

MEQ2 Approche documentaire : microscopie à effet tunnel

Les microscopies à sonde locale, de développement récent, ont ouvert une nouvelle ère dans le domaine de la microscopie en raison de leur capacité à sonder diverses propriétés de la matière à l'échelle atomique. La microscopie à effet tunnel est la première de ces nouvelles techniques de microscopie à avoir été développée.

Le *microscope à effet tunnel* a été mis au point en 1984, dans les laboratoires IBM à Zürich, par G. BINNIG et H. ROHRER, qui ont reçu le Prix Nobel de Physique en 1986. Dans ce microscope, pour explorer la surface d'un substrat conducteur, on approche une pointe métallique très fine à proximité de cette surface.

I Principe de fonctionnement

On peut considérer que les électrons de conduction contenus dans le substrat métallique dont la surface est exposée au vide, « voient » un profil d'énergie potentielle qui peut être modélisé par une marche de potentiel, comme sur la figure 1 (a). La hauteur de la marche, Φ_m , représente l'énergie minimale qu'il faut fournir pour extraire les électrons du métal (par effet photoélectrique, par exemple). L'énergie Φ_m est appelée *travail d'extraction* du métal.

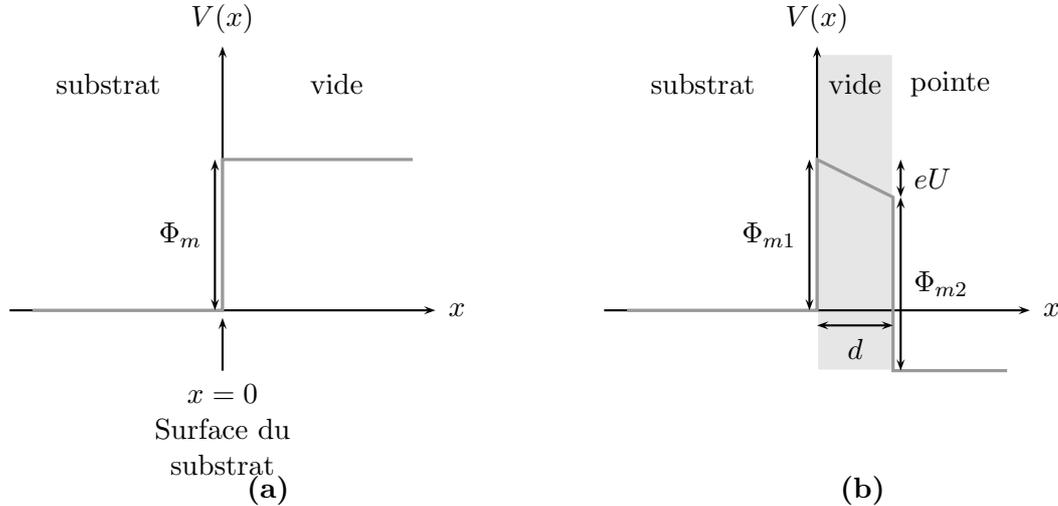


FIGURE 1 – Profil d'énergie potentielle : (a) substrat conducteur seul face au vide ; (b) substrat et pointe, distants de d , et séparés par du vide.

La probabilité de présence d'un électron dans la marche de potentiel, du côté $x > 0$ est non nulle, mais elle est faible et décroît exponentiellement avec la distance à la surface du conducteur (la fonction d'onde propre décrivant l'électron pour $x \geq 0$ correspond en effet à une onde évanescence). La distance caractéristique de décroissance de la fonction d'onde propre dans la marche de potentiel est $\delta = \hbar/\sqrt{2m\Phi_m}$, où Φ_m représente le travail d'extraction du métal, qui vaut typiquement 4 eV. La valeur typique de δ est donc 6×10^{-10} m.

On approche maintenant un second conducteur (la pointe) à proximité du premier (le substrat sondé), et l'on applique une différence de potentiel électrique U entre les deux conducteurs. Il apparaît alors une barrière de potentiel (voir figure 1 (b)) que les électrons du substrat peuvent

franchir par effet tunnel. Il en résulte un flux d'électrons entre le substrat et la pointe, c'est-à-dire un courant électrique, que l'on appelle *courant tunnel*. Son intensité est proportionnelle à la probabilité de transmission d'un électron à travers la barrière, soit à $e^{-2d/\delta}$. De façon approchée, on peut donc écrire :

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{2d}{\delta}\right), \quad (1)$$

où le préfacteur I_0 dépend, entre autres paramètres, de la tension appliquée U . Compte tenu de l'ordre de grandeur de δ , on comprend qu'il est nécessaire d'approcher la pointe à des distances inférieures au nanomètre si l'on veut récupérer un courant tunnel mesurable.

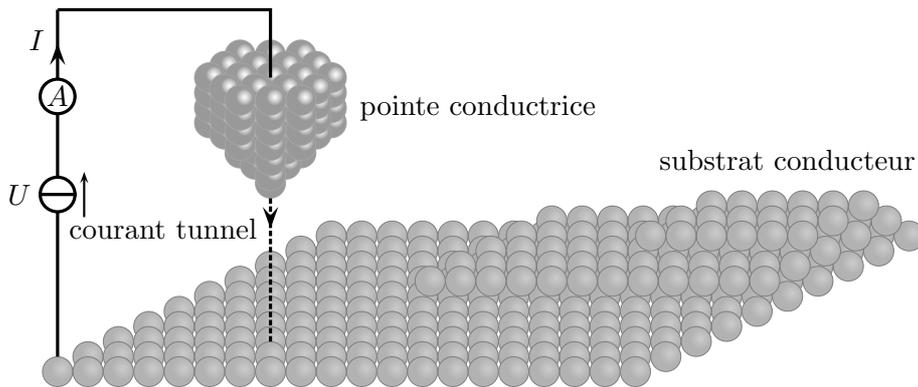


FIGURE 2 – Schématisation de la pointe conductrice et du substrat conducteur sondé.

La figure 2 représente la pointe conductrice et la surface étudiée. Presque tout le courant tunnel passe par l'extrémité de la pointe. Cela offre la possibilité de localiser le courant tunnel d'autant mieux que la pointe est fine. On peut espérer ainsi obtenir une cartographie des propriétés physiques locales du substrat étudié. Par ailleurs, on doit veiller à obtenir un courant tunnel suffisant. En somme, pour avoir la possibilité d'étudier les atomes du substrat un à un, on doit :

- avoir une pointe très fine, dont l'extrémité soit constituée d'un seul atome ;
- l'approcher à moins d'un nanomètre du substrat à étudier ;
- être capable de contrôler les déplacements de la pointe et de les mesurer à mieux que 10^{-11} m près ! Ceci est réalisé à l'aide de trois quartz piézoélectriques qui permettent de déplacer la pointe dans 3 directions orthogonales ;
- éliminer les vibrations qui perturbent la mesure.

II Différents types de mesures effectuées

Pour effectuer des mesures avec un microscope à effet tunnel, on impose toujours une différence de potentiel U entre le substrat et la pointe et on mesure le courant tunnel I . La tension appliquée est typiquement de l'ordre de la dizaine de millivolts et le courant tunnel mesuré a une intensité de l'ordre de quelques nanoampères. On peut en fait jouer sur cinq variables : la différence de potentiel U , le courant tunnel I , la position x , y ou z de la pointe par rapport au substrat. La mesure du courant tunnel revient à mesurer la décroissance exponentielle de la fonction d'onde, ce qui souligne sa réalité physique.

- *Topographie* : pour réaliser une carte topographique de la surface du substrat, on fixe la différence de potentiel U constant et on maintient le courant tunnel I constant en jouant sur la position verticale z de la pointe.

Comme le courant tunnel ne dépend alors que de la distance d entre la pointe et le substrat, maintenir I constant revient à maintenir d constant. Les mouvements verticaux de la pointe reproduisent alors les variations de hauteur de la surface du substrat.

- *Spectroscopie* : la pointe est positionnée au-dessus d'un point fixe du substrat (les variables x et y sont fixées). On modifie alors la position verticale z de la pointe, ou la tension appliquée U , et l'on enregistre les variations du courant tunnel I . On peut ainsi avoir accès à des propriétés physiques locales du substrat, comme la valeur du travail d'extraction Φ_m par exemple. Cela permet d'identifier la nature chimique locale du substrat. Lorsqu'on reproduit ce type de mesure pour différents points (x, y) du substrat, on peut obtenir une cartographie de sa composition chimique.

La figure 3 présente quelques images spectaculaires réalisées à partir d'un microscope à effet tunnel.

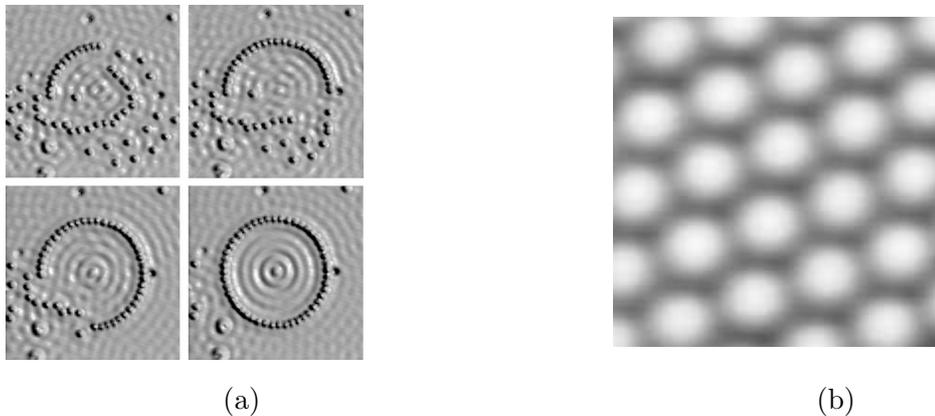


FIGURE 3 – (a) Réalisation d'un enclos d'atomes de fer pour confiner des électrons à la surface d'un échantillon de cuivre (l'image révèle clairement la nature ondulatoire des électrons). Les atomes de fer ont été déplacés par la pointe d'un microscope à effet tunnel. Cette image est une création originale d'IBM Corporation. (b) Visualisation d'atomes de silicium à la surface d'un cristal de carbure de silicium. Image réalisée à l'aide d'un microscope à effet tunnel par G. Baffou (LPPM Orsay).

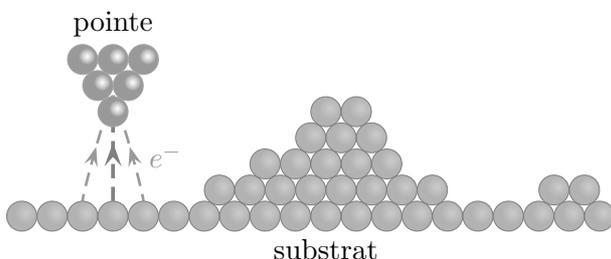


FIGURE 4 – Représentation schématique de la pointe et de la surface du substrat.

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 possible ce que l'on voit sur la figure 3 (b). En particulier, on s'interrogera sur l'origine du contraste de la figure. L'expression (1) montre que l'intensité du *courant tunnel* dépend de la distance d . La constante multiplicative I_0 ne dépend pas seulement de la tension appliquée. Identifier une propriété importante du substrat qui détermine aussi l'intensité du courant tunnel.
4. Quel paramètre détermine essentiellement le sens de passage des électrons à travers la barrière ?
5. À 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 contrôler précisément la position verticale de la pointe.
6. Le mouvement de la pointe est contrôlé à l'aide de cristaux piézoélectriques. Qu'est-ce qu'un cristal piézoélectrique ? Quel est le physicien à l'origine de la découverte de cet effet ?
7. Il existe deux modes de fonctionnement du microscope : balayage de la surface à courant constant ou à hauteur constante.
Reproduire le schéma de la figure 4. Dans le mode à courant tunnel constant, représenter le déplacement vertical de la pointe lorsque la surface est balayée de gauche à droite. Quel inconvénient présente un balayage de la surface dans le mode à hauteur constante ?
8. 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 ?