

Microscope à effet tunnel

Un microscope à sonde locale est un dispositif permettant de réaliser l'image de la surface d'un échantillon **point par point en approchant une « sonde » à une distance microscopique** de l'échantillon et en effectuant un balayage ; chaque position de la sonde donne une information « locale » sur l'échantillon.

Le **microscope à effet tunnel** ("STM" en anglais) est un microscope à sonde locale particulier où la sonde est une pointe métallique, dont l'extrémité est de dimension atomique, et l'échantillon un matériau conducteur ou semi-conducteur ; en appliquant une différence de potentiel entre cette pointe (anode) et cet échantillon (cathode), on voit apparaître un courant électronique d'intensité mesurable qui franchit le vide entre pointe et échantillon par effet tunnel (*figure 1*) ; c'est l'intensité de ce « **courant tunnel** » qui renseigne sur la distance pointe-échantillon ainsi que sur les propriétés de l'échantillon, et permet in fine de former une image topographique de la surface de l'échantillon, comme sur la *figure 2* où l'on visualise des atomes de silicium à la surface d'un cristal de carbure de silicium (image LTTM Orsay). Les pointes conductrices utilisées doivent être fines et stables dans le temps car elles jouent sur la résolution. Elles peuvent être en tungstène, platine iridié, or... La *figure 3* montre une pointe de

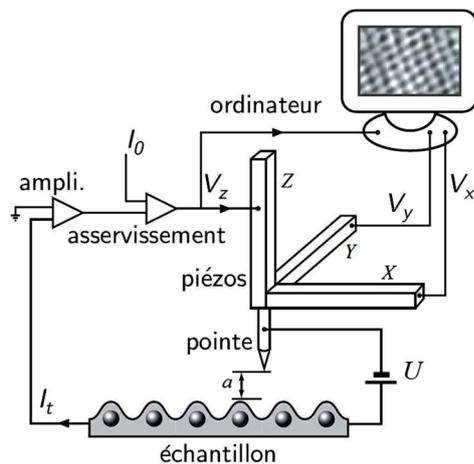


Fig. 2

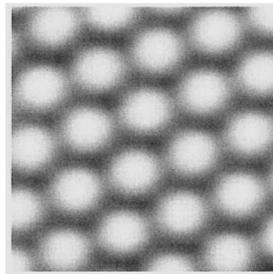
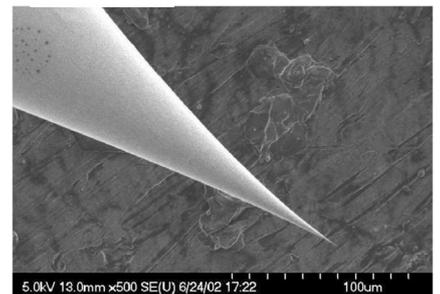


Fig. 3



tungstène vue au microscope électronique à balayage (MEB).

Le microscope doit être construit avec des matériaux très rigides et isolé des vibrations extérieures (support avec système d'amortissement). Un dispositif mécanique non représenté sur la figure 1 permet une première approche de la pointe vers la surface à étudier, puis la mesure du courant tunnel commence. Un système électronique et informatique permet l'amplification du courant tunnel (intensités de quelques nanoampères, voire picoampères), le pilotage de la pointe avec un asservissement qui permet de contrôler très finement la distance pointe-échantillon, de l'ordre de l'angström, ainsi que le traitement et la visualisation des données. Le balayage de la surface de l'échantillon, quant à lui, est réalisé avec une précision de l'ordre du picomètre, voire mieux, grâce à des céramiques piézoélectriques.

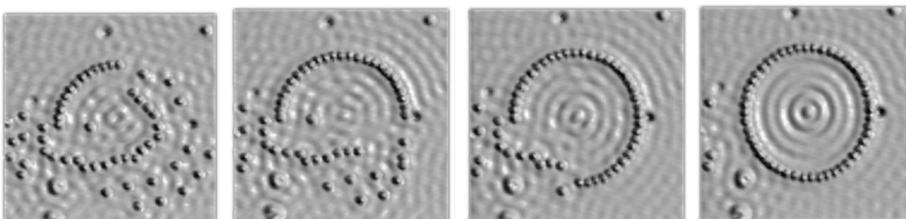


Fig. 4 : Étapes de réalisation, avec la pointe d'un STM, d'un « nano-enclos » d'atomes de fer sur un plan de cuivre (vu au STM ; IBM Almaden).

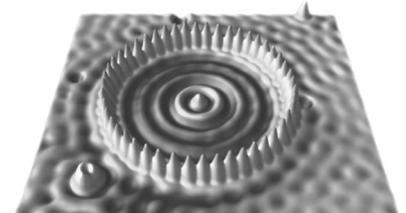
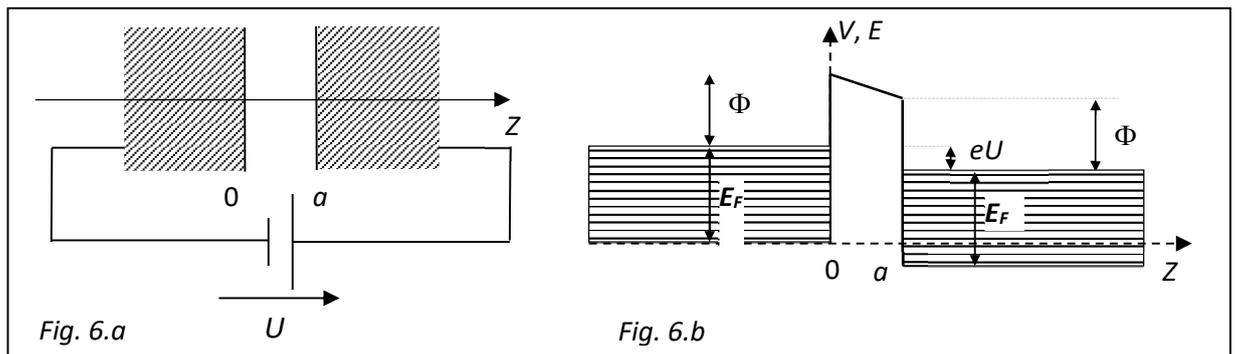


Fig. 5 : « Nano-enclos » vu en relief au STM.

Les images obtenues avec un STM donnent des renseignements sur la topographie mais aussi sur la densité électronique à la surface de l'échantillon. En outre, la pointe du STM peut être utilisée pour déplacer des atomes et construire des structures atomiques particulières. Par exemple, les images suivantes (*Fig. 4 et 5*) montrent des étapes de construction d'un « nano-enclos » circulaire (rayon 7,13 nm) constitué de 48 atomes de fer à la surface d'un échantillon de cuivre. Les vaguelettes concentriques observées dans ce « nano-enclos » montrent le caractère ondulatoire des électrons dans le puits quantique où ils se trouvent !

Ce microscope a été mis au point en 1981 par deux chercheurs d'IBM, G. Binnig et H. Rohrer, ce qui leur a valu le prix Nobel en 1986. Il est devenu un outil incontournable de la physique des matériaux et est à présent utilisé industriellement pour le contrôle de certaines réalisations (réseaux de diffraction, têtes de lecture magnétiques, CD, DVD...); les biologistes y font appel pour observer des macromolécules et virus adsorbés sur des surfaces, un intérêt du STM étant qu'il fonctionne aussi avec du liquide, comme l'eau, entre la pointe et l'échantillon. D'un point de vue plus théorique, on peut modéliser l'échantillon et la pointe par 2 blocs métalliques séparés par une zone de vide et soumis à une ddp (*figure 6.a*); le diagramme énergétique simplifié des électrons de conduction est alors donné par la *figure 6.b* (diagramme rigoureusement valable à température nulle mais qui constitue une très bonne approximation à température ambiante), sachant que :

- * Dans le bloc métallique de gauche modélisant l'échantillon, les électrons occupent des niveaux d'énergie très serrés, compris entre 0 (énergie choisie comme référence) et une valeur maximale E_F appelée énergie de Fermi ($E_F \approx 7$ eV pour le cuivre); il existe des niveaux d'énergie accessibles $E > E_F$ mais ces niveaux ne sont pas occupés.
- * Dans le bloc métallique de droite modélisant la pointe, la situation est exactement la même mais les niveaux d'énergie sont abaissés de eU par rapport au bloc de gauche.
- * La tension U , de quelques millivolts à quelques volts, est telle que $eU < E_F$ et $eU < \Phi$ où Φ est le potentiel d'extraction du métal ($\Phi \approx 4$ eV pour un bon conducteur).
- * Les électrons de l'échantillon les plus énergétiques (ayant l'énergie de Fermi) passent dans la pointe par effet tunnel et y occupent les niveaux d'énergie accessibles vacants (le processus de transfert par effet tunnel étant iso-énergétique).



Parmi les microscopes à sonde locale, on peut citer, outre le STM :

- Le **microscope à force atomique** ("AFM" en anglais) où la pointe servant de sonde et l'échantillon sont tous deux isolant et qui exploite la force de répulsion entre, d'une part, les nuages électroniques des atomes de la surface à imager et, d'autre part, le nuage électronique des atomes de la pointe; cette force provoque un mouvement de la pointe, reliée à un système de levier, qui est mesuré par une méthode optique (*figure 7*).
- Le **microscope optique en champ proche** ("SNOM" en anglais) qui exploite la présence d'ondes optiques évanescentes à la périphérie immédiate d'un échantillon éclairé; ces ondes n'existent qu'en « champ proche » (par opposition au « champ lointain » où sont détectées les ondes progressives diffusées par l'échantillon) et sont captées par fibre optique taillée en pointe, qui joue le rôle de sonde locale (*figure 8*).

- En revanche, le **microscope électronique à balayage** (MEB) n'est pas un microscope à sonde locale car il n'y a pas de sonde microscopique qui vient récupérer l'information localement. Le MEB ressemble davantage à un microscope optique où l'on aurait remplacé le faisceau lumineux par un faisceau d'électrons afin d'atteindre des longueurs d'ondes inférieures au micromètre.

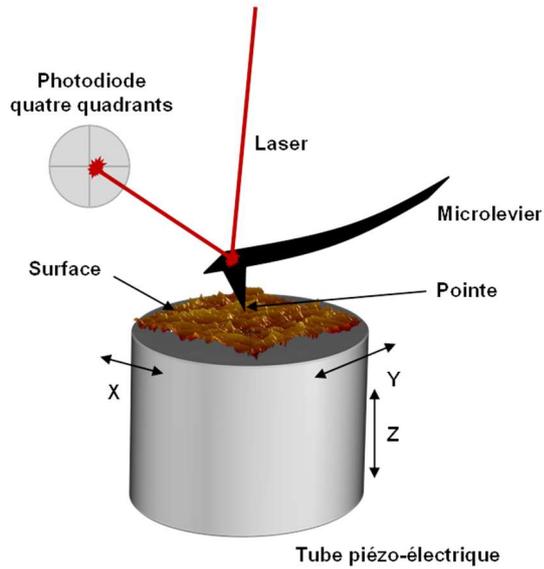


Fig. 7 : Schéma de principe d'un AFM

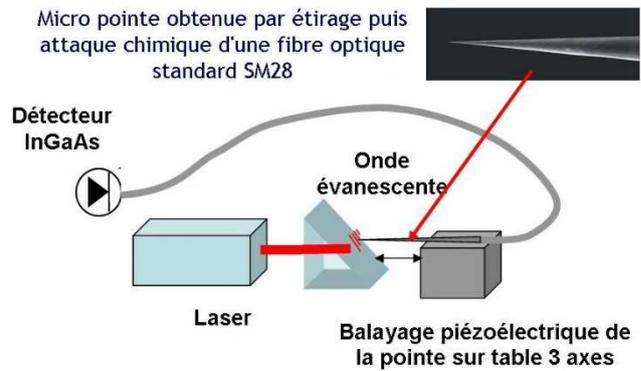


Fig. 8 : Schéma de principe ultra simplifié d'un SNOM