

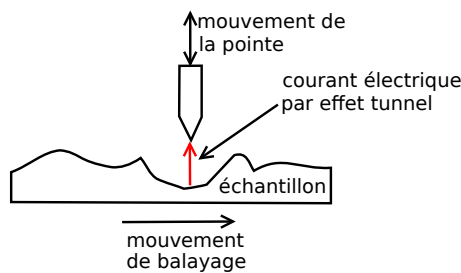
# DM 19

Vendredi 2 avril 2021

## Analyse documentaire : Le microscope à effet tunnel

### Description

Le microscope à effet tunnel (en anglais, scanning tunneling microscope, STM) est inventé en 1981 par des chercheurs d'IBM, Gerd Binnig et Heinrich Rohrer, qui reçurent le prix Nobel de physique pour cette invention en 1986. C'est un microscope en champ proche qui utilise un phénomène quantique, l'effet tunnel, pour déterminer la morphologie et la densité d'états électroniques de surfaces conductrices ou semi-conductrices avec une résolution spatiale pouvant être égale ou inférieure à la taille des atomes.



Il s'agit, pour simplifier, d'un palpeur (une pointe ou sonde) qui suit la surface de l'objet. La sonde balaie (scanne) la surface à représenter. Un ordinateur ajuste (via un système d'asservissement) en temps réel la hauteur de la pointe pour maintenir un courant constant (courant tunnel) et enregistre cette hauteur qui permet de reconstituer la surface.

Pour cela, avec un système de positionnement de grande précision (réalisé à l'aide de piézoélectriques), on place une pointe conductrice en face de la surface à étudier et l'on mesure le courant résultant du passage d'électrons entre la pointe et la surface par effet tunnel (les électrons libres du métal sortent un peu de la surface, si l'on se met très près sans pour autant la toucher, on peut enregistrer un courant électrique). Dans la plupart des cas, ce courant décroît très rapidement (exponentiellement) en fonction de la distance séparant la pointe de la surface, avec une distance caractéristique de quelques dixièmes de nanomètres. Ainsi, on fait bouger la pointe au-dessus de l'échantillon avec un mouvement de balayage et on ajuste la hauteur de celle-ci de manière à conserver une intensité du courant tunnel constante, au moyen d'une boucle de rétroaction. On peut alors déterminer le profil de la surface avec une précision inférieure aux distances interatomiques.

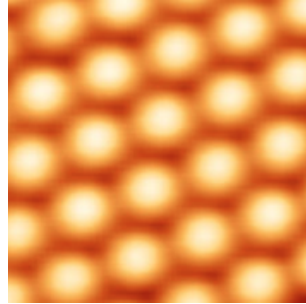
### Animation

Consulter les vidéos ci-dessous :

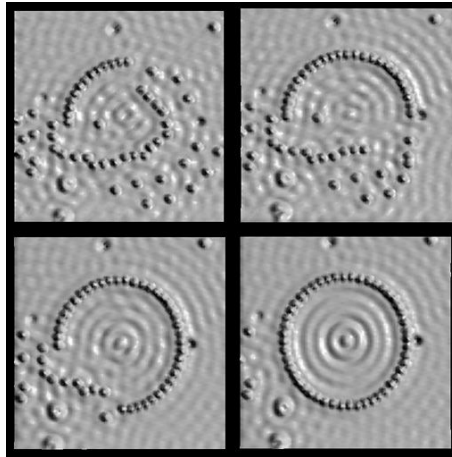
L'effet tunnel  
<https://toutestquantique.fr/tunnel/>

Le microscope à effet tunnel  
<https://toutestquantique.fr/effet-tunnel/>

## Images prises par un microscope à effet tunnel



Atomes de silicium à la surface d'un cristal de carbure de silicium (SiC). Image obtenue à l'aide d'un STM.



Réalisation d'un enclos d'atome de fer pour confiner des électrons à la surface d'un échantillon de cuivre. Les atomes de fer ont été déplacés par la pointe d'un microscope à effet tunnel.

Consulter la vidéo : <https://www.youtube.com/watch?v=oSCX78-8-q0>

## Paramètres du microscope à effet tunnel

On peut considérer que les électrons de conduction contenus dans un substrat métallique dont la surface est exposé au vide, évolue dans une énergie potentielle qui peut être modélisé par une marche de potentiel. La hauteur de la marche,  $\Phi_m$ , représente l'énergie minimale qu'il faut fournir pour extraire les électrons du métal. L'énergie  $\Phi_m$  est appelé travail d'extraction du métal et vaut typiquement 4 eV.

La fonction d'onde d'un électron est non nulle dans le vide et mais décroît exponentiellement avec la distance à la surface du conducteur. La distance caractéristique de décroissance est  $\delta = \frac{\hbar}{\sqrt{2m\Phi_m}} \approx 6.10^{-10} \text{ m}$ .

Les électrons du substrat peuvent franchir alors par effet tunnel le vide entre le substrat et la pointe. Il en résulte un courant dit tunnel dont l'intensité est proportionnel à la probabilité

de transmission de la barrière, donc  $I = I_0 \exp\left(-\frac{2d}{\delta}\right)$  avec  $d$  la distance la pointe et la surface. Le préfacteur  $I_0$  dépend, entre autre, de la tension  $U$  appliquée entre pointe et substrat. La tension appliquée  $U$  est de l'ordre de la dizaine de millivolts et le courant tunnel de quelques nanoampères.

## Questions

1. Expliquer pourquoi le microscope à effet tunnel fait partie des microscopes à sonde locale. Connaissez-vous d'autres exemples de microscopes à sonde locale ?
2. L'affinité électronique d'un semi-conducteur représente l'énergie à fournir à un électron de conduction pour l'extraire du semi-conducteur et le placer dans le vide. Par exemple, le carbure de silicium a une affinité électronique de 4,2 eV. Peut-on utiliser un microscope à effet tunnel sur un tel substrat ?
3. Expliquer le plus précisément ce que l'on voit sur la première image prise au microscope à effet tunnel. En particulier on s'interrogera sur l'origine du contraste de la figure. Le courant tunnel ne dépend pas uniquement de la distance pointe substrat et le préfacteur  $I_0$  pas uniquement de la tension appliquée. Identifier une propriété importante du substrat qui détermine aussi l'intensité du courant tunnel.
4. Quel paramètre détermine le sens de passage des électrons à travers la barrière ?
5. A quelle variation relative de l'intensité du courant tunnel correspond un déplacement de la pointe de l'ordre de  $10^{-11}$  m ? Commenter le résultat et expliquer pourquoi il est nécessaire de commander précisément la position de la pointe.
6. Il existe deux modes de fonctionnement du microscope : balayage de la surface à courant constant ou à hauteur constante. Quel inconvénient présente un balayage de la surface dans le mode à hauteur constante ?
7. La résolution latérale du microscope à effet tunnel est de l'ordre de la taille d'un atome. Est-il possible de distinguer des atomes individualisés grâce à un microscope optique ? Pourquoi ?