
26

Nanoscience: exemples

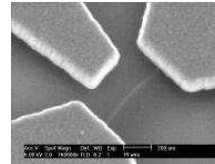
- Point quantiques (quantum dots)
- Techniques semiconductrices
- Ordinateur quantique



<http://qt.tn.tudelft.nl/research/spinqubits/>



<http://qt.tn.tudelft.nl/research/nanotubes/>



5 sept et 7 oct 2009

27

Nanoscience: exemples

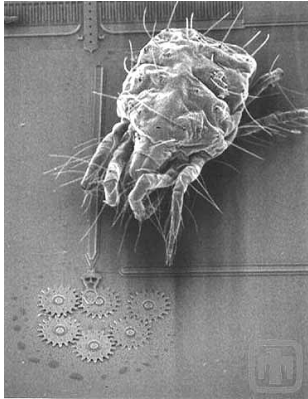
- Structures multi-couches
 - Points quantiques
 - Diodes lasers (arrangement des couches et points modifie la fréquence)
 - Transistors, électronique, ...

5 sept et 7 oct 2009

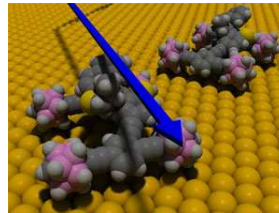
28

Nanoscience: exemples

- Machines mécanique micro-nano



Mites et engrenages (micromachinage dans le silicium)
<http://mems.sandia.gov/scripts/images.asp>



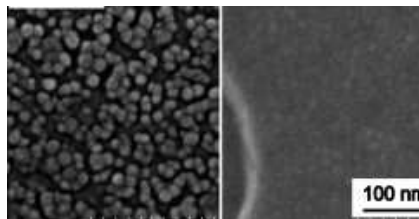
Yasuhiro Shirai/Rice University
Seulement théorique pour l'instant

5 sept et 7 oct 2009

29

Nanoscience: exemples

- Micelles sensible à la lumière (chimie/biologie)
- Utile (futur) pour transporter un médicament et l'activer à l'endroit voulu



Jiang, Tong, Zhao (Sherbrooke), JACS **127**, 8290 (2005).

5 sept et 7 oct 2009

30

Nanorobot

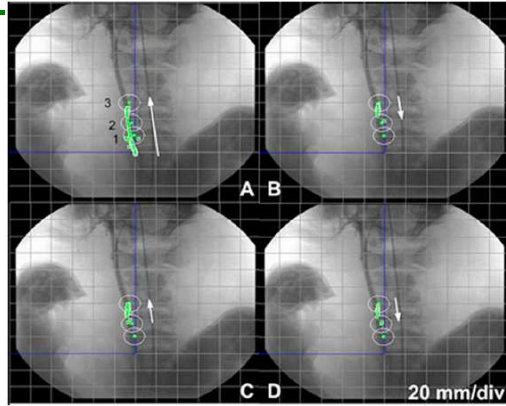


FIG. 2. *In vivo* automatic navigation of a 1.5 mm ferromagnetic bead inside the carotid artery of a living swine. The trajectories are superimposed over an x-ray angiography. The line of dots over the artery shows actual displacement of the bead. The circles (20 mm diameter) around each waypoint show precision tolerance region. Arrows show the direction of displacement. Im-

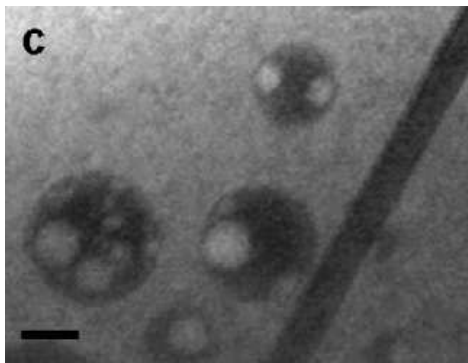
Applied Physics letters **90**, 113105 (2007)

5 sept et 7 oct 2009

UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE

31

Nanoscience récente



Échelle 100 nm,
J.A. Hanson et al. Nature 4 sept 2008
Nano émulsion eau-huile-eau
Utilité: alimentation, médicaments, procédés industriels

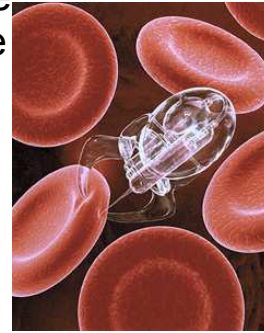
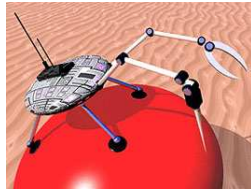
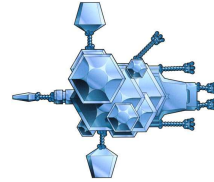
5 sept et 7 oct 2009

UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE

32

Nanoscience : mauvais exemples

- Nanites (star trek)
- Nanocytes (stargate sg-1)
- Micromachine réparant un globule rouge (gagnant Vision of Science 2002 pour nanotechnology)



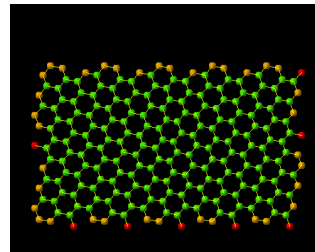
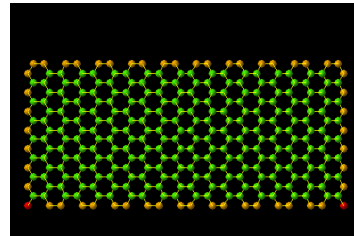
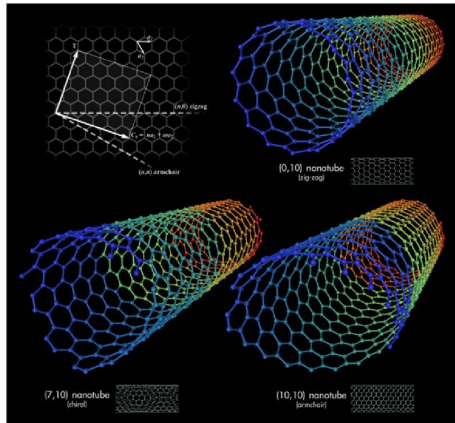
Fin première partie

Les Nanotubes

5 sept et 7 oct 2009

35

Caractérisation: exemple



De http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_nanotube
GNU Free Documentation License

<http://www.photon.t.u-tokyo.ac.jp/~maruyama/nanotube.html>

5 sept et 7 oct 2009

36

Caractéristiques des Nanotubes

- longueur, diamètre, pli
- Chiralité (structure interne)
 - Armchair (10-10) est **métalique**
 - Zigzag (10-0) **isolant**
- Conductance électrique, effet quantiques
- Contrôle de la croissance
 - Faire pousser un tube à l'endroit voulu
 - Contrôler ses dimensions

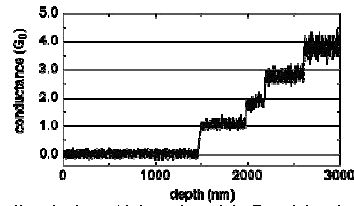
Comment mesurer la conductance

- Échantillon macroscopique
 - Mettre des contacts aux extrémités
 - Faire passer un courant
 - Mesurer le voltage

Mais il y a un problème avec des nano-objects

Mesure électrique

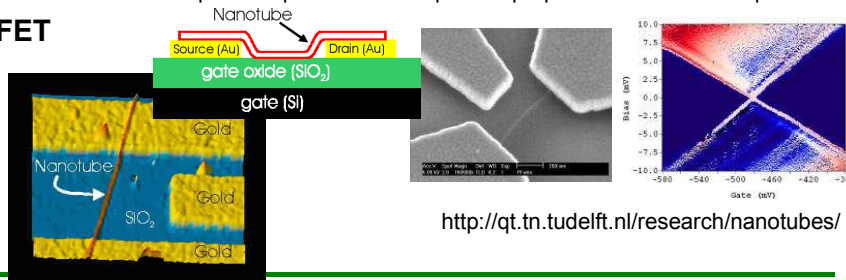
Conductance quantifié d'un nanotube (conductance balistique)



Above: A carbon nanotube is a quantum conductor. The conductance rises by $1 \cdot 0_0$ as the depth increases sufficiently. [5]

<http://www.pa.msu.edu/cmp/csc/ntproperties/electricaltransport.html>

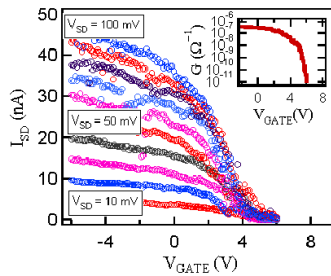
FET



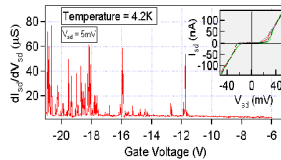
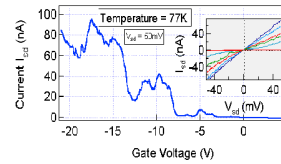
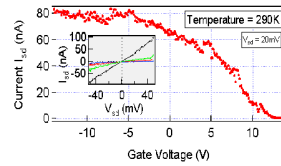
<http://qt.tn.tudelft.nl/research/nanotubes/>

Mesure électrique : $V \neq R I$ (plus de loi d'Ohm)

Mesures FET



<http://www.research.ibm.com/nanoscience/fet.html>, Applied Physics Letters, vol 73, p. 2447 (1998)



Comment positionner le nanotube?

- Déposer aléatoirement plusieurs et croiser les doigts
- Manipuler les tubes pour les placer au bon endroit (SPM ...)
- Faire croître le nanotube directement à l'endroit voulu.
 - Technique pour un bout existe
 - Deux bouts : Chance ?

Problèmes de physique quantiques

- Faire la mesure a un effet sur les résultats
 - La présence même des contacts peut avoir un effet
 - Principe d'incertitude de Heisenberg peut causer des problèmes (systèmes quantiques)
- Théoriquement on doit considérer la mesure dans son ensemble
 - Tubes
 - Et Contacts

Parce que l'objet est petit!

Comment les mesurer

Caractérisation

- Quelle information est voulue?
 - La structure global (forme)
 - La structure interne (structure cristalline, agencement moléculaire)
 - Spectroscopie
 - États énergétiques
 - Vibrations(Phonons), Rotations, magnétisme...
 - Interactions avec des surfaces, catalyseurs... (chimie)

Comment caractériser

- Pour caractériser il faut interagir
- La matière est faite d'**électrons**, et de noyaux (protons et neutrons).
- La seule force qui nous intéresse est la force électromagnétique et donc la particule qui en est le vecteur: le **photon**. (on oublie gravité – excepté pour l'ascenseur spatial, la force forte -- >MeV, la force faible – radioactivité).
- D'autres particules:
 - Muons
 - Nouvelles excitations de l'état solide: phonon, plasmon (e), exciton (e-h), polaron (e-ph), polariton (γ -?), magnon, holon, spinon, paires de Cooper

5 sept et 7 oct 2009

45

Outil de caractérisation

- Outils ont toutes les tailles

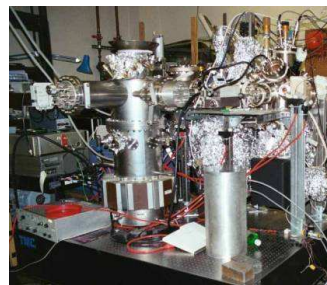
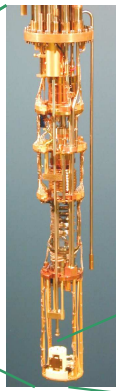
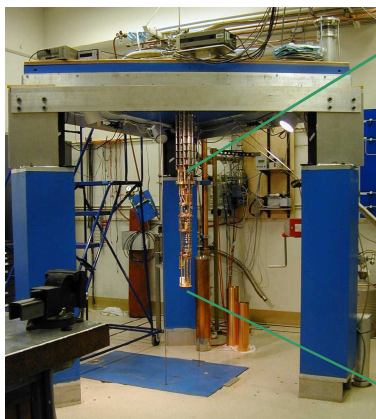
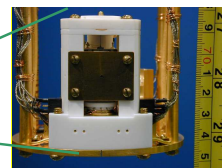


Table: VT-UHV-STM, Zettl, Berkeley



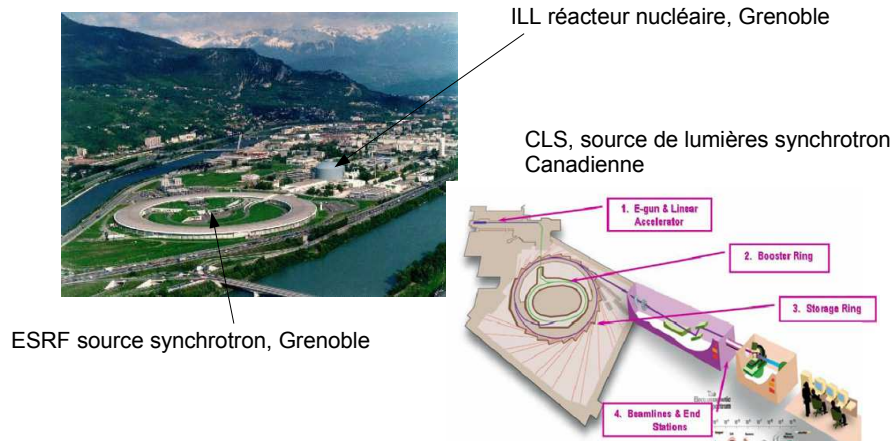
Microscope STM à très basse température, Berkeley

5 sept et 7 oct 2009

46

Outil de caractérisation

- Outils ont toutes les tailles (source de lumière)



5 sept et 7 oct 2009

47

Spectroscopie Raman : Carbone toutes formes

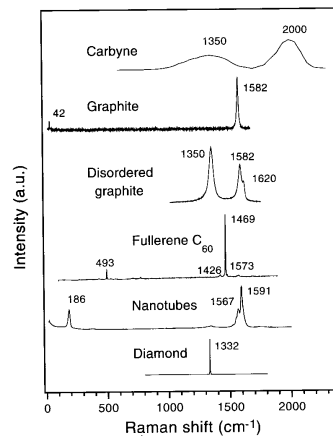


Fig. 8.1. Characteristic Raman spectra for the various carbon-based materials: carbyne (sp bonded carbon), graphite (sp^2 bonded carbon), disordered sp^2 bonded graphite, fullerene C_{60} , carbon nanotubes, and diamond (sp^3 bonded carbon) [6-8]

Weber & Merlin (2000) p. 315.

5 sept et 7 oct 2009

48

Spectroscopie Raman : chiralité des Nanotubes

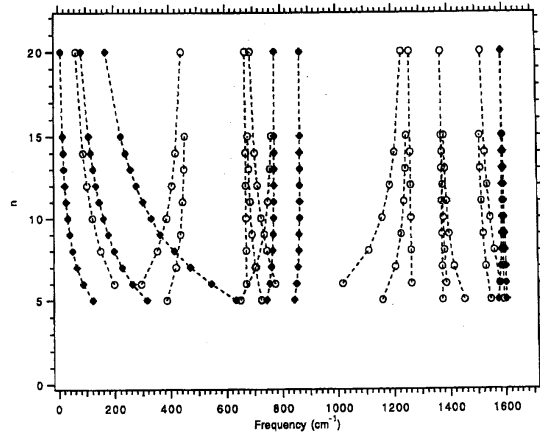
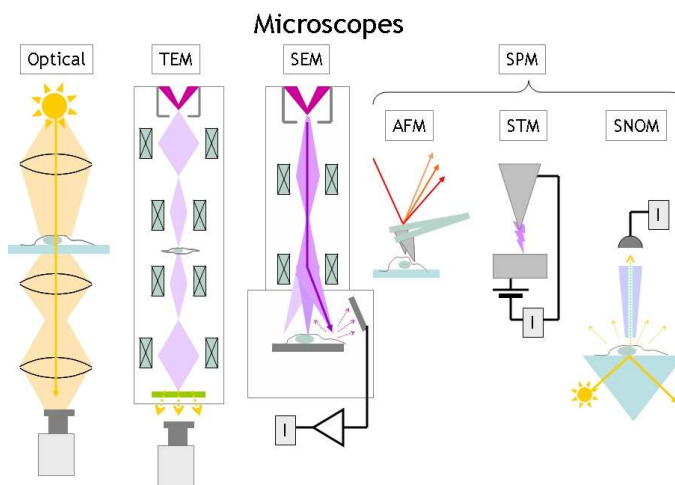


Fig. 8.20. The armchair index n vs. mode frequency for the Raman-active modes of single-wall armchair (n, n) carbon nanotubes [38]. For the armchair nanotubes the diameter is given in nanometers by $d_t = 0.138 n$

Weber & Merlin (2000) p. 342.

5 sept et 7 oct 2009

Outils d'observation



Ref: Opensource Handbook of Nanoscience and Nanotechnology
<http://en.wikibooks.org/wiki/Nanotechnology>

5 sept et 7 oct 2009

Longueur d'onde des photons

Photons:
(wikipedia,
GNU Free
Documentation
License)

$$\lambda = c / f$$

$$E = hf = \hbar \omega$$

CLASS	FREQUENCY	WAVELENGTH	ENERGY
γ	300 EHz	1 pm	1.24 MeV
HX	30 EHz	10 pm	12.4 keV
SX	3 EHz	100 pm	12.4 keV
EUV	300 PHz	1 nm	1.24 keV
NUV	30 PHz	10 nm	12.4 eV
NIR	3 PHz	100 nm	12.4 eV
MIR	300 THz	1 μ m	1.24 eV
FIR	30 THz	10 μ m	12.4 meV
EHF	3 THz	100 μ m	12.4 meV
SHF	300 GHz	1 mm	1.24 meV
UHF	30 GHz	1 cm	12.4 μ eV
VHF	3 GHz	1 dm	12.4 μ eV
HF	300 MHz	1 m	1.24 μ eV
MF	30 MHz	1 dam	12.4 neV
LF	3 MHz	1 hm	12.4 neV
ULF	300 kHz	1 km	1.24 neV
VF	30 kHz	10 km	12.4 peV
VLF	3 kHz	100 km	12.4 peV
ELF	300 Hz	1 Mm	1.24 peV
ELF	30 Hz	10 Mm	12.4 feV

5 sept et 7 oct 2009

Microscopie optique

- Résolution max ~ 200 nm
 - Confocale
 - Déconvolution
- Pour plus petits objets
 - Ultra-violet, rayon-X
 - Problème de lentille
- Voir plus petit (même des atomes?)
 - **Fluorescence!**
 - Condensat de Bose-Einstein
 - Localisation toujours limité

5 sept et 7 oct 2009

Microscopie à déconvolution

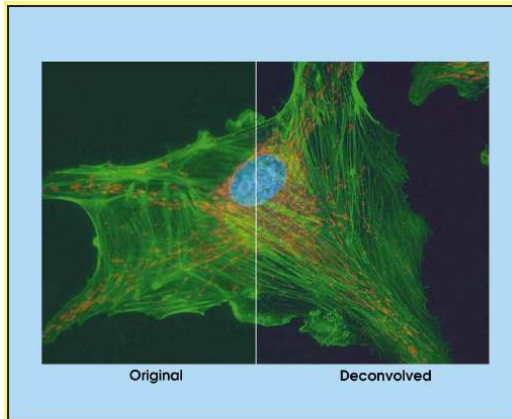


Figure 6. In 2-D wide-field fluorescence images taken of a bovine endothelial cell, the left portion shows the original image and the right, the result of 2-D iterative blind deconvolution. No microscope parameters were available to aid deconvolution. Original data courtesy of Leica Microsystems, Cambridge, UK.

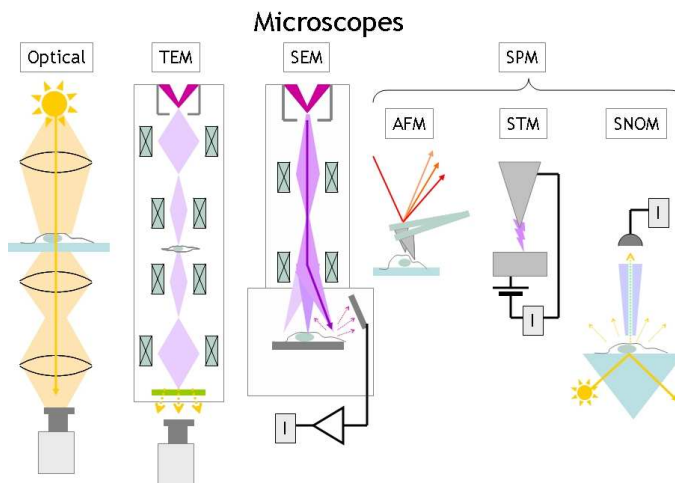
Biophotonics international, Février 2004

5 sept et 7 oct 2009

UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE

53

Outils d'observation



Ref: Opensource Handbook of Nanoscience and Nanotechnology
<http://en.wikibooks.org/wiki/Nanotechnology>

5 sept et 7 oct 2009

UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE

54

Longueur d'onde des électrons

- Énergie des électrons libres

$$E_{\text{cinétique}} = m_e v^2 / 2 = p^2 / 2m_e = \hbar \omega$$

$$\lambda_{\text{de Broglie}} = h / p = h / m_e v = h / \sqrt{2m_e E_{\text{cinétique}}}$$

Donc

$$1\text{eV} \Rightarrow 1.2\text{ nm}$$

$$100\text{ eV} \Rightarrow 0.12\text{ nm}$$

$$10\text{ keV} \Rightarrow 0.012\text{ nm}$$

Microscopie Électronique

- Longueur d'ondes des électrons propice à la résolution atomique
- Lentille électromagnétique
- Plusieurs modes de fonctionnement
 - Balayage (réflexion, rayon-X, électron secondaires ...) : images, analyse chimiques ...
 - Transmission (peut atteindre résolution atomique)
 - Transmission à balayage (peut atteindre résolution atomique)

Haute Résolution

Record de résolution
0.78Å

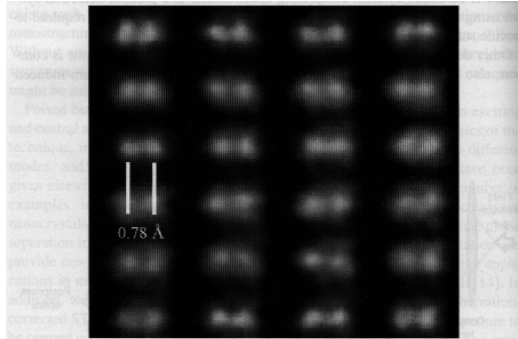


FIGURE 6.3. Z-contrast image of silicon taken along the $\langle 112 \rangle$ zone axis, resolving columns of atoms just 0.78 Å apart [adapted from ref. 15]. Image recorded with the ORNL 300 kV VG Microscopes HB603U STEM equipped with Nion aberration corrector. Image has been filtered to remove noise and scan distortion.

Scanning Microscopy for Nanotechnology, page 156.

Nanotube à plusieurs parois

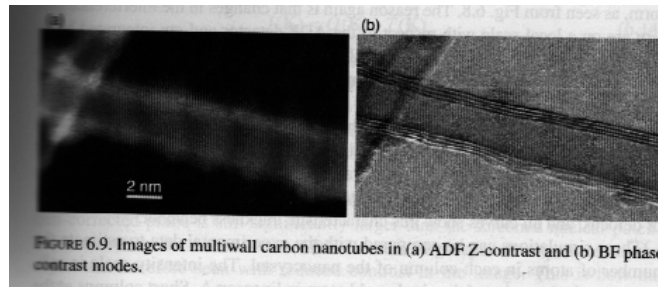


FIGURE 6.9. Images of multiwall carbon nanotubes in (a) ADF Z-contrast and (b) BF phase contrast modes.

Carbone pas très sensible pour contraste Z mais fonctionne bien en BF.

Scanning Microscopy for Nanotechnology, page 165.

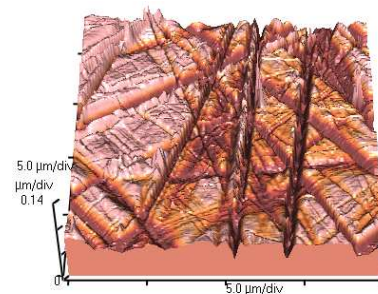
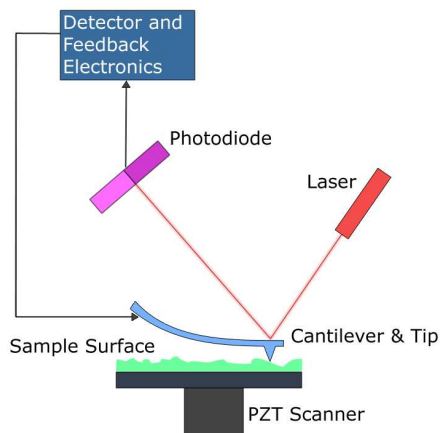
Microscope à balayage de sondes (SPM)

- **STM** : scanning tunneling microscopy (effet tunnel)
- **AFM** : Microscope à force atomique
- MFM : Microscope à force magnétique
- LFM : Microscope à force latéral
- FFM : Microscope à force de friction
- EFM : Microscope à force électrostatique
- **SNOM** : Microscope à champ proche (near)
- Et plusieurs autres ...

5 sept et 7 oct 2009

59

Schéma d'un microscope à force atomique (AFM)

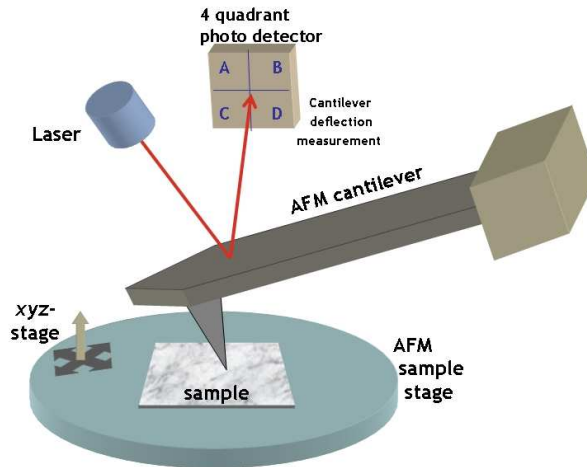


Surface de verre vu par AFM

5 sept et 7 oct 2009

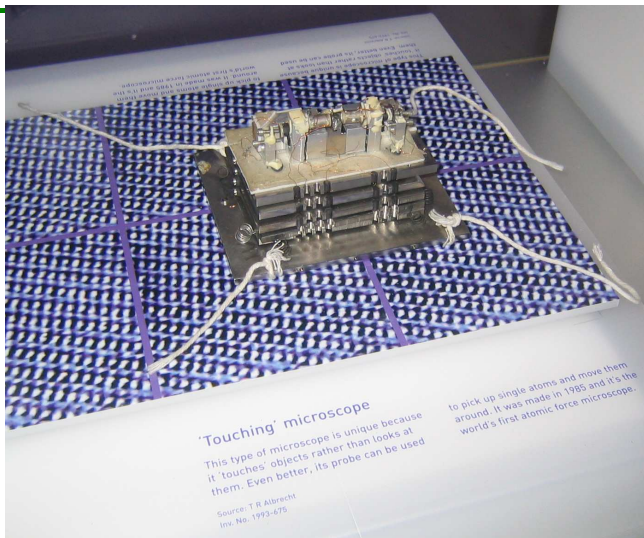
60

Schéma d'un microscope à force atomique (AFM) 4 quadrant (friction)



Ref: Opensource Handbook of Nanoscience and Nanotechnology
<http://en.wikibooks.org/wiki/Nanotechnology>

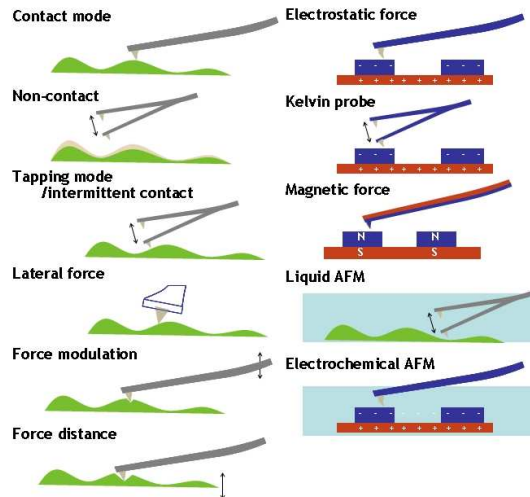
Le premier AFM



Empilement pour les vibrations

GNU Free Documentation License

Modes de fonctionnement AFM



Ref: Opensource Handbook of Nanoscience and Nanotechnology
<http://en.wikibooks.org/wiki/Nanotechnology>

5 sept et 7 oct 2009

63

Cantilever AFM

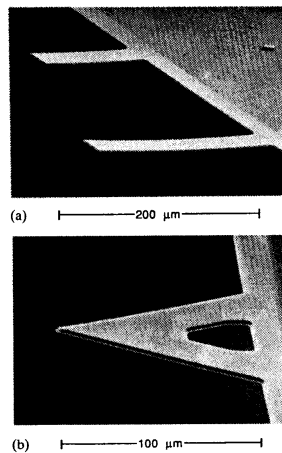


Fig. 2.4. SEM micrographs of SiO₂ microcantilevers. (a) Rectangular cantilevers. The shorter of the two has dimensions 100 μm × 20 μm × 1.5 μm, with a force constant of 1 N m⁻¹ and a resonant frequency of 120 kHz. The V-shaped cantilever shown in (b) has increased lateral rigidity which reduces its sensitivity to frictional forces (Albrecht *et al.*, 1990a).

5 sept et 7 oct 2009

64

Pointes AFM

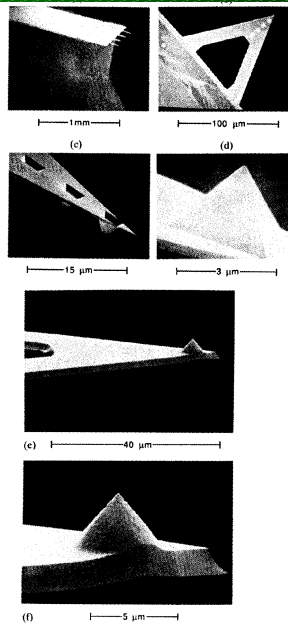


Fig. 2.5. (a)–(d) SEM micrograph of a Si₃N₄ cantilever with integrated pyramidal tip. (e)–(f) SEM micrograph of a SiO₂ cantilever with integrated conical tip (Albrecht *et al.*, 1990a).

5 sept et 7 oct 2009

AFM en action

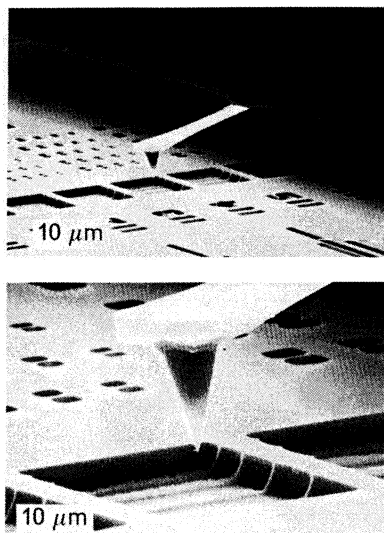
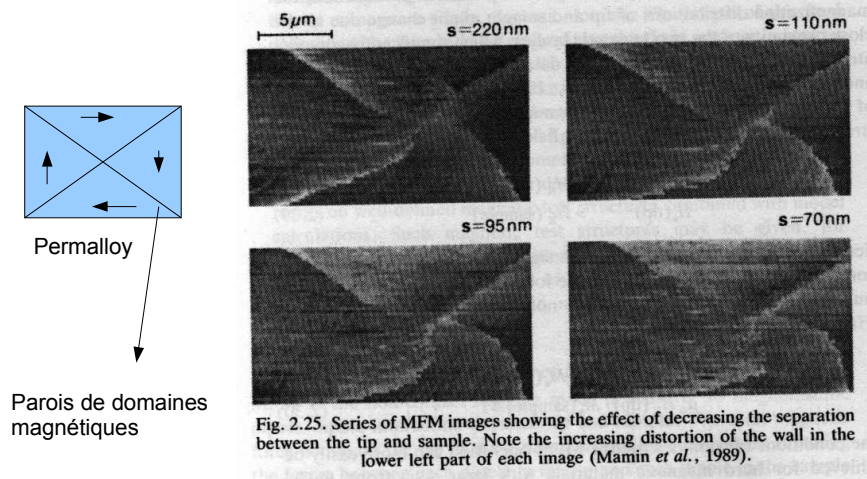


Fig. 2.6. SEM micrograph of a silicon force sensor hovering over a microfabricated test sample (Wolter *et al.*, 1991).

5 sept et 7 oct 2009

Effet de pointe (MFM)



SNOM

Microscopie en Champ Proche Optique

Champ évanescent confiné dans le champ proche de l'objet
Décroit exponentiellement avec la distance à l'objet

Nature non propagative

Comment le détecter ?

⇒ Perturbation du système
Rendre le champ évanescent propagatif

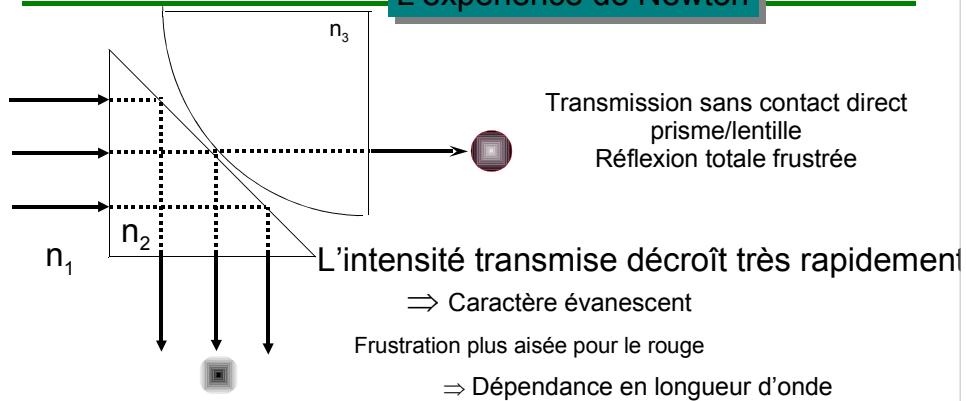
Illustration simple : Expérience de Newton

5 sept et 7 oct 2009

69

Microscopie en Champ Proche Optique

L'expérience de Newton



Met en évidence l'accès possible au champ évanescent
par perturbation de ce dernier

5 sept et 7 oct 2009

70

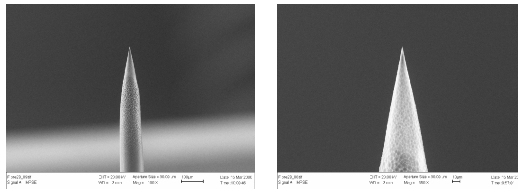
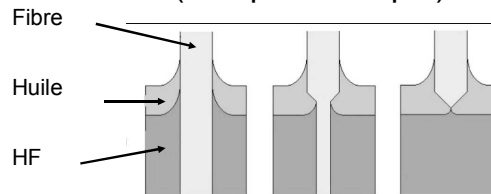
Composants d'un microscope à CPO

La sonde de champ proche :
Fibre optique effilée

Etirage à chaud
Attaque chimique

(métallisation)

(attaque chimique)



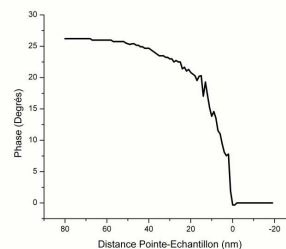
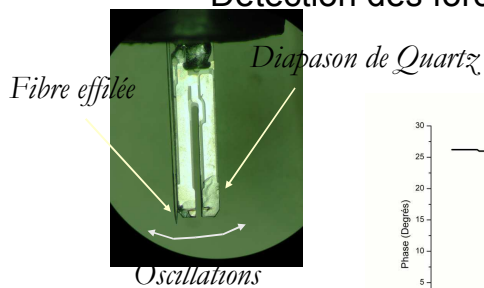
Taille de pointes : 80-120 nm

5 sept et 7 oct 2009

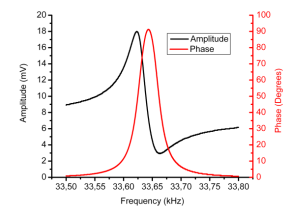
71

Composants d'un microscope à CPO

La régulation sonde/échantillon :
Détection des forces de cisaillement



Courbe d'approche



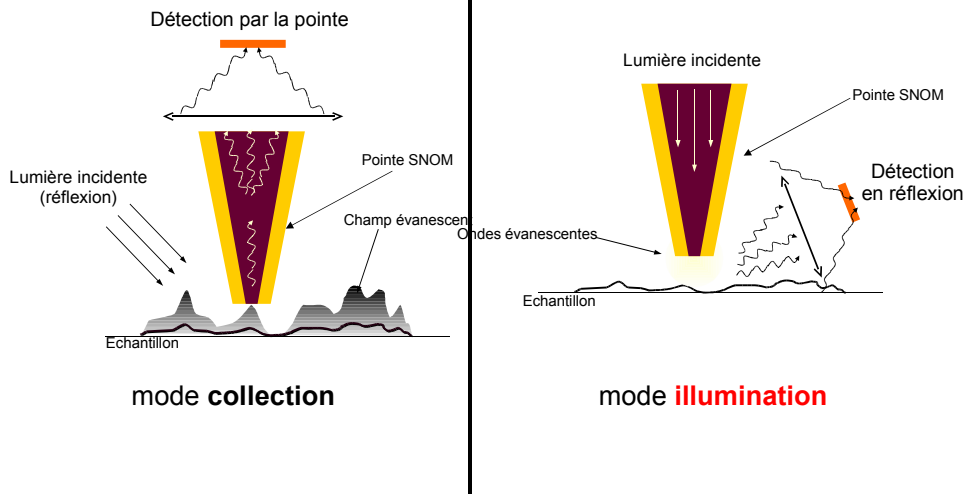
Résonance

⇒ Acquisition simultanée topographie/optique

5 sept et 7 oct 2009

72

Modes de fonctionnement



5 sept et 7 oct 2009

73

Domaines d'application Biologie – Fluorescence de molécule

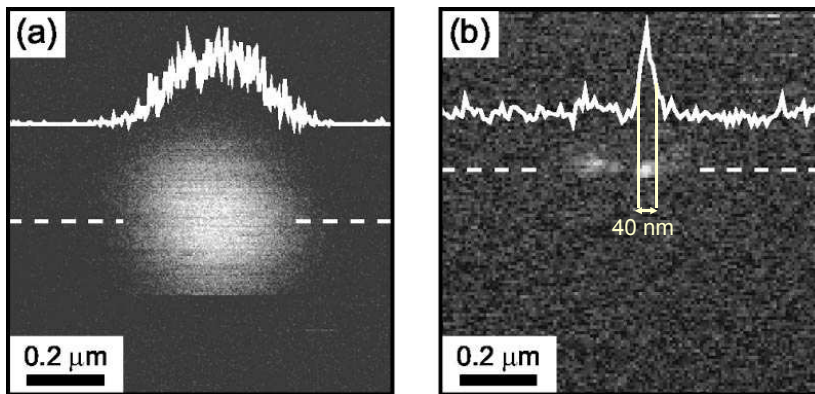


Image Microscopie Confocale

Image SNOM

Fluorescence de Rhodamine 6G

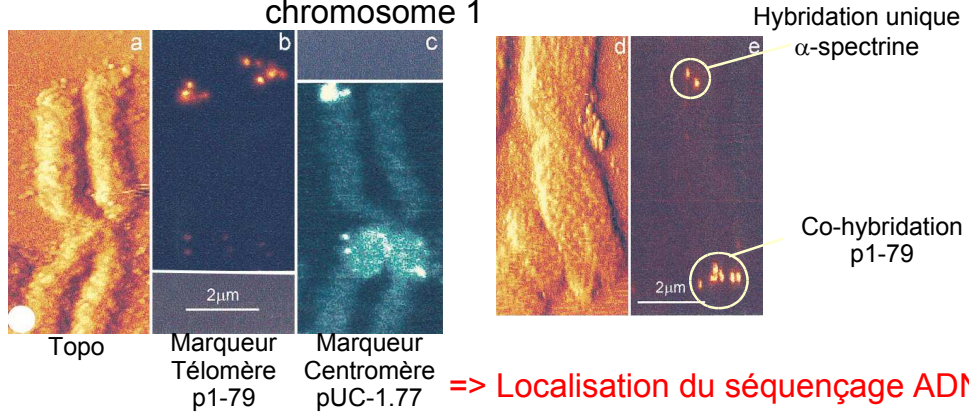
Vargas, F. J. et al. Chem. Phys., 2002, 117 (2), pp. 866-871

5 sept et 7 oct 2009

74

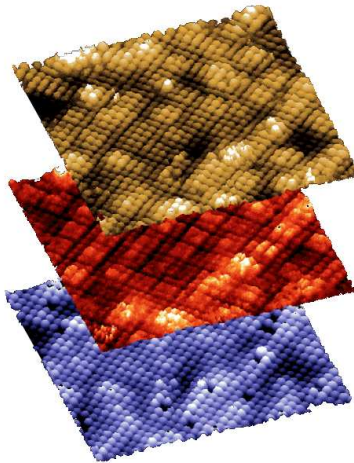
Domaines d'application Biologie – Molécules Biologiques

Hybridation in situ du chromosome 1



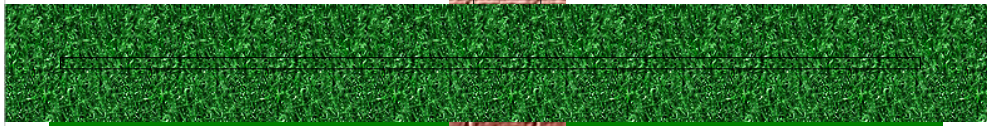
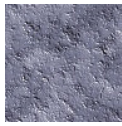
Van Hulst, N.F. J. Struct. Biol. 1997, 119 (2), pp. 222–231

STM/STS etc...



Effet Tunnel

Grande énergie : Classique et Quantique



5 sept et 7 oct 2009

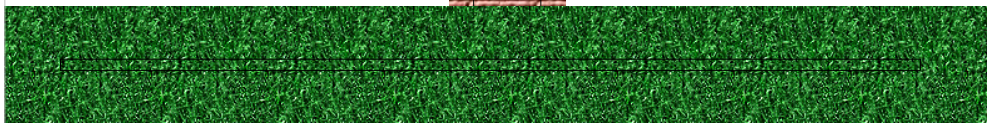


U
S
DKE

77

Effet Tunnel

Petite énergie : Classique



5 sept et 7 oct 2009

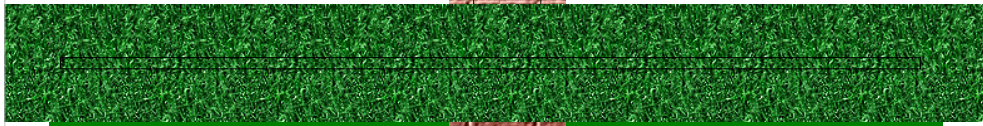
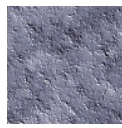


U
S
DKE

78

Effet Tunnel

Petite énergie : Quantique



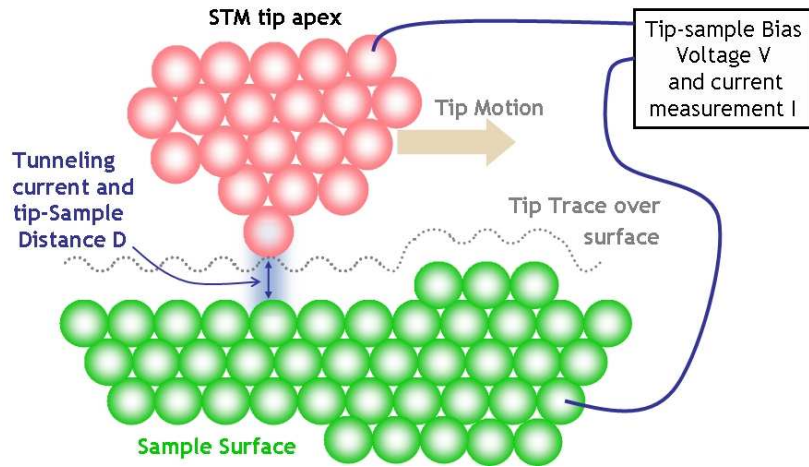
5 sept et 7 oct 2009

Effet Tunnel

- Phénomène quantique
- Une particule (électron ici) traverse un mur (potentiel) infranchissable classiquement
- Très sensible (**exponentiel**) sur la hauteur du mur et sur son épaisseur (distance)
- À comparer à la dépendance en **loi de puissance** des forces (électromagnétiques) comme pour l'AFM
- Pour STM le mur est le vide entre l'échantillon et la pointe

5 sept et 7 oct 2009

Fonctionnement STM

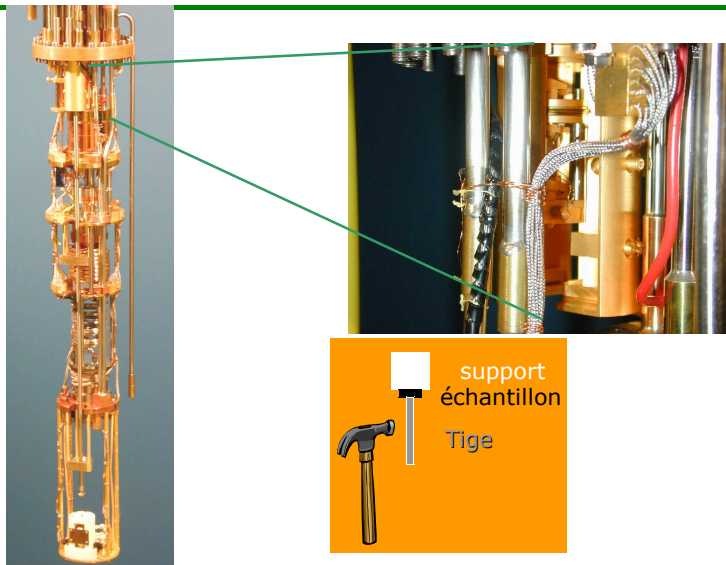


Ref: Opensource Handbook of Nanoscience and Nanotechnology
<http://en.wikibooks.org/wiki/Nanotechnology>

5 sept et 7 oct 2009

81

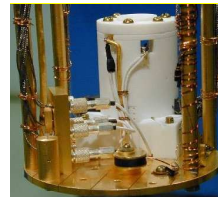
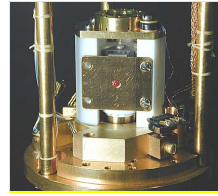
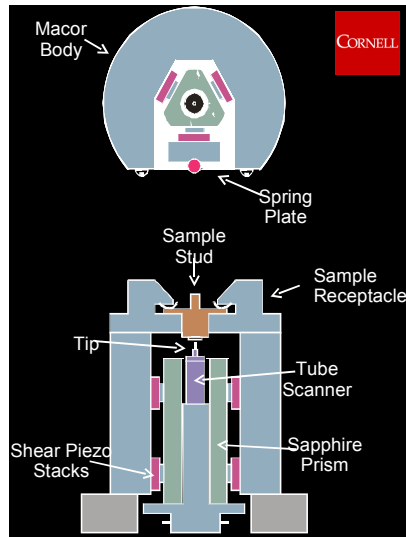
L'appareil de clivage



5 sept et 7 oct 2009

82

Design de l'instrument pour STM/STS



Besoin : mK, pièce avec écran acoustique/RF

Rev. Sci. Inst. **70**, 1459 (1999)

5 sept et 7 oct 2009

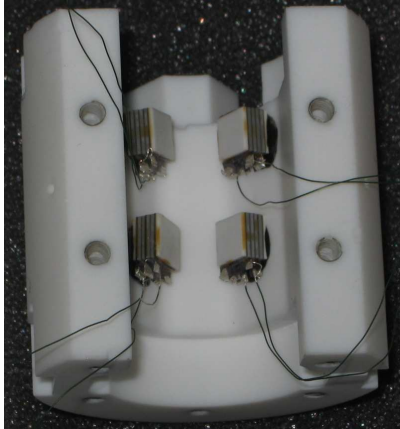
Microscope



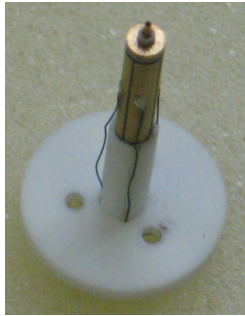
Un microscope en morceaux...

5 sept et 7 oct 2009

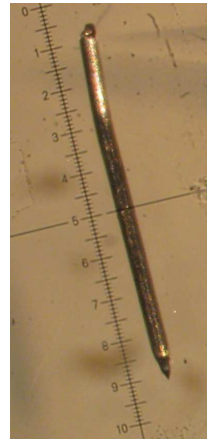
Microscope



Corps du marcheur



Coeur du microscope
Piezo XYZ et
porte-pointe



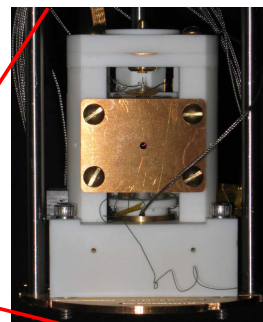
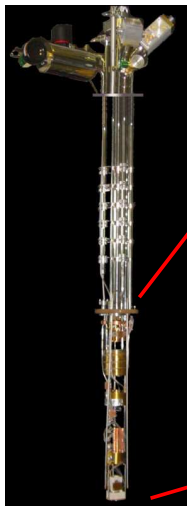
Pointe de Tungstène
8mm

5 sept et 7 oct 2009

85

Microscope assemblé

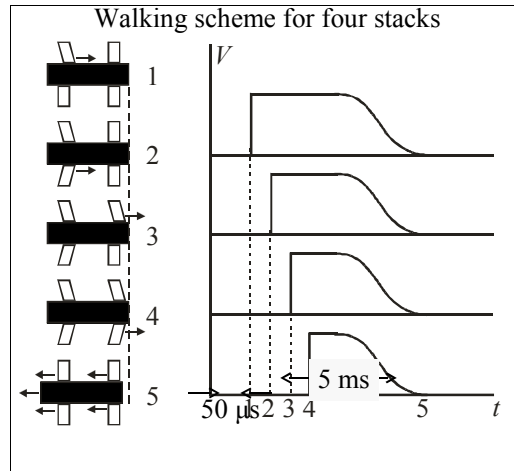
Cryostat



5 sept et 7 oct 2009

86

Approche grossière

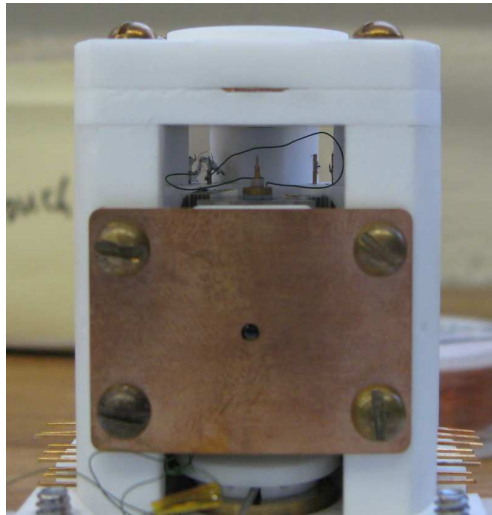


5 sept et 7 oct 2009

UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE

87

Déplacement Marcheur (bas)

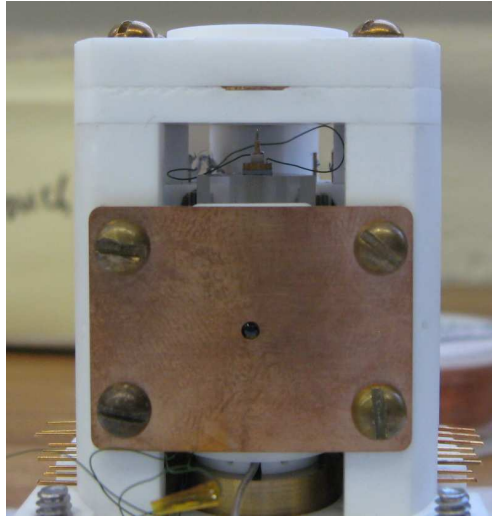


5 sept et 7 oct 2009

UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE

88

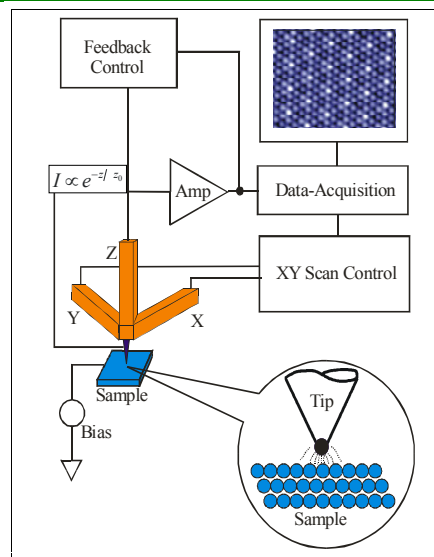
Déplacement Marcheur (haut)



5 sept et 7 oct 2009

89

Technique STM



Dans l'air (saleté)

Dans le vide

UHV (T
variable)

Cryogénique (le
meilleur vide)

Stabilité

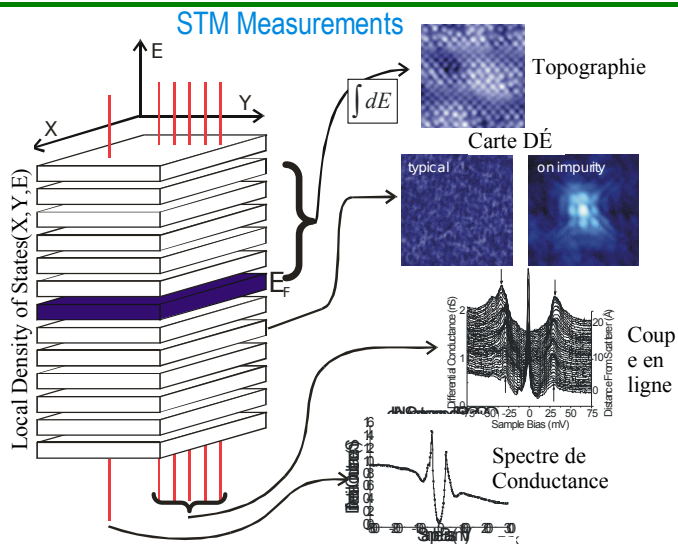
Thermale

Surface

5 sept et 7 oct 2009

90

Microscopie à Balayage à Effet Tunnel

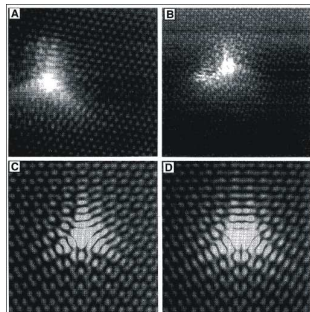


5 sept et 7 oct 2009

91

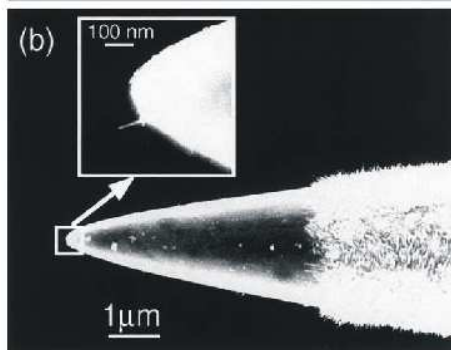
Qu'est ce qui est sur la pointe?

Pointe avec C_{60} / défauts sur le graphite



K.F. Kelly, Science: **273**, 1371 (1996)

Nanotube crû sur la pointe



Y. Shingaya, Physica B **323**, 153 (2002)

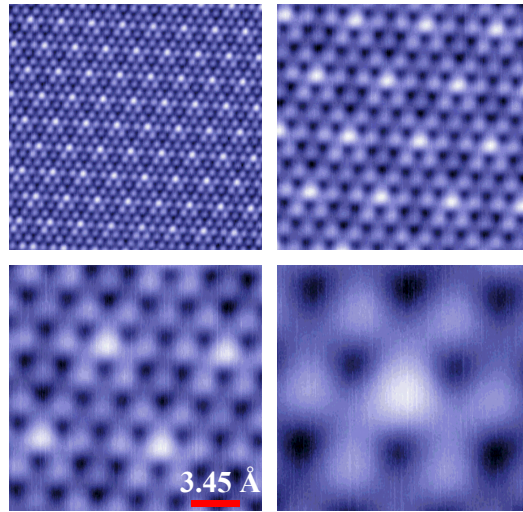
Pointes standard :

- Fils coupé de PtIr
- Tungstène formé électrochimiquement, émission de champs

5 sept et 7 oct 2009

92

...Très Haute Résolution



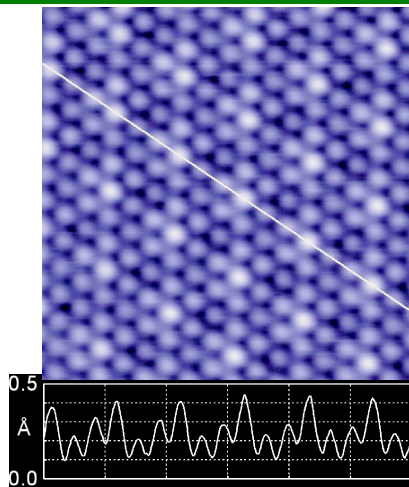
Zoom sur NbSe₂

250 mK
50 pA, 50 mV

5 sept et 7 oct 2009

93

STM Image les densité d'électrons – pas les atomes



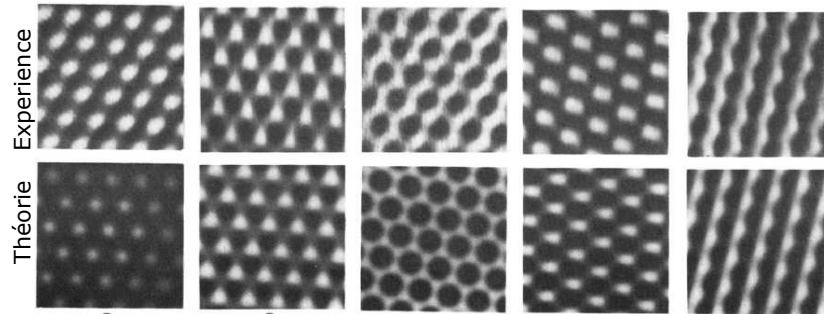
NbSe₂: Onde de densité de charge

250 mK
50 pA, 50 mV

5 sept et 7 oct 2009

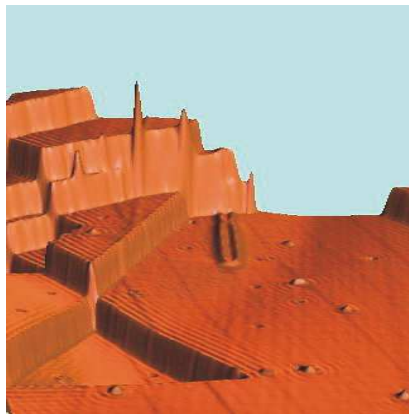
94

Graphite (pointes différentes)



H.A. Mizes *et al.*, PRB **36**, 4491 (1987)

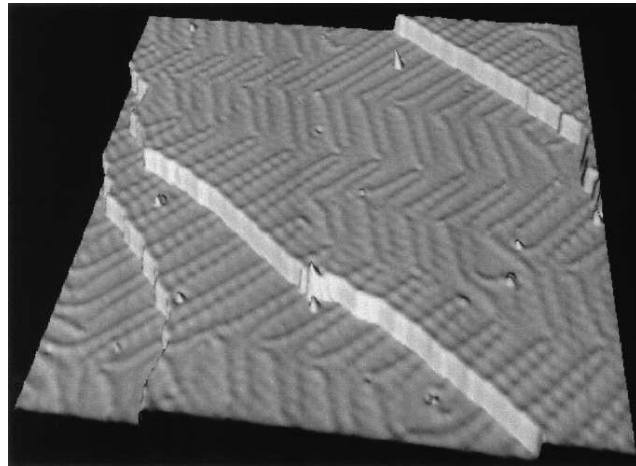
Cuivre (111)



- Terraces
- Oscillations de Friedel :
 - Bord des marches
 - Impuretés
- Interférences d'électrons

M.F. Crommie, CP Lutz DM Eigler, Nature **363**, 524-527 (1993)

Reconstruction Au(111) Herringbone



W. Chen *et al.*, PRL **80**, 1469 (1998)

5 sept et 7 oct 2009

UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE

97

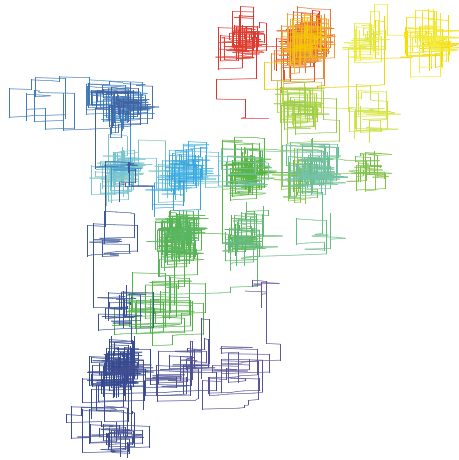
Déplacement Atomique

5 sept et 7 oct 2009

UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE

98

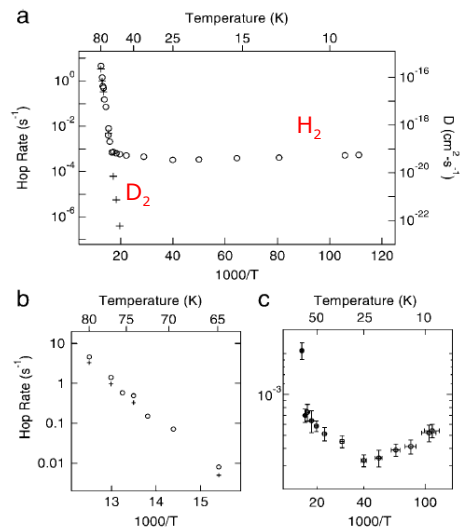
Traque d'un atome d'Hydrogène



5 sept et 7 oct 2009

99

Diffusion d'Hydrogène sur Cu(001)



5 sept et 7 oct 2009

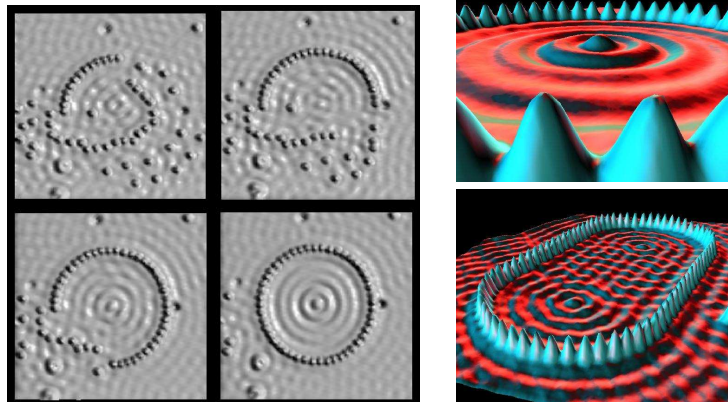
100

manipulations atomique

5 sept et 7 oct 2009

101

Manipulation d'atomes



Fe sur Cu(111)

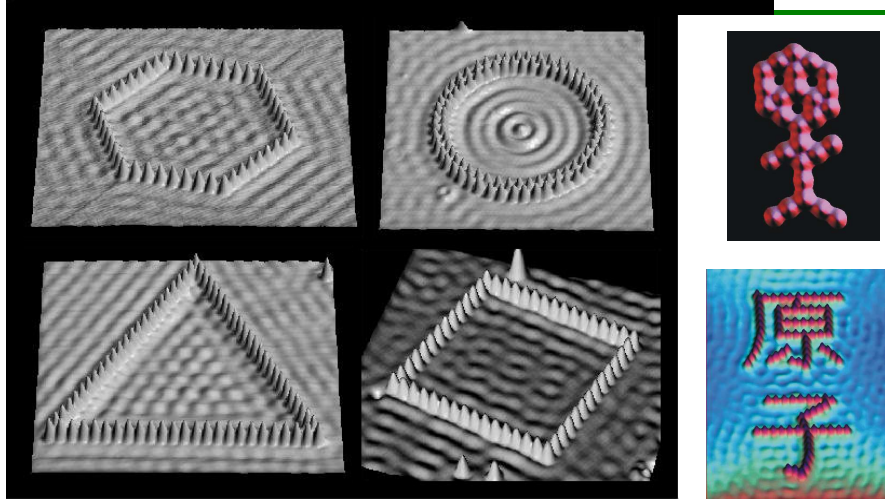
M.F. Crommie, C.P. Lutz, D.M. Eigler

Confinement of electrons to quantum corrals on a metal surface.
Science 262, 218-220 (1993).

5 sept et 7 oct 2009

102

Manipulation d'atomes



M.F. Crommie, C.P. Lutz, D.M. Eigler, E.J. Heller

Waves on a metal surface and quantum corrals.
Surface Review and Letters 2 (1), 127-137 (1995).

5 sept et 7 oct 2009

103

Autres Manipulations / pointes

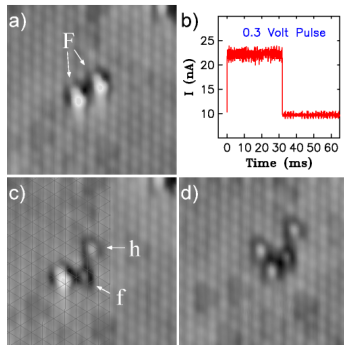
5 sept et 7 oct 2009

104

Chimie par STM

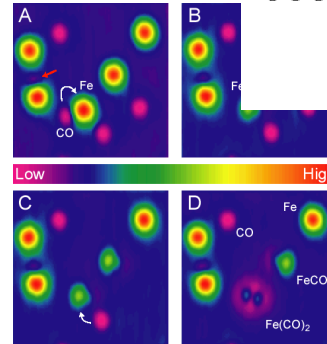
O₂ sur Pt(111)

Dissociation by Tunneling Electrons



B. C. Stipe *et al.*, PRL **78**, 4410(1997)

Sur Ag(111) Fe+CO ⇒ FeCO Fe(CO)₂



H. J. Lee and W. Ho, Science **286**, 1719 (1999)

5 sept et 7 oct 2009

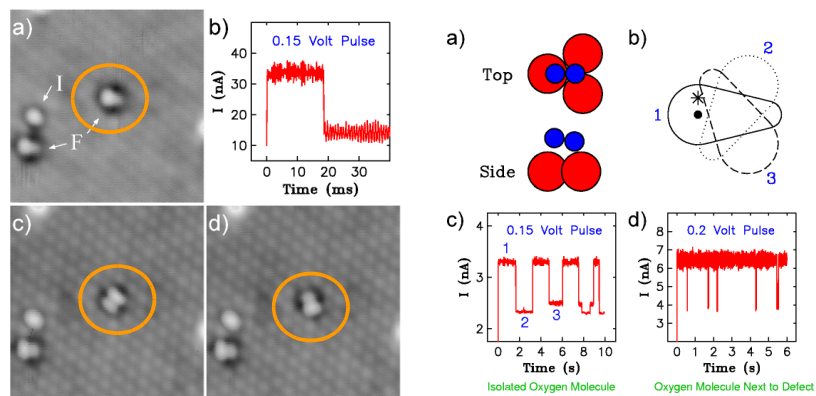
105

STM et rotation moléculaire

O₂ sur Pt(111)

Réversible Rotation by Tunneling Electrons

Single Molecule Reversible Rotation



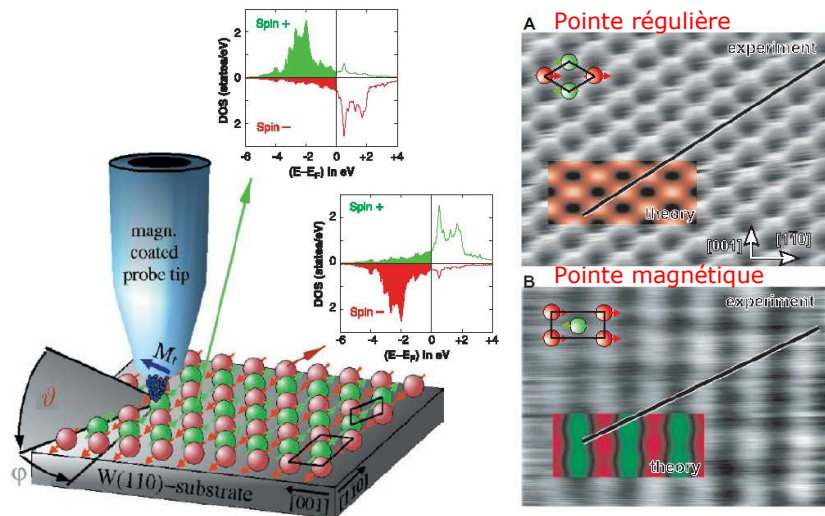
B. C. Stipe, M. A. Rezaei, W. Ho, Science **279**, 1907 (1998)

5 sept et 7 oct 2009

106

Imagerie Magnétique

STM avec spin polarisé



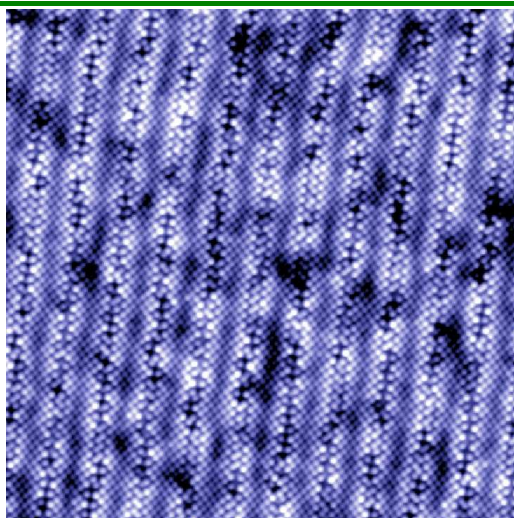
S. Heinze *et al.*, science **288**, 1805 (2000)

Spectroscopie et carte dI/dV

5 sept et 7 oct 2009

109

Spectre $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}(\text{Cu}_{1-x}\text{Ni}_x)_2\text{O}_{8+\delta}$



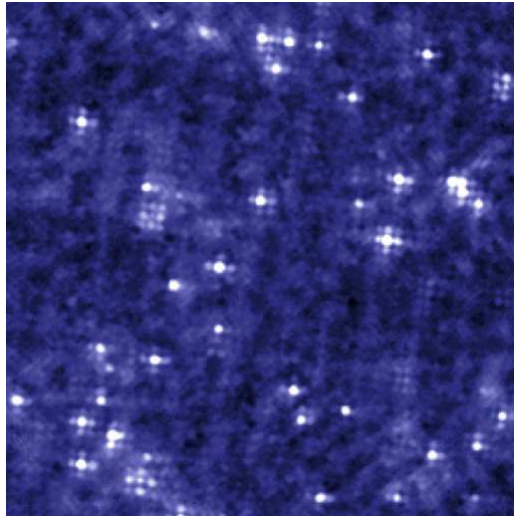
Sample: H. Eisaki, S. Uchida

256 Å, 4.2 K
100 pA, -100 mV

5 sept et 7 oct 2009

110

Spectre $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}(\text{Cu}_{1-x}\text{Ni}_x)_2\text{O}_{8+\delta}$
Carte conductance à +10 meV

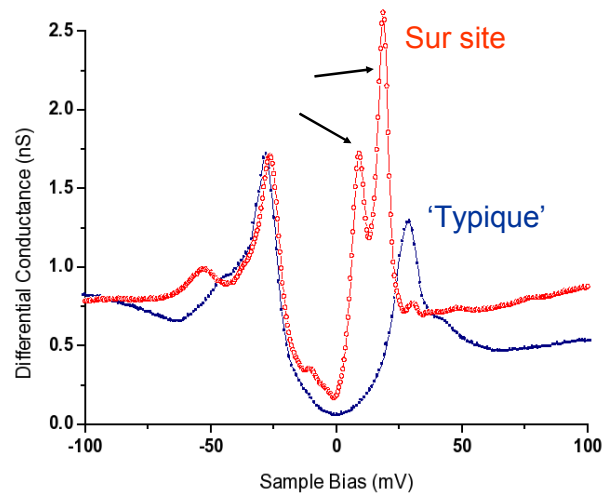


E.W. Hudson. *et al.*, *Nature* 411, 920 (2001).

256 Å, 4.2 K
100 pA, -100 mV

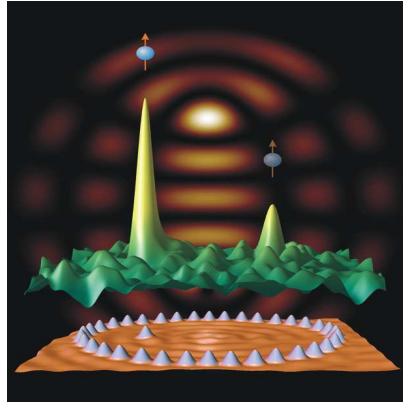
5 sept et 7 oct 2009

Spectre $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}(\text{Cu}_{1-x}\text{Ni}_x)_2\text{O}_{8+\delta}$



5 sept et 7 oct 2009

Mirage quantique : combinaison topographe et carte dI/dV



H. C. Manoharan, C. P. Lutz & D. M. Eigler, Nature 403, 512 (2000).

5 sept et 7 oct 2009

113

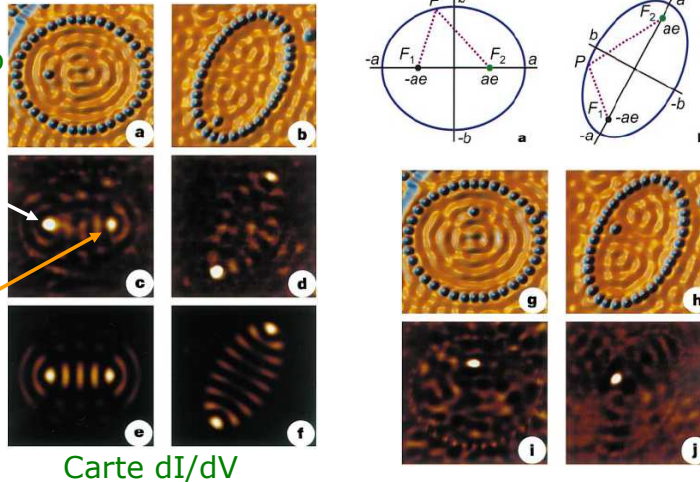
Mirage Quantique

Cu(111)/Co

Topo

Co : état
Kondo

Mirage



Carte dI/dV

H. C. Manoharan, C. P. Lutz & D. M. Eigler, Nature 403, 512 (2000).

5 sept et 7 oct 2009

114