

## *Microscope à effet tunnel*

L'**effet tunnel** désigne la propriété que possède un objet quantique de franchir une barrière de potentiel même si son énergie est inférieure à l'énergie minimale requise pour franchir cette barrière.

C'est un effet purement quantique, qui ne peut pas s'expliquer par la mécanique classique. Pour une telle particule, la fonction d'onde, dont le carré du module représente la densité de probabilité de présence, ne s'annule pas au niveau de la barrière, mais s'atténue à l'intérieur de la barrière, pratiquement exponentiellement pour une barrière assez épaisse. Si, à la sortie de la barrière de potentiel, la particule possède une probabilité de présence non nulle, elle peut traverser cette barrière. Cette probabilité dépend des états accessibles de part et d'autre de la barrière ainsi que de l'extension spatiale de la barrière.

Au niveau théorique le comportement tunnel n'est pas fondamentalement différent du comportement classique de la particule quantique face à la barrière de potentiel ; elle satisfait à l'équation de Schrödinger, équation différentielle impliquant la continuité de la fonction d'onde et de sa dérivée première dans tout l'espace. De même que l'équation des ondes électromagnétiques mène au phénomène des ondes évanescentes, de même la fonction d'onde rencontre des cas où l'amplitude de probabilité de présence est non nulle dans des endroits où l'énergie potentielle est supérieure à l'énergie totale.

Si, au niveau mathématique l'évaluation de l'effet tunnel peut parfois être simple, l'interprétation que l'on cherche à donner aux solutions révèle le fossé qui sépare la mécanique classique, domaine du point matériel suivant une trajectoire définie dans l'espace-temps, de la mécanique quantique où la notion de trajectoire disparaît.

La durée de traversée tunnel d'une particule à travers une barrière quantique a été, et est encore, le sujet d'âpres discussions. Des études assez nombreuses dans le domaine électromagnétique ou photonique ont révélé l'apparition de ce que l'on peut interpréter comme des vitesses supraluminiques, respectant toutefois la relativité restreinte : il s'agit du phénomène connu sous le nom d'effet Hartman.

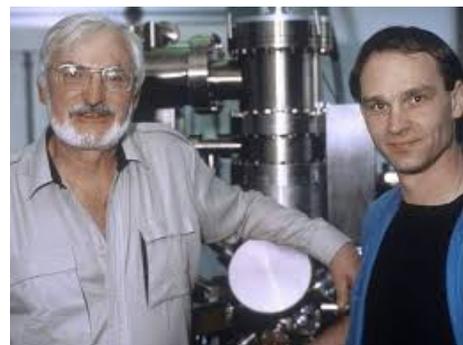
## *Microscopie à effet tunnel*

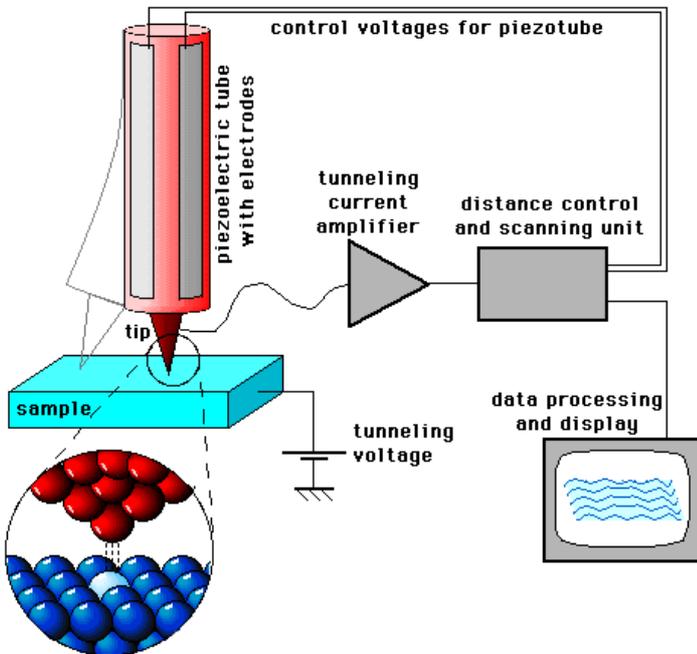
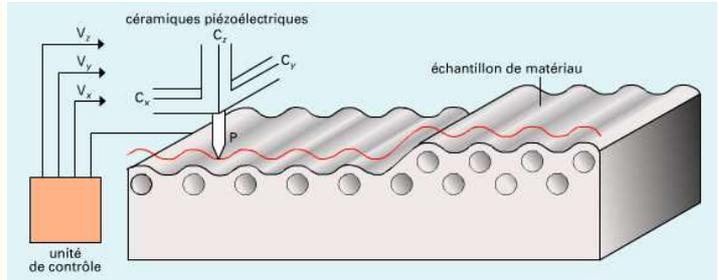
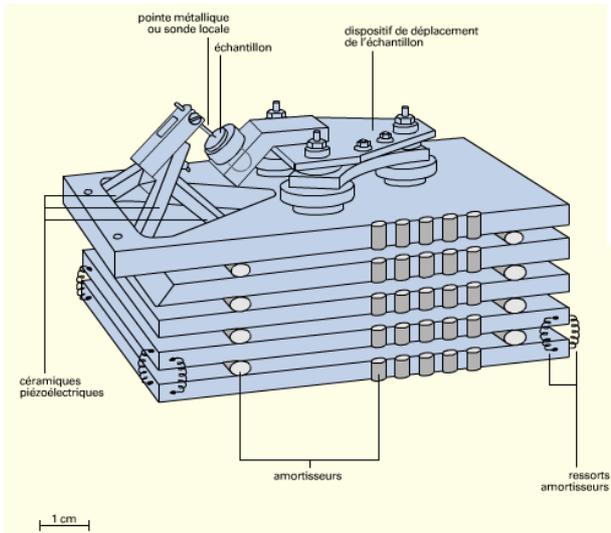
Les microscopes à sonde locale permettent de réaliser par ordinateur des cartes de contour d'une surface, atome par atome (voir figures ci-dessous). On en distingue deux types, les microscopes à effet tunnel (STM pour Scanning Tunneling Microscopes) et les microscopes à force atomique (AFM pour Atomic Force Microscopes), qui ont révolutionné l'imagerie des surfaces atomiques.

**Gerd Binnig** et **Heinrich Rohrer** (prix Nobel en 1986) ont inventé les STM au début des années 1980 au laboratoire de recherche IBM à Zurich, en Suisse. Plus tard, alors que Binnig était accueilli à l'Université de Stanford et au centre de recherche d'IBM d'Almaden (Californie, USA), il pensa au concept d'AFM, qu'il développa en 1985 avec Christophe Gerber d'IBM et Calvin Quate de Stanford.

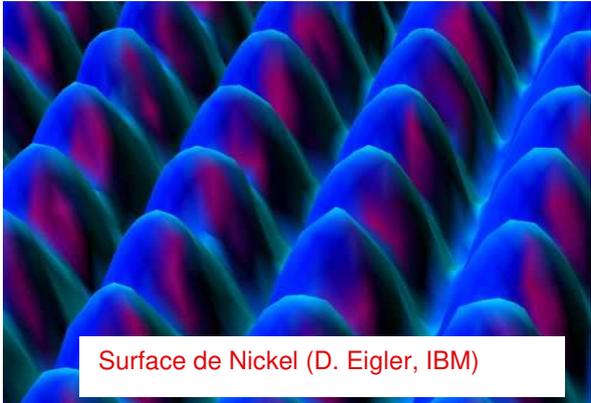
Dans la forme la plus courante de STM, un potentiel constant de polarité appropriée est appliqué entre les atomes d'une pointe et l'échantillon à examiner (figure A). Lorsque la pointe parcourt la surface de l'échantillon, à environ un atome de distance, les électrons attirés par la pointe traversent la séparation par effet tunnel. Le principe du STM réside dans le fait que la valeur du courant tunnel varie fortement avec la distance de séparation. Ce courant tunnel peut être aussi faible que quelques pA ( $10^{-12}$  A), et une variation de la séparation de seulement 0,4 nm peut provoquer un facteur  $10^4$  dans le courant tunnel. Un mécanisme de rétroaction très sensible régule la position de la pointe pour maintenir un courant électronique stable. Le mouvement de la pointe perpendiculairement à la surface permet de reproduire les contours des atomes de l'échantillon, produisant une sorte de carte topographique. L'image résultante (chemin de la pointe) est représentée par la courbe pleine rouge sur la 2ème figure à droite ci-dessous.

*Thornton Rex Physique moderne (Ed. de Boeck)*





Binnig et Rohrer (IBM) 1981-85  
Prix Nobel 1986



Surface de Nickel (D. Eigler, IBM)

Pour un électron tel que  $V_0 - E = 1 \text{ eV}$ , on a :

largeur du puits de potentiel	coefficient de transmission tunnel
$L = 5 \text{ Angströms}$	$T \approx 6.10^{-3}$
$L = 6 \text{ Angströms}$	$T \approx 2.10^{-3}$

**Le courant varie extrêmement vite avec la distance !**

[http://www.phys.ens.fr/~dalibard/PHY311/2012/PHY311\\_cours4.pdf](http://www.phys.ens.fr/~dalibard/PHY311/2012/PHY311_cours4.pdf)

Questions :

- Quelle peut être la relation entre l'intensité détectée par le microscope à effet tunnel et le coefficient de transmission  $T$  ?
- En utilisant l'expression de  $T$  fournie en cours, exprimer puis calculer la résolution  $|\Delta L|$  du microscope sachant que la sensibilité  $|\Delta I| / I = 2\%$  et que  $\delta \approx 10^{-9} \text{ m}$ .