

Voir et mouvoir les atomes à la surface des matériaux : le microscope à effet tunnel

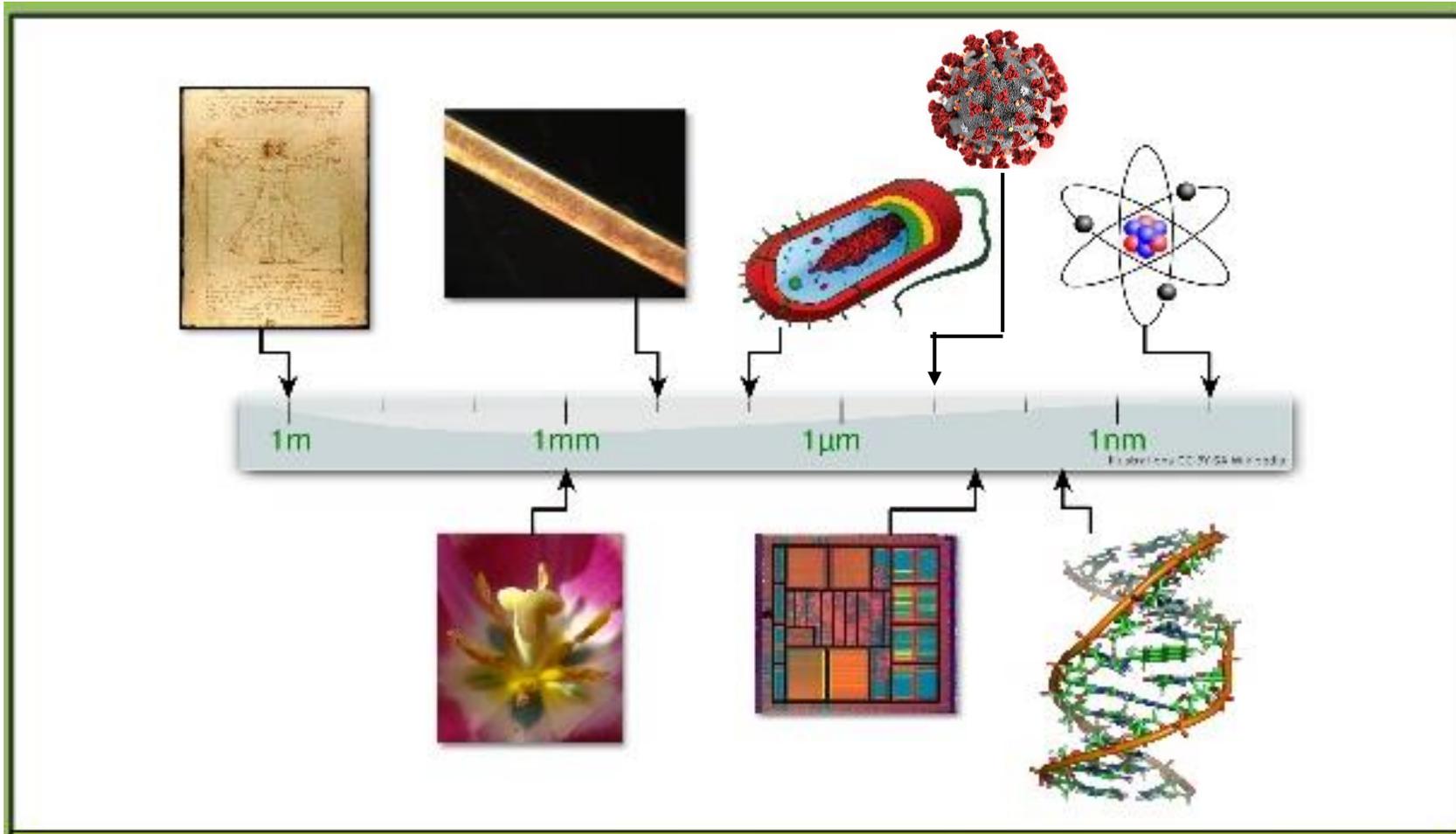
Dominique DUBAUX, Ecole doctorale **C2MP**



Séance mensuelle de l'Académie Lorraine des Sciences

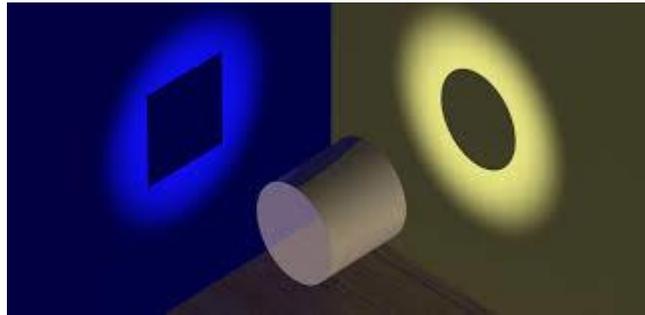
20 mai 2021

Une question d'échelle...



La physique quantique décrit le monde à l'échelle atomique

Dualité onde-corpuscule : Louis de BROGLIE (1923)



Un peu d'histoire

Observer le monde à une échelle de plus en plus petite



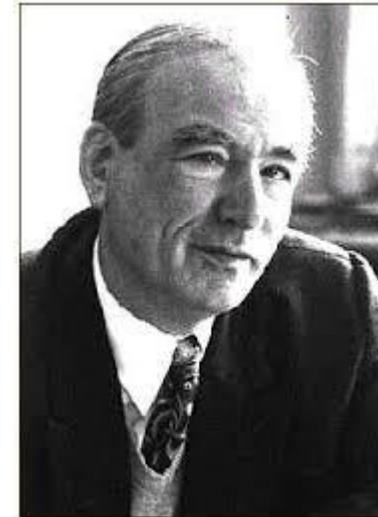
La loupe :
13^e siècle



18^e siècle : le
microscope
optique



E.RUSKA
1931



Le microscope
électronique



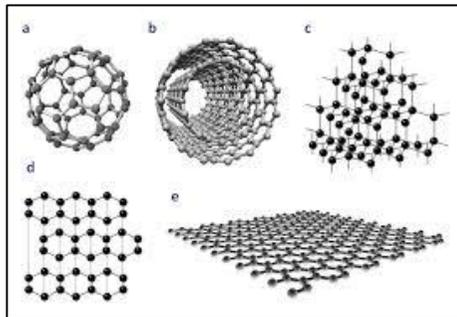
Revêtements fonctionnels

*„Gott schuf das Volumen,
der Teufel die Oberfläche“.
Wolfgang PAULI*



Corrosion

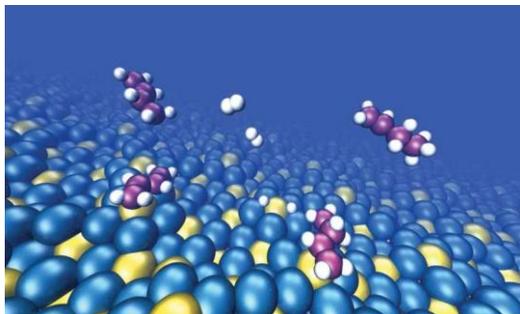
Science des surfaces



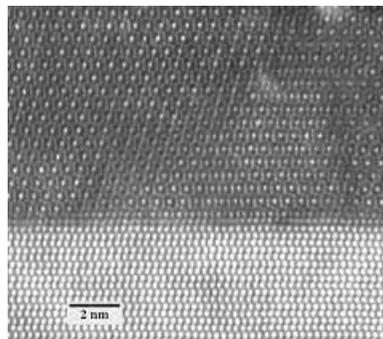
Nanomatériaux



Tribologie



Catalyse hétérogène



Croissance épitaxiale



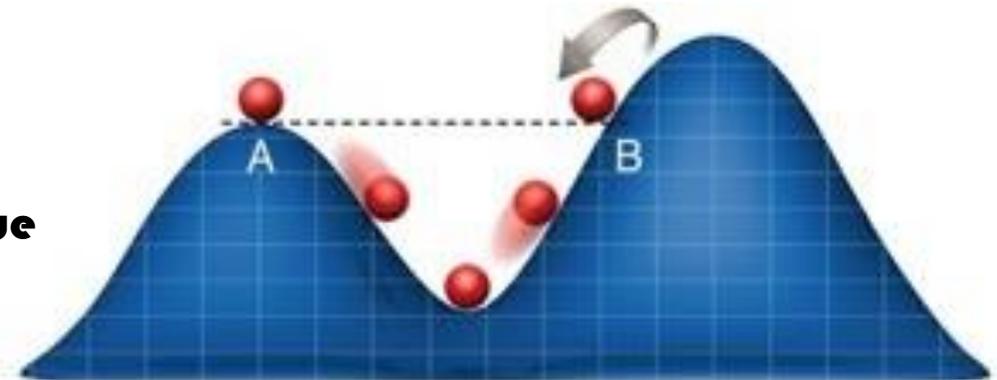
Mouillage

L'effet tunnel : un comportement quantique des électrons

G. GAMOV (1928)

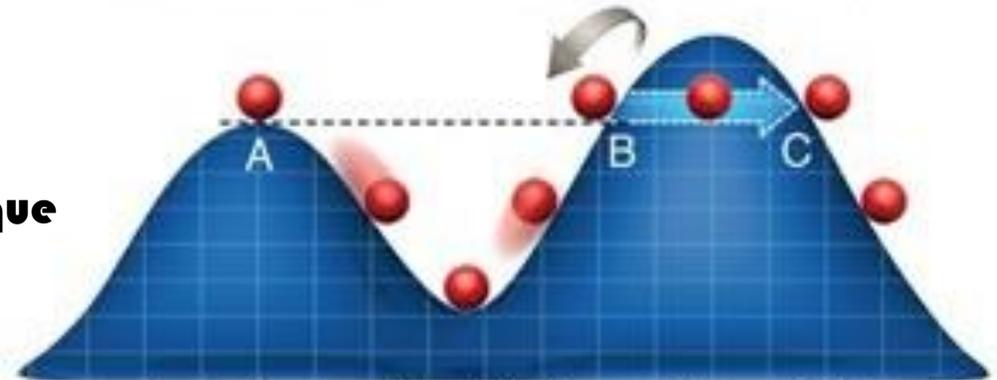


Classique



En physique classique, le ballon lâché depuis le point A ne peut monter plus haut que le point B (loi de la dynamique).

Quantique



En physique quantique, l'électron, arrivé au point B, peut, par effet tunnel, atteindre le point C situé de l'autre côté de la colline.

EQUATION DE SCHRÖDINGER

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

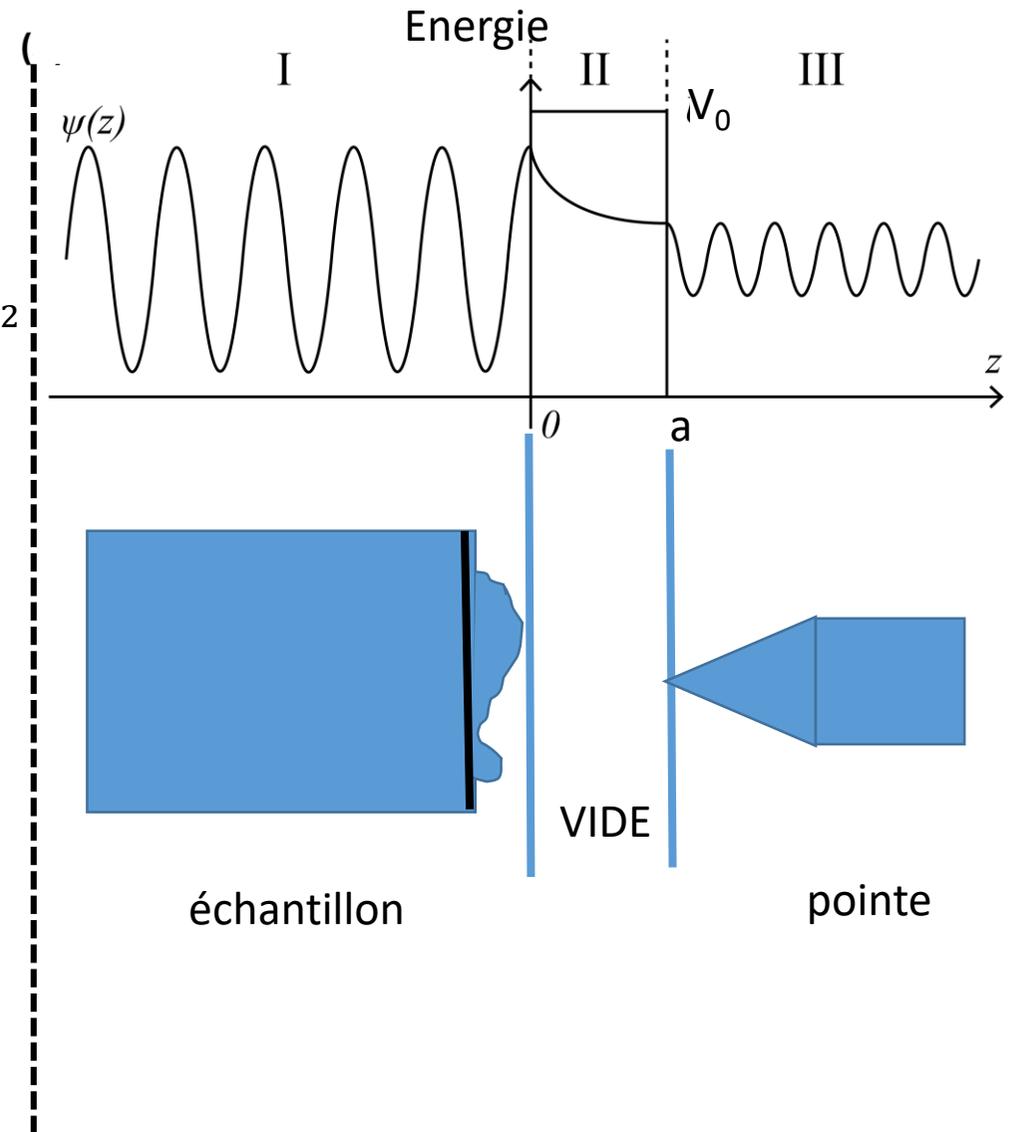
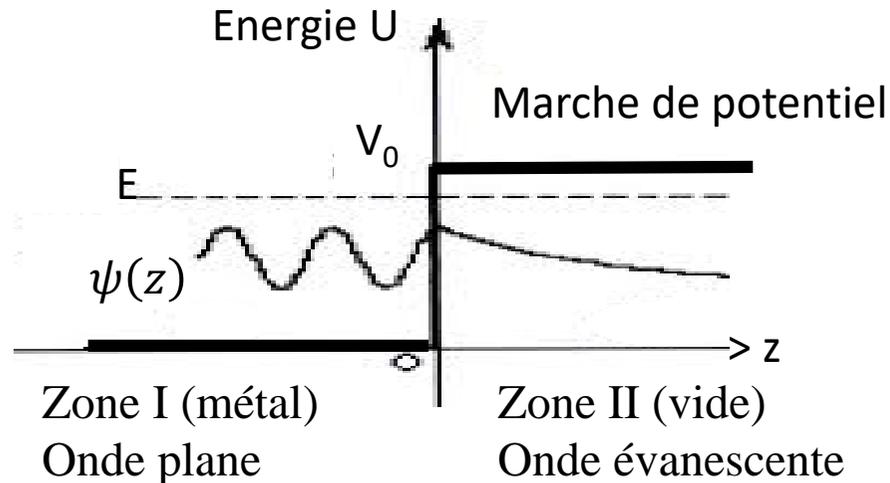
Avec $U(z) = 0$ si $z < 0$ et $U(z) = V_0$ si $z > 0$

- $\frac{d^2\psi}{dz^2} + \frac{2m}{\hbar^2}E\psi = 0$ si $z < 0 \Rightarrow \psi(z) \propto e^{ikz}$ où $E = \frac{\hbar^2}{2m}k^2$

Il s'agit d'une **onde plane**

- $\frac{d^2\psi}{dz^2} + \frac{2m}{\hbar^2}(E - V_0)\psi = 0$ si $z > 0 \Rightarrow \psi(z) \propto e^{-\kappa z}$ avec $\kappa = \frac{\sqrt{2m(V_0 - E)}}{\hbar}$

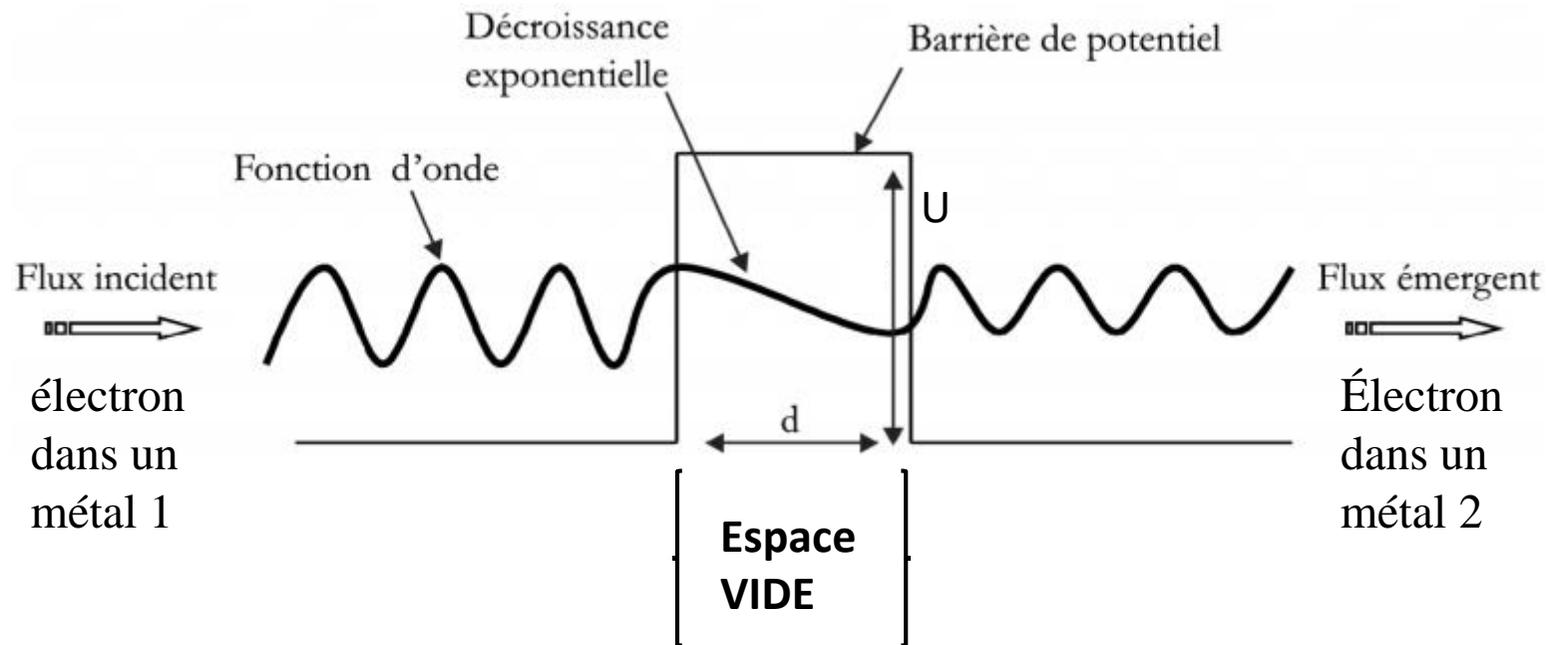
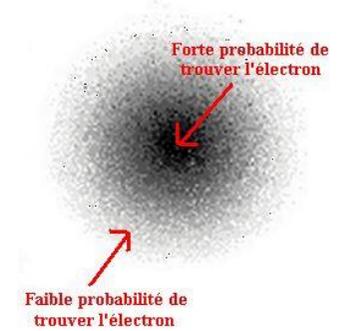
Il s'agit d'une **onde évanescente**



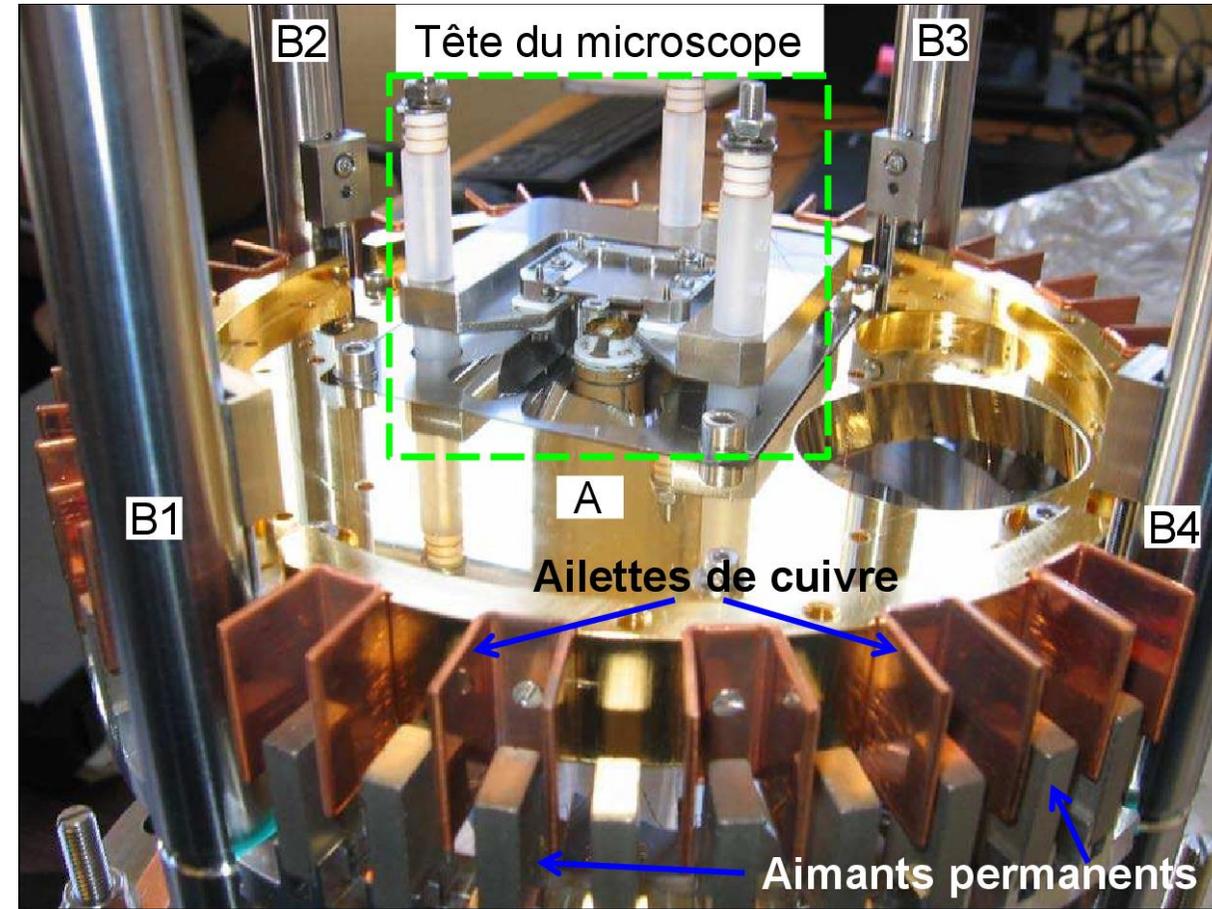
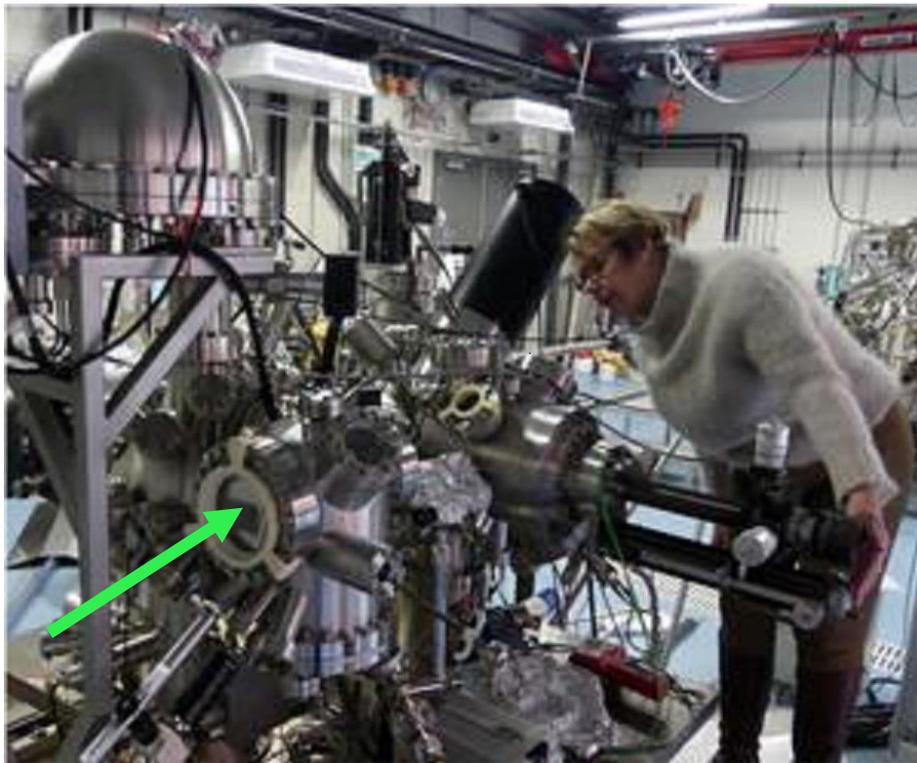
Intensité du courant tunnel dans la zone II : $I(z) \propto |\psi(z)|^2$ soit $I(z) \propto e^{-2\kappa z}$

Grâce à son caractère ondulatoire, un électron a un comportement dual

Il peut traverser une « barrière » étroite et vide séparant deux métaux



Un outil pour OBSERVER des surfaces à l'échelle du nanomètre : un regard nouveau sur la matière



Vue d'ensemble de la plateforme ASURE

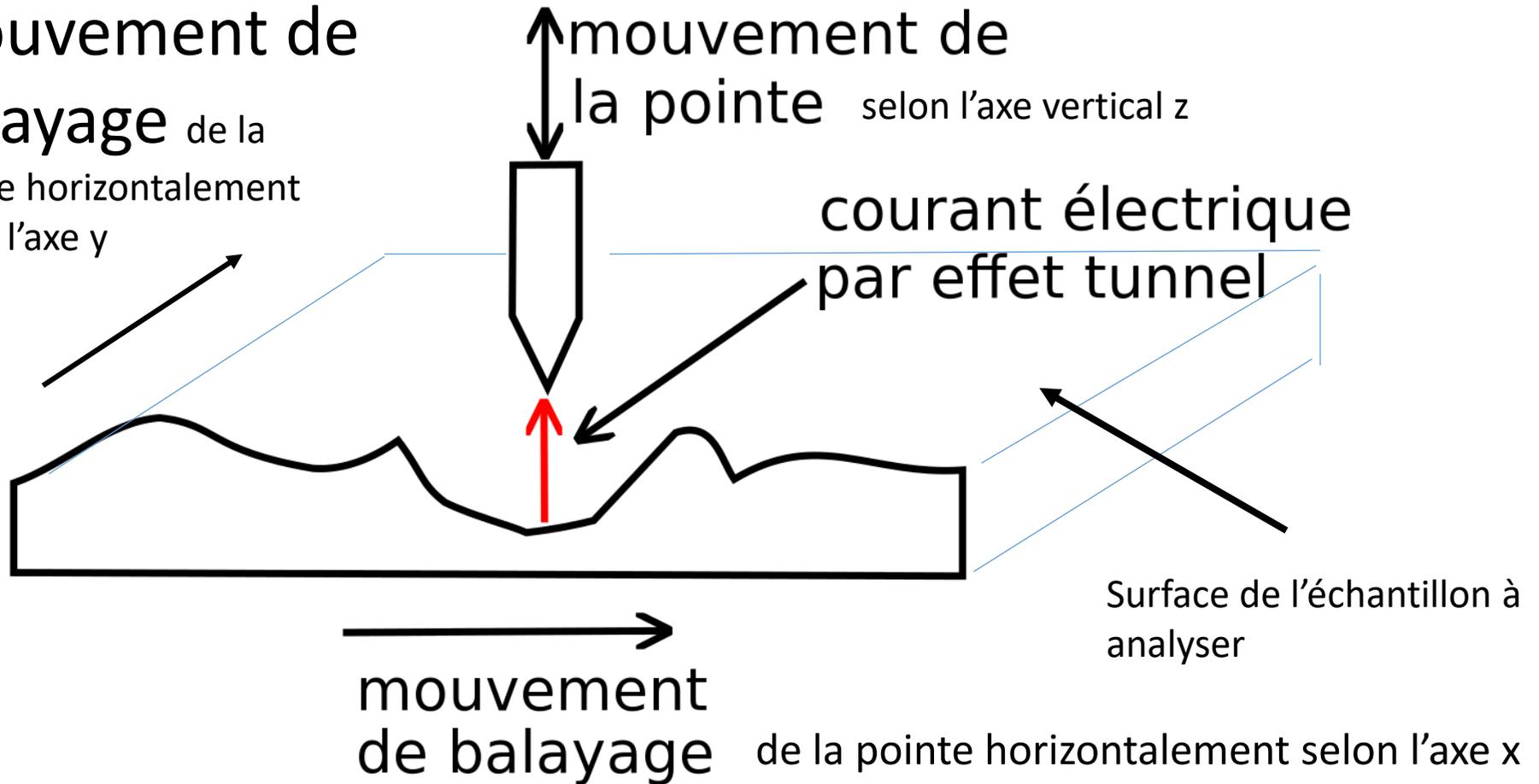
Une technique de pointe

Métal-vide-métal...

mouvement de balayage de la pointe horizontalement selon l'axe y

mouvement de la pointe selon l'axe vertical z

courant électrique par effet tunnel

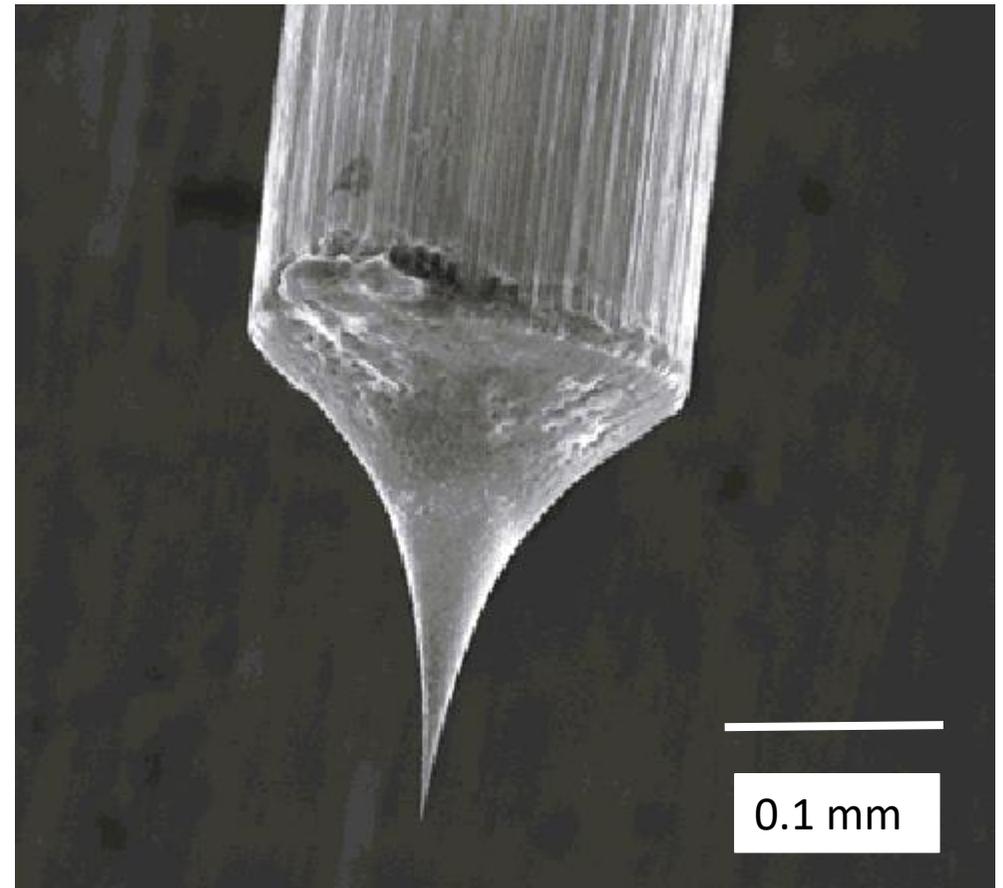
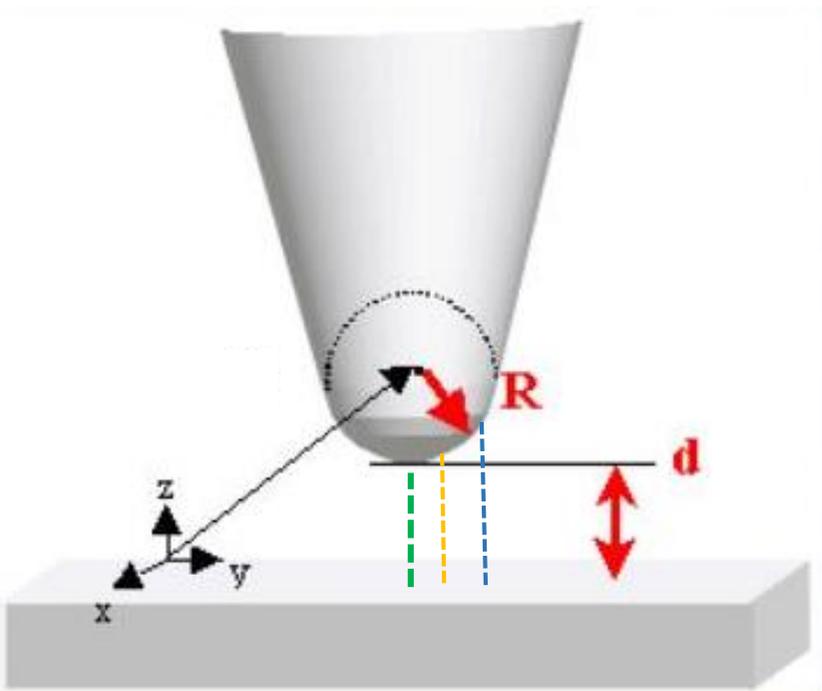


mouvement de balayage de la pointe horizontalement selon l'axe x

Les éléments essentiels du microscope à effet tunnel

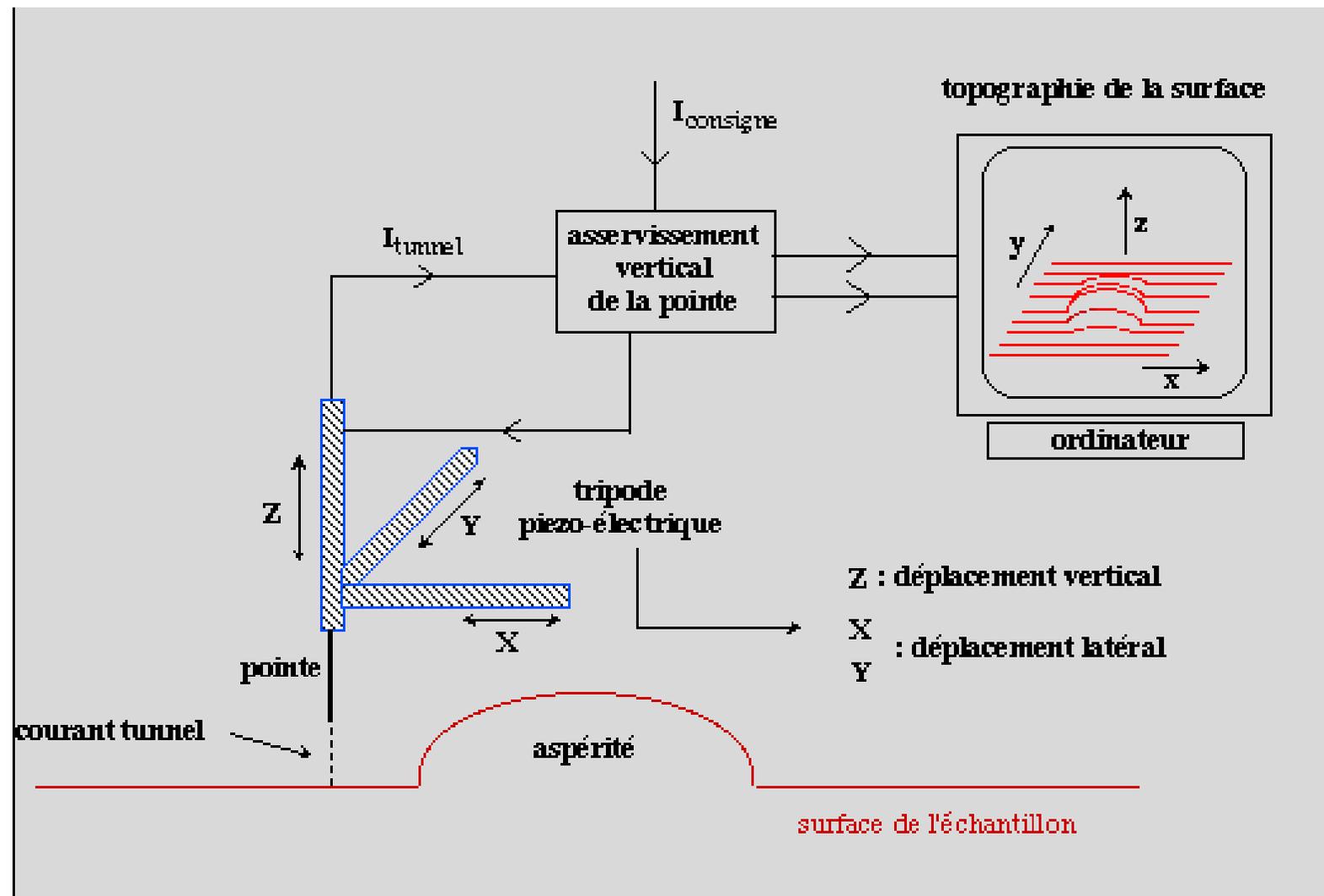
- Un dispositif d'approche à quelques dixièmes de nm de la pointe métallique vers la surface conductrice de l'échantillon à étudier
- Un translateur piézo-électrique permettant les déplacements de la pointe dans les trois directions de l'espace
- Une pointe extrêmement fine permettant de lire la topographie de la surface à étudier
- Un système de pilotage, de traitement et de visualisation des données recueillies
- Un dispositif anti-vibratoire pour isoler le microscope des vibrations extérieures

UNE POINTE pour sortir du tunnel



Du fait de la décroissance exponentielle de l'intensité du courant tunnel au niveau de la barrière, ce courant est divisé par 10 quand la distance pointe-surface d augmente de 1 \AA . La contribution au courant est dominée par l'effet tunnel à la verticale de l'apex de la pointe.

Schéma de principe



Deux possibilités pour la position de la pointe qui survole l'échantillon

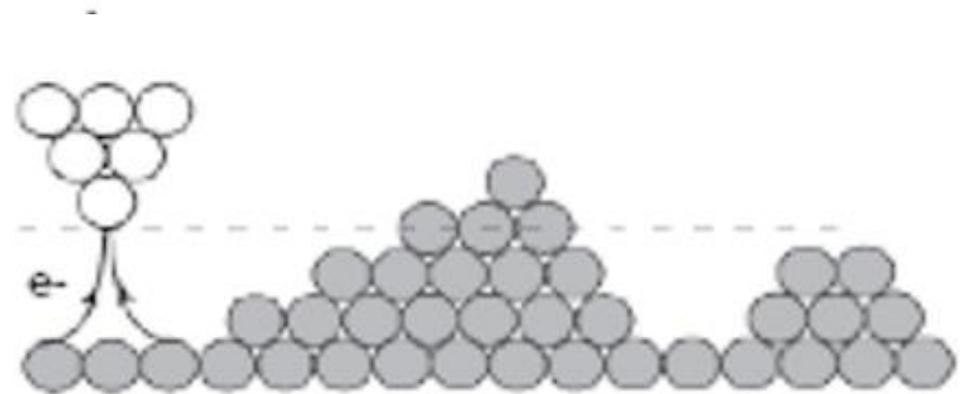
Extrémité inférieure de la pointe



échantillon

A: courant constant

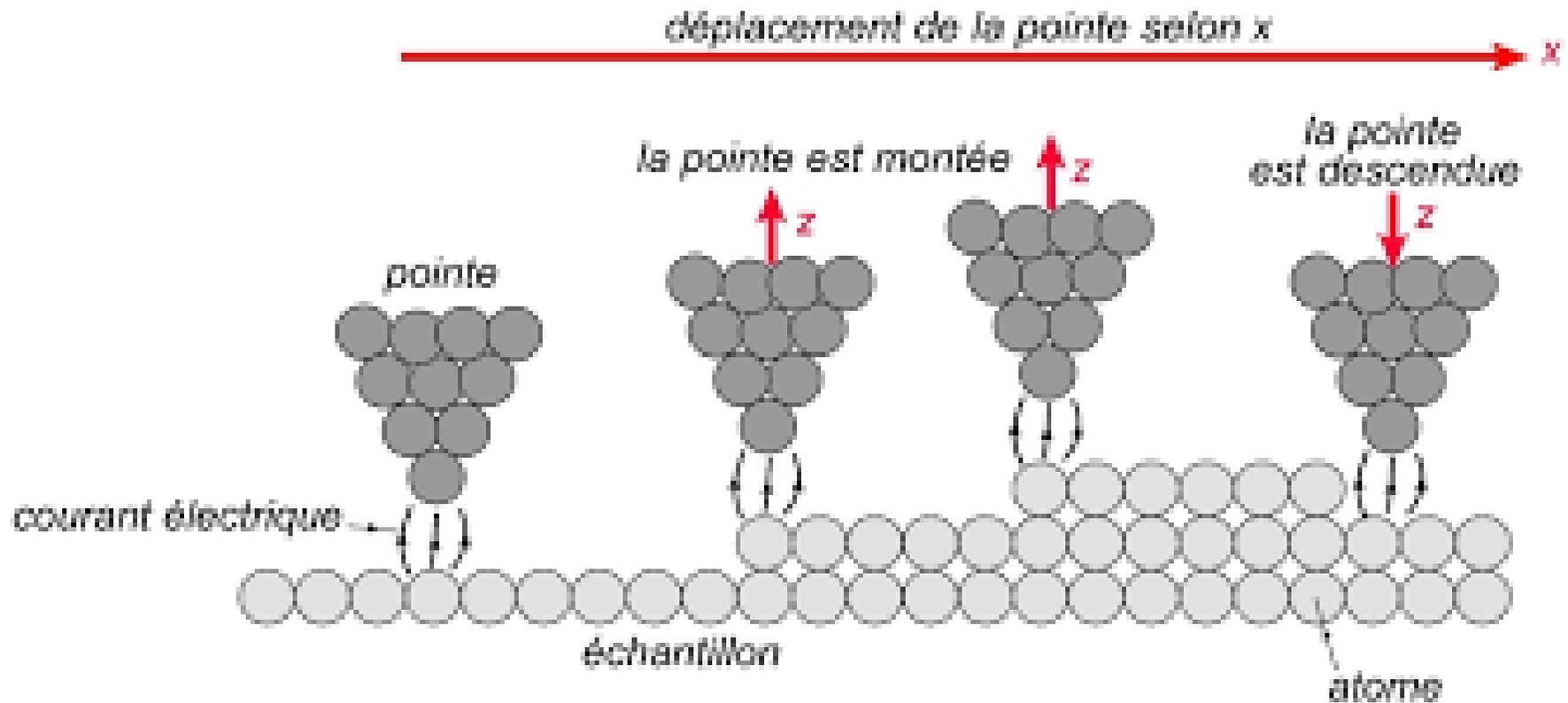
=>La hauteur de la pointe varie par rapport à la surface de référence



B: hauteur constante

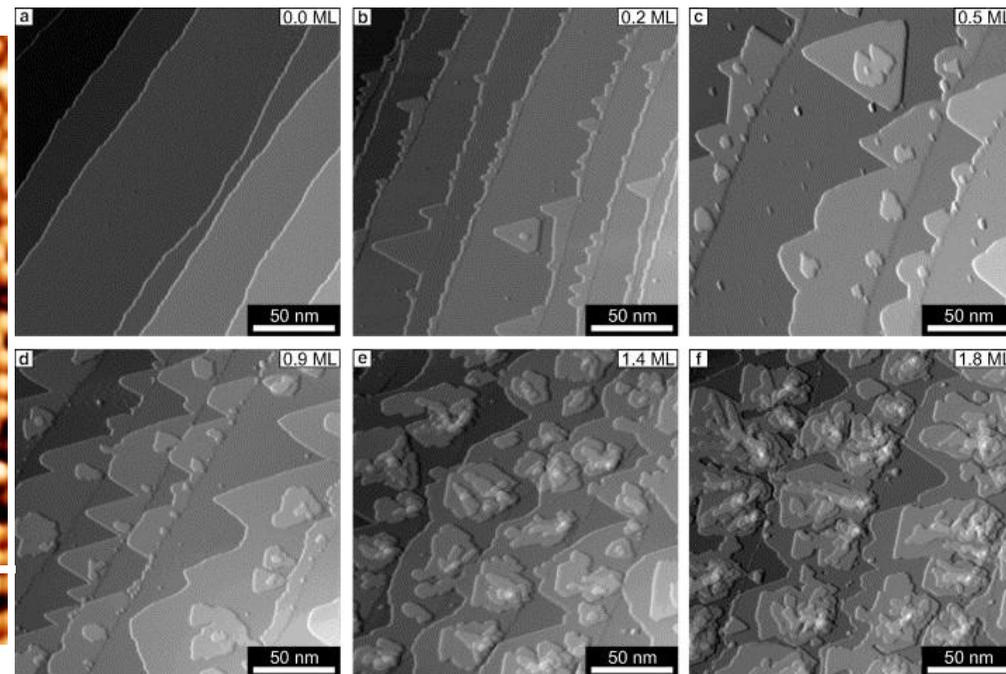
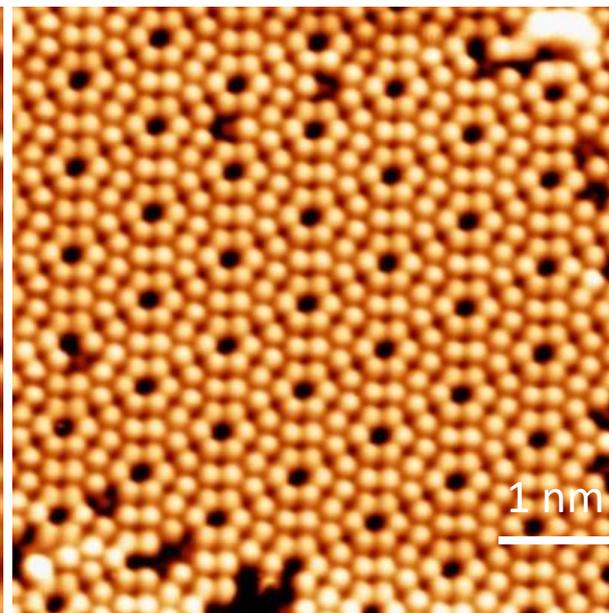
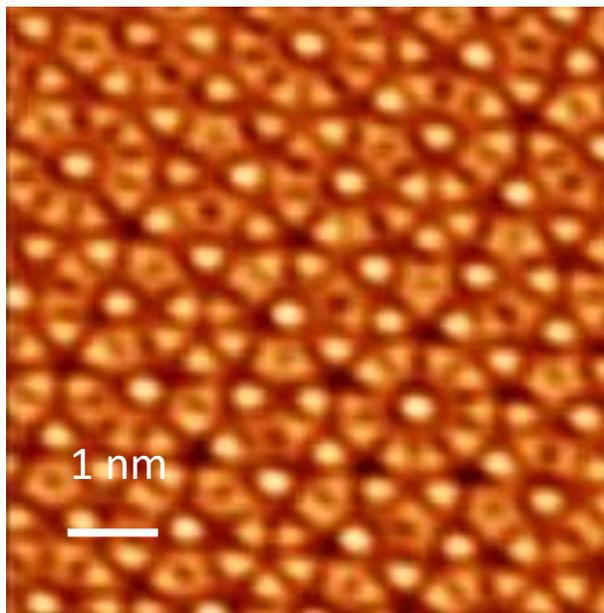
=>L'intensité du courant tunnel varie

On choisit de préférence d'imposer un courant tunnel d'intensité constante



Que voit-on?

Exemples d'images



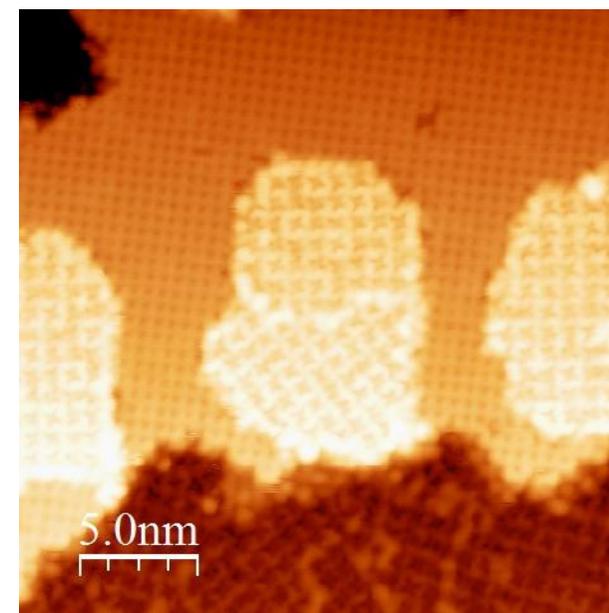
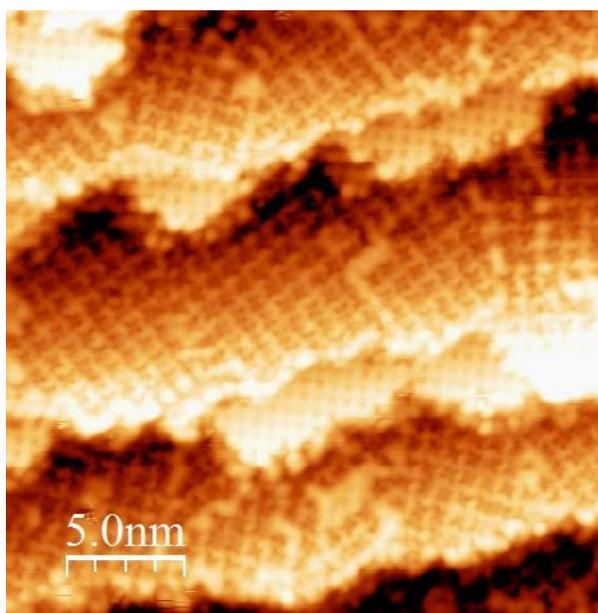
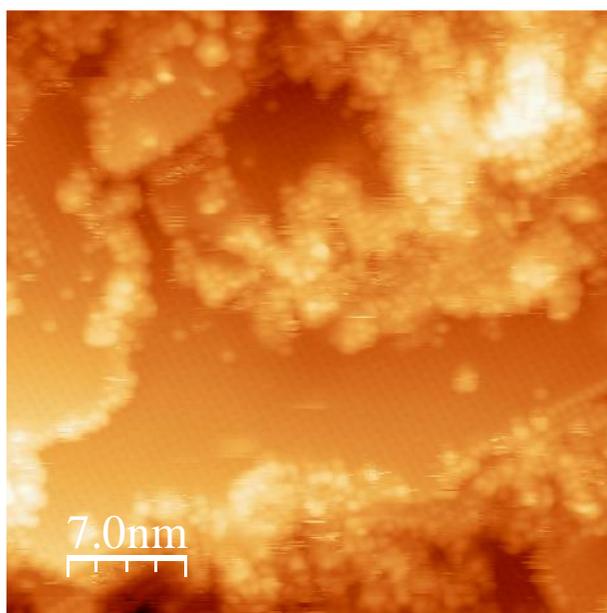
Film de $\text{Al}_{70}\text{Pd}_{21}\text{Mn}_9$
Points brillants Mn
Symétrie d'ordre 5
(IJL)

Surface de silicium (111)
2.5 V ; 0.1 nA

Dépôts croissants de chrome sur une
surface d'iridium (111) 0.1V ; 0.2nA

Que voit-on?

Autres exemple d'images...

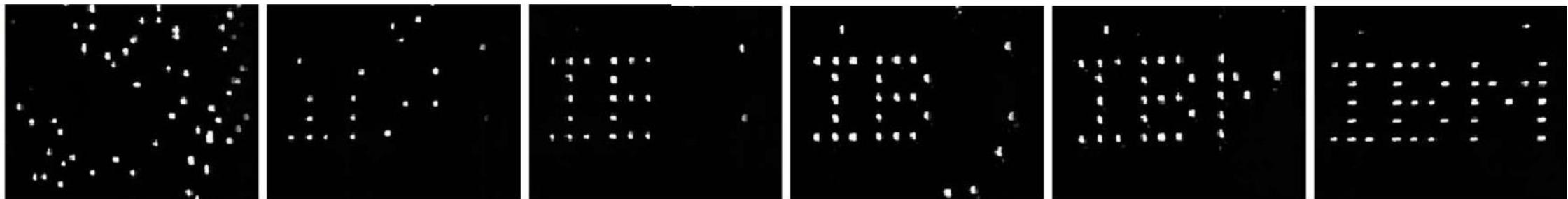


Dépôt d'atomes de fer sur substrat Al_9Co_2 (001)

Le microscope à effet tunnel permet aussi de « jouer » à MOUVOIR des atomes sur une surface métallique :

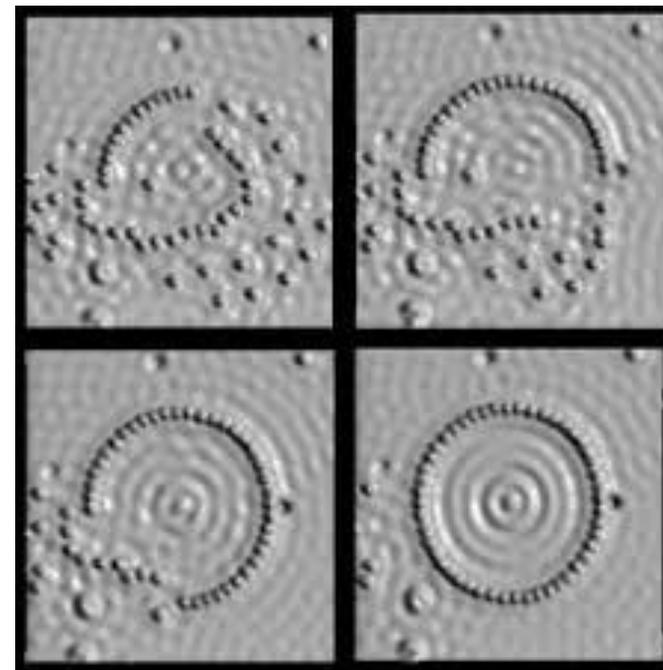
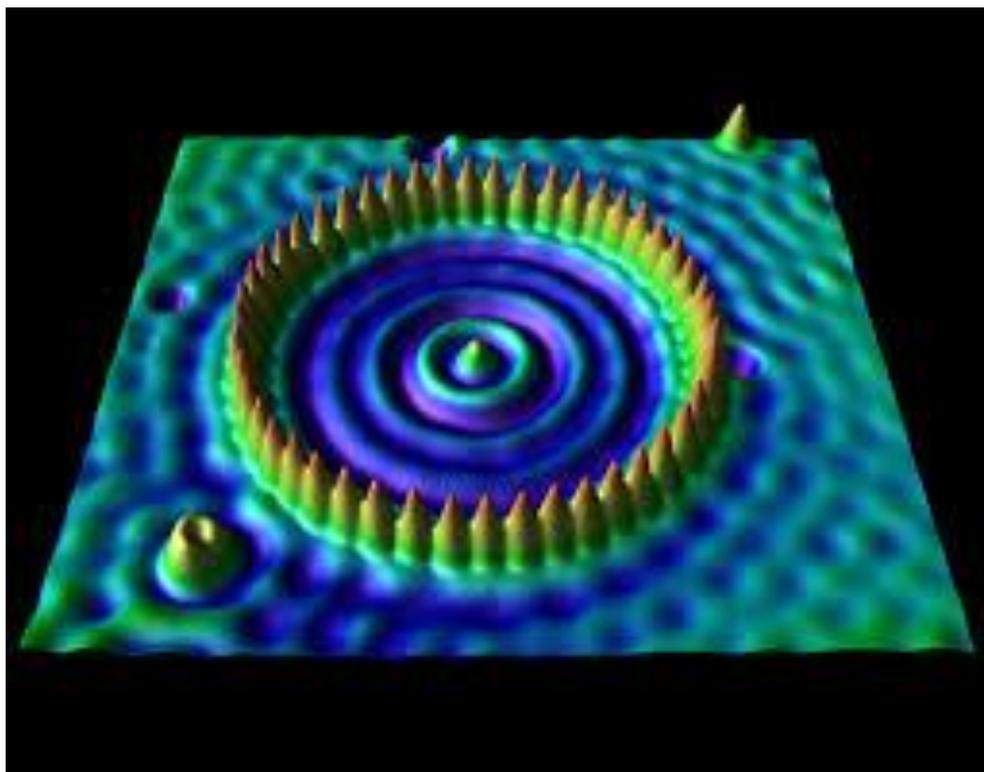
Il s'agit de nanoconstruction !

EIGLER en 1990 dépose 35 atomes de xénon, un par un, sur une surface de nickel pour former le sigle « IBM »



Enclos quantique

Une histoire qui fait des vagues!



Différentes étapes de la construction d'un « corral » quantique de 15 nm de diamètre par dépôt au microscope à effet tunnel de 48 atomes de fer sur un substrat de cuivre. Un phénomène d'ondes stationnaires apparaît à l'intérieur du cercle, dû au confinement quantique des ondes électroniques de surface.

Quelques domaines d'application

Etude des surfaces et des interfaces :

Vu précédemment

Microélectronique :

- microprocesseurs (informatique, communication,...)
- mémoires (lecture, stockage,...)
- téléphone portable, internet, écran plat, haut débit, haute résolution

Microbiologie moléculaire :

Etude des protéines

Elaboration de nanomatériaux

Par **voie ascendante** ou « **bottom-up** », on fabrique des nanostructures en assemblant les briques élémentaires de la matière (atomes ou molécules) une par une.

CONCLUSION

Dès sa conception, la microscopie en champ proche STM a su s'imposer parmi les principales techniques d'investigation des surfaces. L'arrivée de cet instrument d'analyse a modifié complètement la connaissance des surfaces en offrant des images de leur topographie avec une résolution pouvant atteindre l'échelle atomique.

Dans des conditions d'ultravide, les images en résolution atomique ont permis de mieux comprendre les mécanismes de croissance des surfaces, de mesurer localement le comportement électronique des particules et de confirmer des modèles structuraux obtenus par d'autres techniques. La capacité d'obtenir des images locales permet aussi d'observer des structures non détectables avec d'autres techniques d'analyses et de créer de nouvelles structures.

La microscopie à effet tunnel possède aujourd'hui un nombre très important d'applications technologiques, en particulier dans les domaines de la physique, de la chimie et de la biologie.

A mes collègues de l'IJL(Nancy)et du JSI(Ljubljana)



MERCI POUR VOTRE ATTENTION

