

Epreuve écrite de sélection - IPHO 2014 - Exercice 2

Microscopie à effet tunnel

Le développement du microscope à effet tunnel (STM pour Scanning tunneling microscope) est considéré comme une révolution dans les domaines atomiques et moléculaires. La microscopie à effet tunnel est une technique expérimentale qui permet de sonder la matière à l'échelle atomique. Elle a été inventée dans les années 1980 par Heinrich Rohrer et Gerd Binnig au laboratoire de recherche d'IBM. Pour cette innovation révolutionnaire, ils ont reçu le Prix Nobel de Physique en 1986.

Le concept instrumental du STM est d'aller sonder le champ proche électronique, constitué par effet tunnel à la surface d'un matériau conducteur. L'effet tunnel est un effet quantique : des électrons ont une probabilité de présence non nulle dans une zone où l'énergie potentielle est supérieure à l'énergie totale. Ils peuvent ainsi franchir une barrière d'énergie potentielle.

Lorsque les électrons qui circulent dans un métal arrivent à sa surface, tout se passe comme s'ils avaient la possibilité de sortir du métal, pour y revenir ensuite. Le principe de fonctionnement du STM est le suivant : une pointe, terminée par un atome unique vient balayer la surface d'un échantillon conducteur. Une fois qu'elle en est suffisamment proche, la pointe et le champ d'électrons « tunnel » de l'échantillon forment un circuit électrique porté à un très faible potentiel.

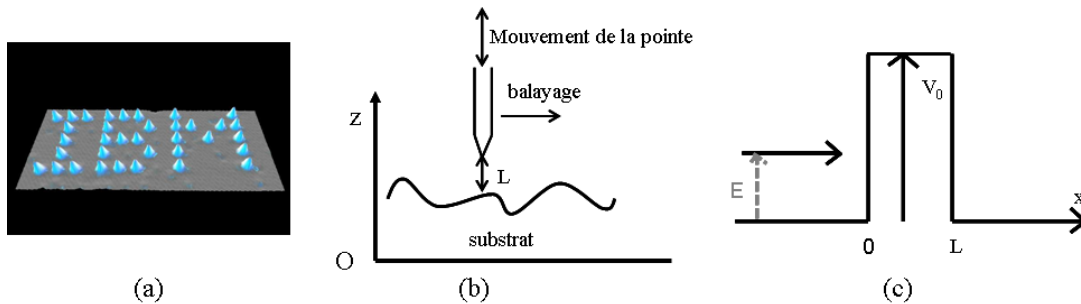


FIGURE 1: (a) En Novembre 1989 des chercheurs d'IBM ont démontré que la technologie de microscopie par effet tunnel peut être utilisée pour manipuler la matière atome par atome. Comme exemple de cette technique, ils ont placé des atomes individuels sur un substrat en formant les trois lettres "IBM" (b) Déplacement de la pointe le long de la surface du substrat (c) Modélisation de la barrière de potentiel

1 On considère le mouvement d'une particule dans la barrière de potentiel représentée sur la figure 1 (c) : $V = 0$ pour $x < 0$, $V = V_0$ pour $0 < x < L$ et $V = 0$ pour $x > L$. Une particule classique d'énergie totale $E < V_0$ arrive sur la barrière de potentiel. Que se passe-t-il ?

2 Une particule quantique peut, en arrivant sur la barrière faire une transition virtuelle vers un état d'énergie $E' \neq E$. Si $E' > V_0$ la particule peut pénétrer dans la région $x > 0$. On admet qu'elle ne dispose pour cela que d'un temps au plus égal à $\tau = \frac{\hbar}{E' - E}$.

a Montrer que la distance maximale que peut parcourir la particule est $d_M = \sqrt{\frac{\hbar^2}{2m(V_0 - E)}}$. Dans quel cas la particule peut-elle traverser la barrière de potentiel ?

b Donner la valeur de d_M dans le cas où $V_0 - E = 4eV$.

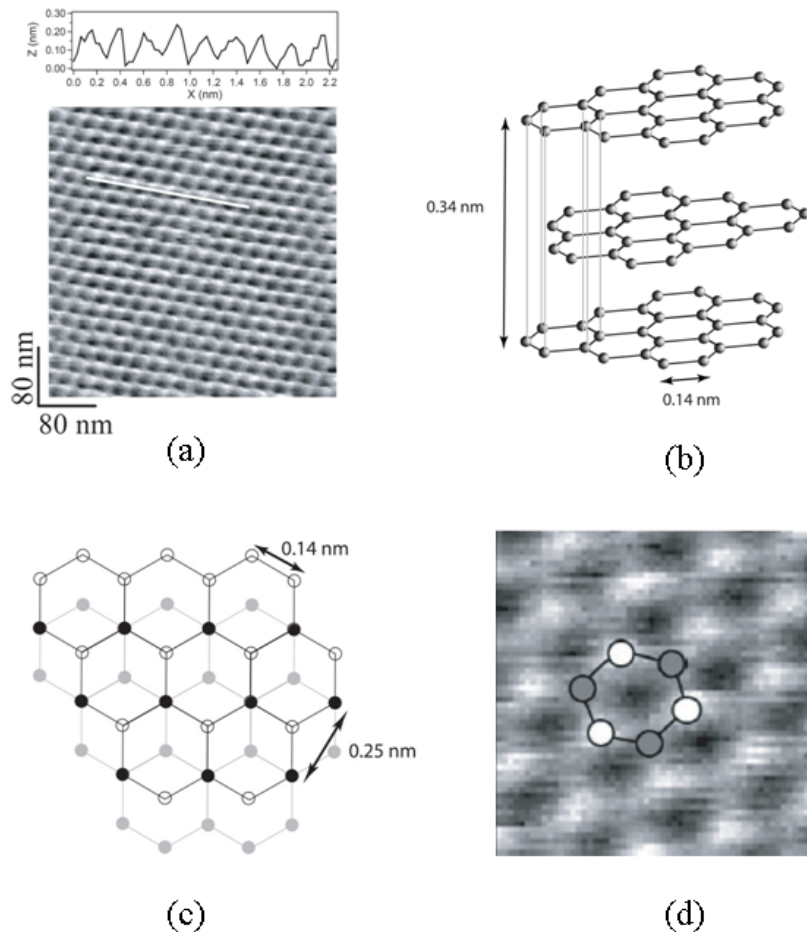


FIGURE 2: (a) bas : image par STM de la surface du graphite, haut : profil le long de la ligne blanche tracée sur l'image en dessous (b) Structure en feuillets du graphite (c) vue du dessus de ce solide (d) image haute résolution du graphite.

3 Dans le cas d'un microscope, on applique une tension entre la pointe et l'échantillon. On assimile le passage des électrons de l'échantillon conducteur vers une fine pointe en métal au franchissement d'une barrière de potentiel. Il se produit alors un courant tunnel proportionnel à la tension appliquée et à e^{-2L/d_M} . Expliquer alors qualitativement le principe du microscope à effet tunnel. En particulier, décrire les deux modes de fonctionnement possibles : distance pointe/surface L constante ou pointe fixe par rapport à l'axe (Oz) (voir figure 1 (b)) ?

4 On étudie le graphite. Sa structure est constituée de feuillets hexagonaux non compacts, nommés graphènes (voir figure 2 (b)).

a On fait l'image sa surface à l'aide d'un microscope à effet tunnel. Les zones claires sont des bosses et les zones sombres sont des creux. (figure 2 (a)). A l'aide de l'analyse du profil le long du trait blanc (graphique en haut de la figure 2 (a)), on peut déterminer la distance d entre deux maxima. En donner une estimation.

b La distance entre deux atomes de carbone voisins vaut : $a = 0.14$ nm (voir figure 2 (c)). En s'aidant des figures 2 (c) et (d), expliquez pourquoi la distance d entre deux maxima est différente de la longueur a ? Proposez en particulier une explication à la différence d'intensité du signal pour les différents atomes de carbone imagés à la figure 2 (d).