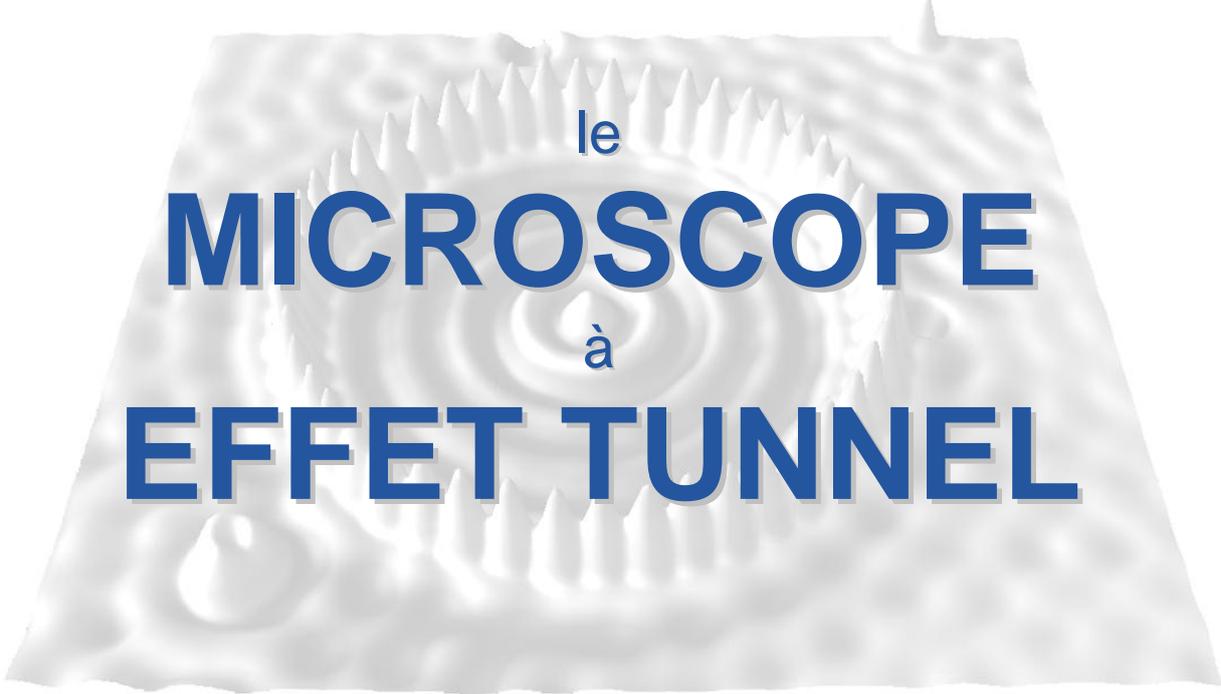


HOURIEZ Xavier  
HANAT François

Culture Générale  
2003/2004



le  
**MICROSCOPE**  
à  
**EFFET TUNNEL**



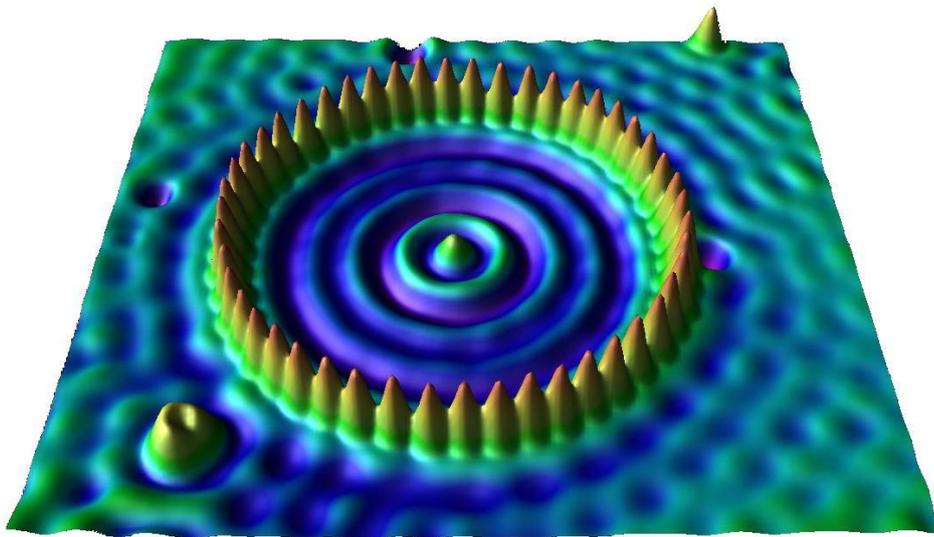
avec  
Michaël Karkut  
L.P.M.C

# Introduction

L'exploration du nanomonde a été permise par la découverte en 1981 du microscope à effet tunnel, ou STM (Scanning Tunneling Microscope en anglais). Nous avons choisi de l'étudier pour diverses raisons : son rôle fondamental dans l'exploration nanométrique, son fonctionnement si différent des microscopes optiques, et l'implication d'un phénomène quantique intéressant ! Voici donc le résultat de ce qui restera pour nous une expérience enrichissante, puisqu'il nous aura été permis d'entrer en contact avec le monde de la recherche, et même d'utiliser un STM !

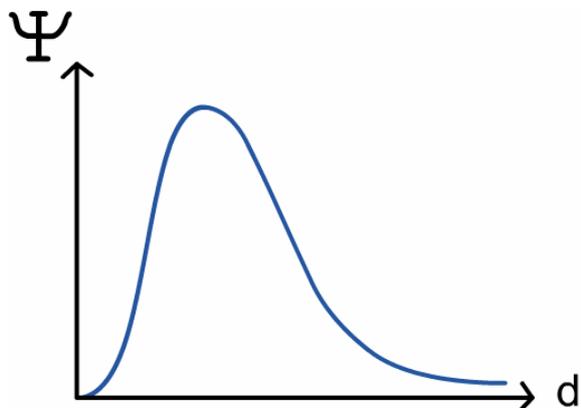
*pages...*

Ø L'Effet Tunnel -----	-1-
Ø Les Inventeurs -----	-2-
Ø Le Fonctionnement du STM -----	-3-
Ø L'Observation à l'Echelle Atomique -----	-4-
Ø La Manipulation Atomique -----	-6-
Ø Sources et Remerciements -----	-8-



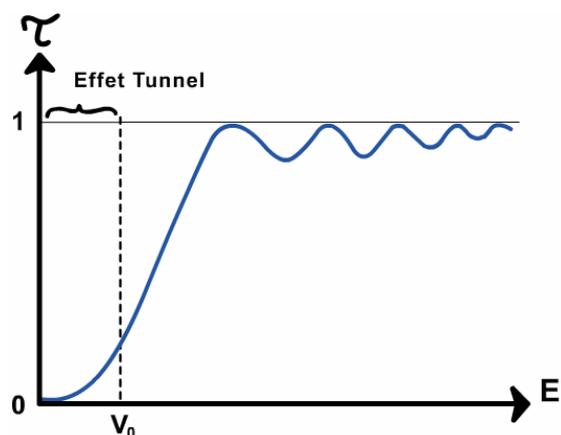
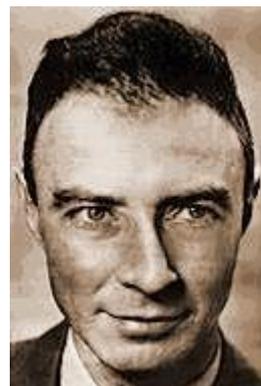
## L'EFFET TUNNEL

Dans le monde étrange de la physique quantique, les électrons ne sont plus les petites billes que l'on présente dans les ouvrages de vulgarisation. A l'échelle



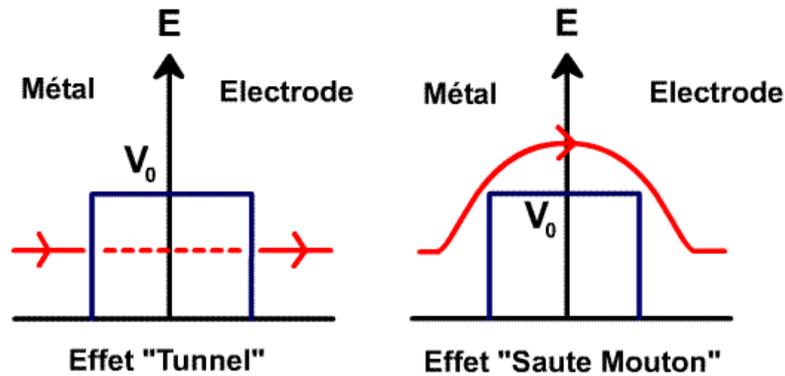
atomique, le bon sens est mis à rude épreuve! Les électrons, comme les autres particules, acquièrent des propriétés ondulatoires... D'ailleurs, Erwin Schrödinger a donné l'équation dite « équation d'onde » qui décrit ce comportement. Son module au carré donne la probabilité de présence de l'électron en un point de l'espace. Cette probabilité de trouver un électron en un point précis décroît exponentiellement en s'éloignant du noyau...

Si l'on approche une fine électrode d'une surface métallique, donc du nuage électronique, le vide séparant les deux matériaux joue un rôle d'isolant, qui constitue ce que l'on appelle une barrière de potentiel. En mécanique classique, seuls les électrons dont l'énergie dépasse une valeur  $V_0$  peuvent traverser l'isolant. Mais en 1926, Robert Oppenheimer (*photo ci contre*) a découvert que la probabilité qu'un électron dont l'énergie est inférieure à  $V_0$  y parvienne n'est pas nulle! C'est comme s'ils empruntaient une sorte de tunnel pour atteindre l'électrode, d'où le nom d'effet tunnel. Les calculs symbolisent la faculté d'un électron à pouvoir atteindre l'électrode par un coefficient dit de transmission  $T$ , compris entre 0 et 1. Voici sa valeur en fonction de l'énergie de l'électron :



On voit bien qu'en dessous d'un potentiel  $V_0$ , un électron a une petite chance de traverser l'isolant. En considérant le principe d'incertitude d'Heisenberg,  $\Delta x \Delta p \geq h$  ou encore  $\Delta E \Delta t \geq h$  indique qu'en un temps donné, l'état d'énergie de l'électron peut considérablement varier. Ainsi, un électron supposé d'énergie  $E < V_0$  peut en réalité avoir une énergie  $E + \Delta E$  qui peut être supérieure à  $V_0$ ! Cela nous amène à réfléchir sur le nom d'effet tunnel. Car si un tunnel permet de franchir une montagne à altitude constante, l'effet tunnel permet aux

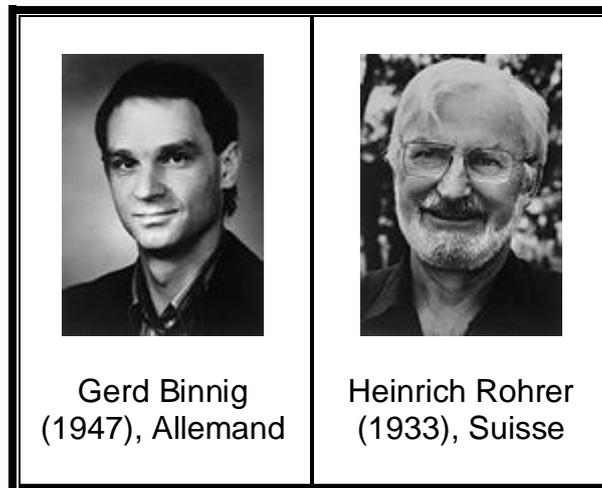
électrons de franchir une barrière de potentiel en passant par un état d'énergie supérieur, ce qui s'apparente plus à du saute-mouton!



Ce qu'il faut retenir de l'effet tunnel, c'est que cette transmission d'électrons voit son ampleur diminuer exponentiellement si la distance métal-électrode augmente.

## LES INVENTEURS

C'est en 1981 que deux chercheurs du prestigieux laboratoire d'IBM à Zurich ont mis au point le microscope à effet tunnel, en parvenant à surmonter toutes les difficultés d'ordre technique. Ils reçurent en récompense de leurs travaux le prix Nobel en 1986, le partageant avec Ernst Ruska qui, lui, avait travaillé sur la microscopie électronique.



Le professeur Sven Johanson de l'Académie Royale des Sciences présente ainsi les travaux réalisés par les deux chercheurs : « Vous avez posé dans vos travaux novateurs les bases du développement décisif de la microscopie moderne. Il est désormais possible de distinguer les plus fins détails de la structure de la matière. Cela est de la plus grande importance, pas seulement en physique, mais dans bien d'autres domaines de la science... ».

## LE FONCTIONNEMENT DU STM

Le but de la microscopie à effet tunnel, contrairement aux plus classiques microscopes optiques, n'est pas tellement de voir mais plutôt de sentir, palper une surface, d'une conductivité raisonnable par une pointe métallique. Cette technique est basée sur le phénomène physique expliqué plus haut, l'effet tunnel.

Pour cela, la distance pointe-échantillon n'est que de quelques angströms. Si une tension de polarisation est appliquée entre la pointe et la surface (-1,5V,+1,5V), les électrons peuvent passer d'une électrode à l'autre, un courant dit « courant tunnel » va donc naître.

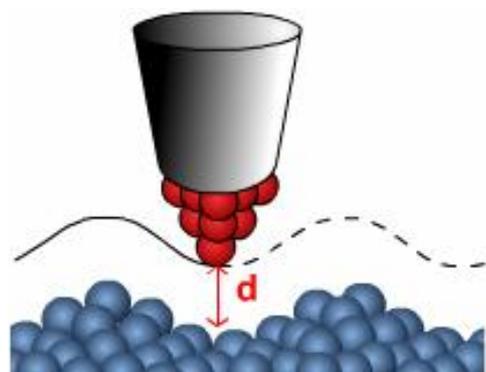
La pointe est constituée d'un matériau dur, conducteur, tel que le tungstène, ou le platine iridié. Elle joue le rôle d'une sonde locale du courant tunnel. Pour obtenir une résolution maximale, donc atomique, il faut que la pointe soit terminée par un seul atome. La pointe est parfois préparée par attaque électrochimique, ou plus artisanalement en coupant un fil de platine, en le tirant, de manière à avoir le plus petit rayon de courbure, donc la plus grande résolution. Une des difficultés provient du fait que la plupart des pointes se recouvrent d'une couche oxydée de quelques dizaines d'angströms d'épaisseur, empêchant le passage du courant tunnel. C'est pour cela que l'on utilise un métal noble non oxydable et que le fonctionnement du STM est parfois réalisé sous vide ou sous atmosphère inerte.



le Tripod

Pour déplacer cette pointe, l'utilisation de céramiques piézoélectriques est indispensable, du fait de la très faible variation de distance à accomplir. Les propriétés piézoélectriques sont une déformation mécanique (contraction ou dilatation) due à des variations du champ électrique environnant (et réciproquement !). La pointe est fixée à ce que l'on appelle un tripod, qui est constitué de trois piézoélectriques qui permettent son déplacement dans les trois directions de l'espace. La précision de ce positionnement est énorme, jusqu'au centième de nanomètre, pour une sensibilité de 20Å/V !

Le STM peut fonctionner de deux manières différentes : à hauteur constante ou à distance constante. Le premier mode ne peut être utilisé que pour les surfaces parfaitement planes, puisque une aspérité pourrait arracher la pointe à son passage.

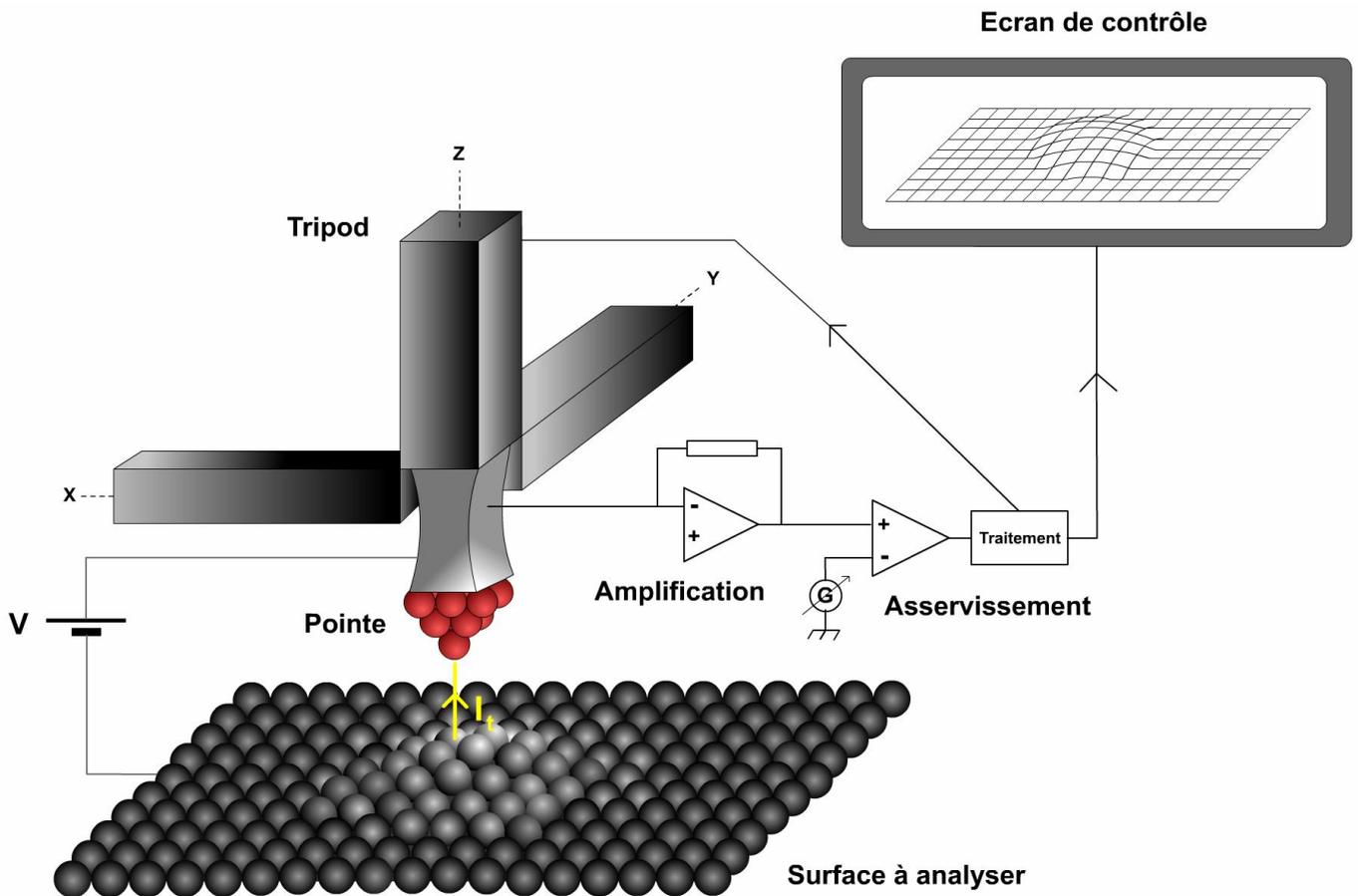


Mode à distance constante

Le deuxième mode est beaucoup plus utilisé. A l'aide d'un asservissement, on maintient le courant tunnel constant. Or celui-ci dépend exponentiellement de la distance pointe-échantillon, cette distance est maintenue constante ! En analysant par ordinateur la hauteur de la pointe, on obtient la topographie de la surface étudiée.

La précision nécessaire est immense, puisque l'importance de l'effet tunnel décroît très rapidement. Pour une variation de distance entre la pointe et la surface qui n'est que d'un angström, le courant tunnel varie d'un facteur 10 ! D'ailleurs, l'ensemble du microscope est isolé des vibrations mécaniques par une série de plaques métalliques, séparées les unes des autres.

Voici le schéma d'un microscope à effet tunnel.

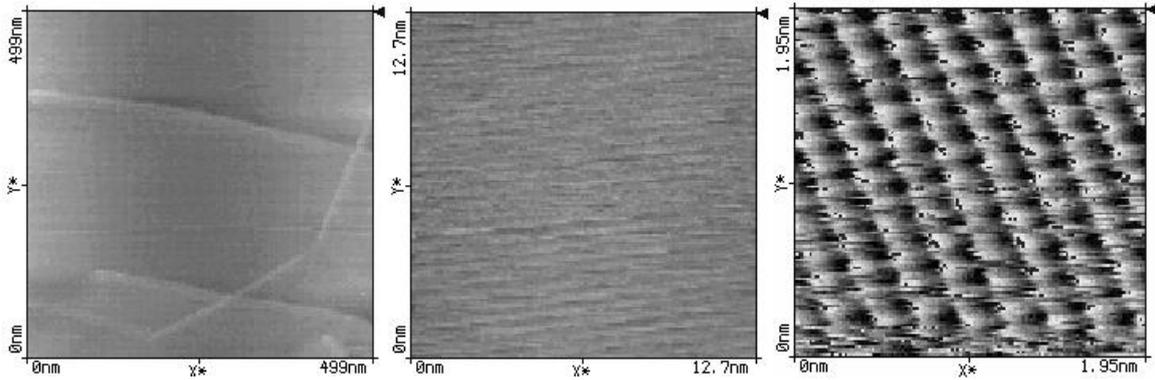


Précisons que...

- ∅ Le courant tunnel étant de l'ordre du nanoampère, un circuit d'amplification précède celui de la rétroaction.
- ∅ La surface à analyser doit être conductrice ou semi-conductrice. Dans le cas contraire, on fera appel au microscope à force atomique, utilisant les forces de Van Der Waals, un système de levier pour l'approche de la surface et un laser pour l'analyse de la hauteur de la pointe.
- ∅ La tension de polarisation  $V$  permet d'influer directement sur le courant tunnel, puisque  $I_t = Ve^{-Kd}$ , avec  $I_t$  le courant tunnel,  $K$  une constante positive, et  $d$  la distance pointe-surface.

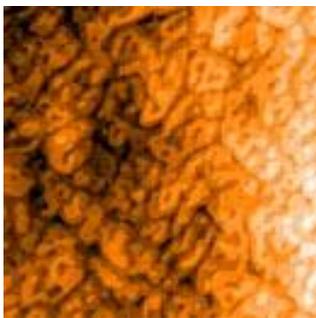
## L'OBSERVATION A L'ECHELLE ATOMIQUE

Cette microscopie est relativement bon marché, moins chère que celle à force atomique, et beaucoup moins onéreuse que la microscopie électronique ! Il nous a été permis d'utiliser un STM, et ainsi d'observer la matière à des échelles peu communes !



Voici une surface de carbone graphite que nous avons pu observer jusqu'à l'échelle des atomes de carbone constituant l'échantillon !

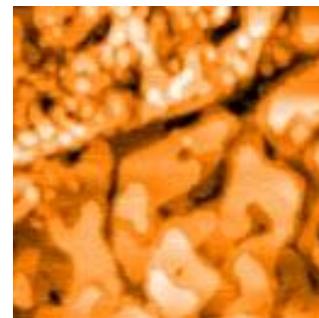
Voici la surface d'une couche d'or :



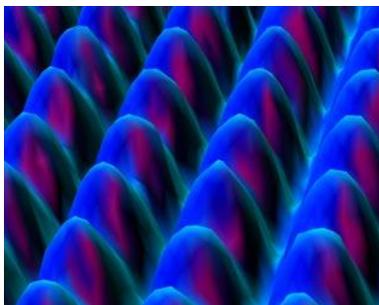
300nm x 300nm



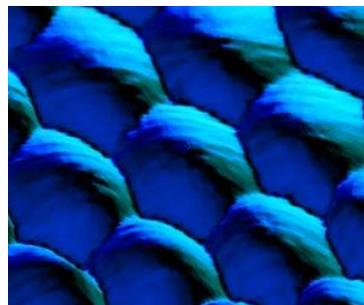
200nm x 200nm



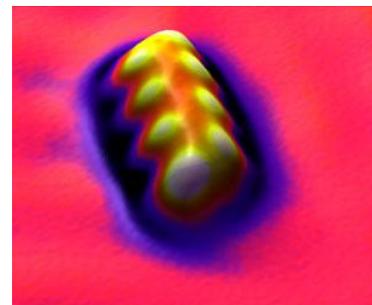
100nm x 100nm



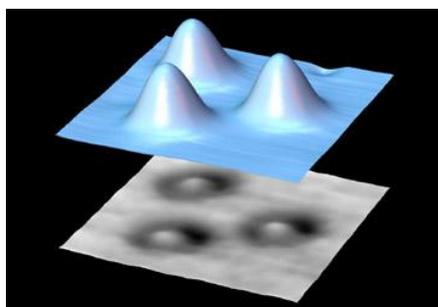
Surface de Nickel.



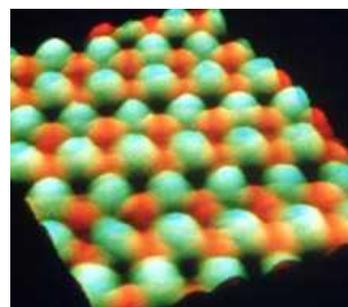
Surface de Platine.



Molécule ayant 8 atomes de Césium et 8 atomes d'Iode.



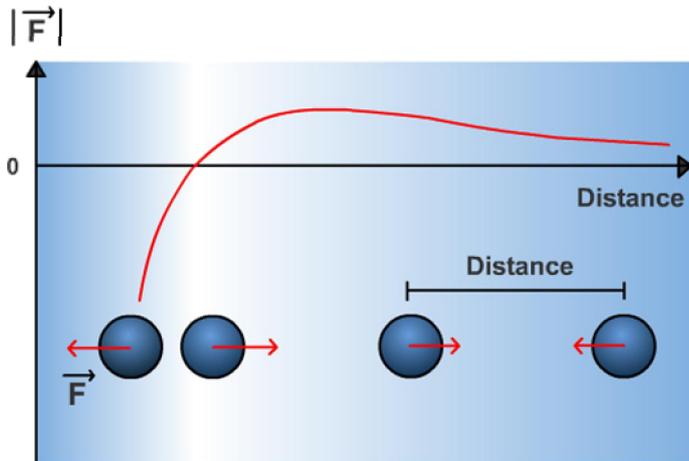
Atomes de Gadolinium sur une surface de Niobium.



Atomes de Germanium

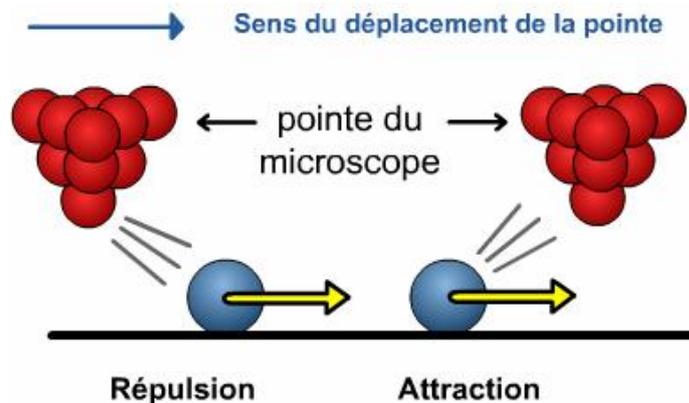
## LA MANIPULATION ATOMIQUE

Sur les premières images fournies par le microscope, on voyait des lignes aberrantes traverser l'image. Il s'est avéré qu'elles provenaient d'une altération de la surface par la pointe, qui entraînait certains atomes. L'idée d'utiliser ce défaut primitif a donné une nouvelle dimension au microscope. C'est en 1990 que le monde entier pouvait voir les premiers résultats du déplacement maîtrisé de la matière à l'échelle atomique ! Donald Eigler et Ehrard Schweizer ont ouvert les portes de la nano-construction...

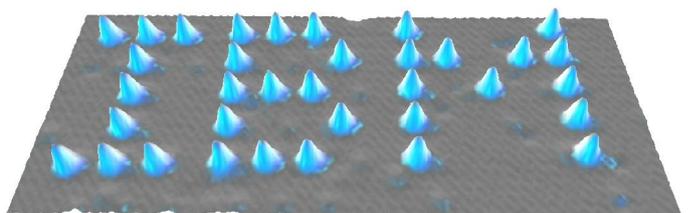


Le déplacement d'atomes ou de molécules avec la pointe du microscope n'a rien d'un contact mécanique. Les interactions qui entrent en jeu ont la particularité d'être répulsives à courte distance et attractives à longue distance. Les forces attractives, les forces de Van Der Waals, sont dues à la dissymétrie transitoire des électrons autour du noyau pour les atomes, et l'apparition de dipôle du à des différences de

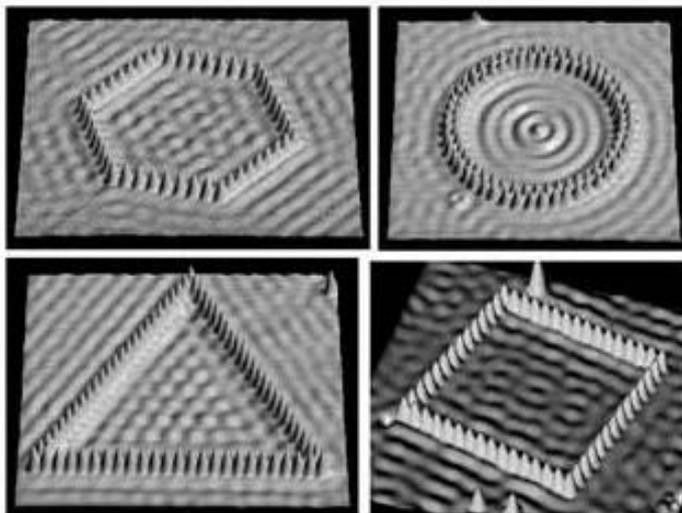
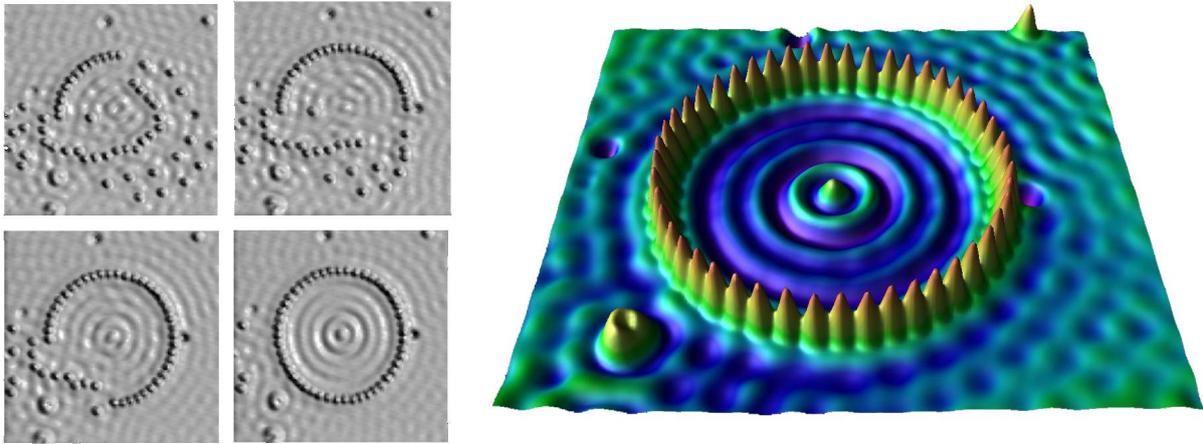
densité électronique pour les molécules. Les forces répulsives proviennent de la répulsion coulombienne des électrons des couches externes, et du principe d'exclusion de Pauli, qui interdit à deux électrons d'être dans le même état quantique. Ainsi, on peut déplacer atomes et molécules, en s'approchant ou en s'éloignant de l'élément à déplacer !



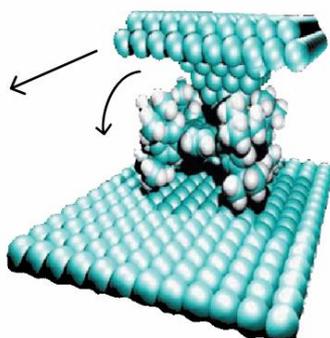
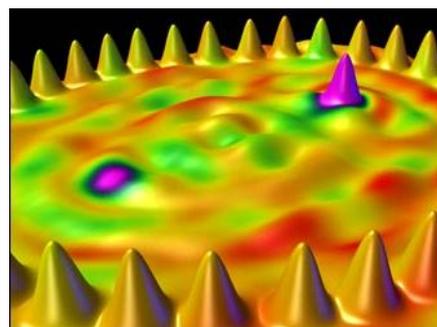
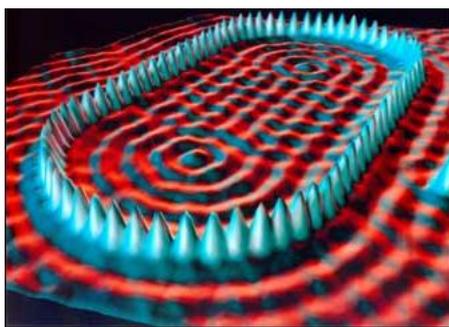
Première historique ! 35 atomes de Xénon sur une surface de Nickel pour dessiner le sigle du célèbre laboratoire auquel en 1990 les auteurs de cette prouesse appartenaient :



La construction nanométrique a permis d'avoir une preuve du caractère ondulatoire de l'électron. Ces 48 atomes de Fer ont été déplacés au STM pour former ce que l'on appelle un « corral quantique »...



D'autres constructions quantiques avec des atomes de Fer sur une surface de Cuivre...



Voici l'image du déplacement d'une molécule (« Cu-TBPP ») ! Sa forme particulière permet de la faire rouler sur la surface

## **Sources**

- Ø Microsoft Encarta
- Ø Pour la Science n°290
- Ø [www.nobel.se](http://www.nobel.se)

## **Remerciements**

- Ø Emmanuel Treboux
- Ø Michaël Karkut
- Ø Stéphane Charvet