

Microscopie à effet tunnel.

Scanning Tunneling Microscopy STM,
Microscopie tunnel à balayage de pointe,
Scanning Tunneling Spectroscopy STS,

➤ **Principe - Effet tunnel**, mécanique quantique $\Delta E \cdot \Delta t \sim \hbar$ - G. Binnig, H. Rohrer, *Helv. Phys. Acta* **55** (1982) 726 – 1986 Nobel Prize in Physics

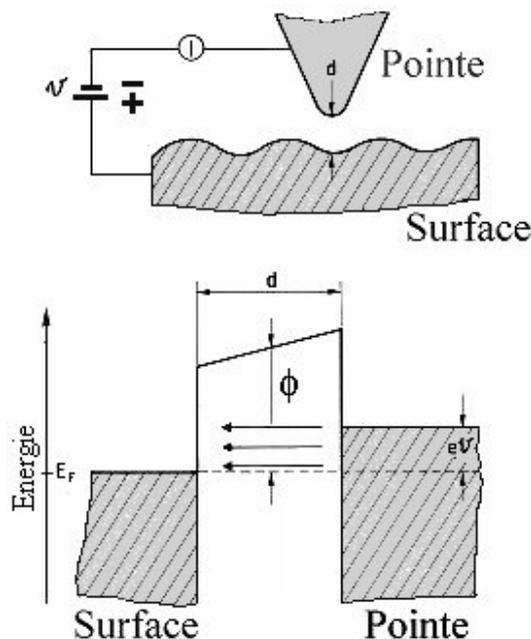
Soient deux électrodes métalliques, distantes de d (quelques Å), entre lesquelles est appliquée une tension V , alors il existe un courant tunnel I_{tunnel} donné par :

$$I_{\text{tunnel}} \propto V e^{(-2Kd)}$$

avec $e \cdot V \ll \Phi$, $K = \frac{\sqrt{2m_e \Phi}}{\hbar}$ où Φ travail de sortie des électrodes.

Une variation de $1 \text{ \AA} = 0.1 \text{ nm}$ de la distance inter-électrodes d se traduit par un changement d'un ordre de grandeur de I_{tunnel} .

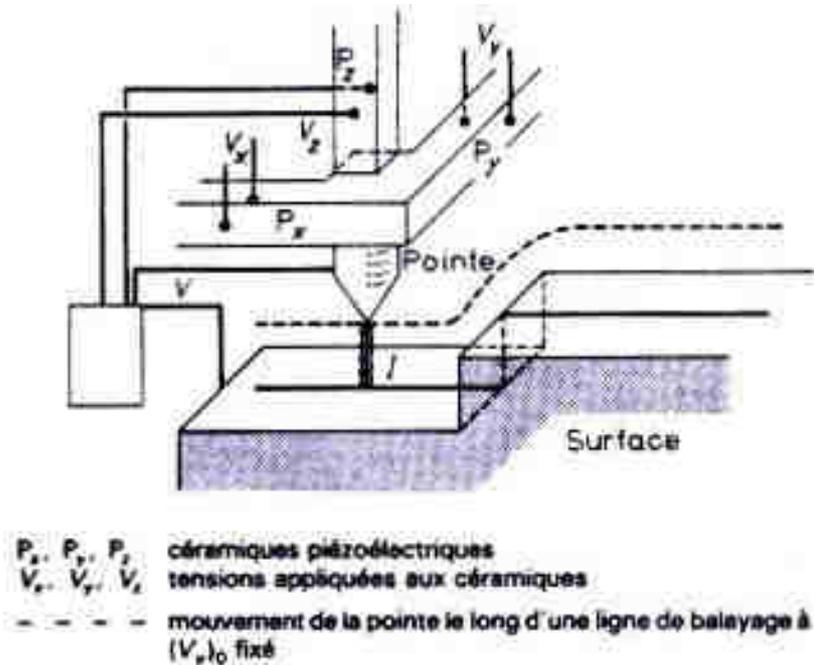
Ordres de grandeur : $I_{\text{tunnel}} \sim 1 \text{ nA}$, $V \sim 1 \text{ V}$, $d \sim 0.1 - 1 \text{ nm}$



Exploitation de la dépendance exponentielle du courant tunnel I_{tunnel} avec la distance inter-électrodes d (pointe - surface) pour imager une surface à l'échelle atomique.

Microscopie à effet tunnel - Mise en oeuvre.

➤ Principe - Mise en œuvre de la microscopie tunnel.



.Système d'électrodes = système (**Pointe - Surface**),

.Dispositif de balayage (X, Y) de la pointe via **céramiques piezoélectriques P**.

Exemple : pour un tube en PZT ($\text{Pb}(\text{Ti},\text{Zr})\text{O}_3$) de dimensions $(L, \Phi_{\text{max}}, \Phi_{\text{min}}) = (12.7, 6.35, 5.84 \text{ mm})$: extensions de $\approx 5 \text{ nm/V}$ suivant les trois directions (X, Y, Z).

.**Asservissement suivant Z (d)** de la position de la pointe au cours du balayage - maintien du courant tunnel I_{tunnel} constant - mode Z : courant de consigne $I_{\text{tunnel}} \sim 1 \text{ nA}$, $V_{\text{tunnel}} \sim 1 \text{ V}$, $d \sim 1-10 \text{ \AA} = 0.1-1 \text{ nm}$.

.Dispositif antivibratoire.

→ Image mode Z : $d \text{ pl } Z = f(X, Y)$ (asservissement actif, $I = \text{cste}$),

→ Image mode I : variation $I = f(X, Y)$ (asservissement inactif).

Résolution verticale $\Delta r_z \geq 0.01 \text{ \AA}$ (dépendance exponentielle),

Résolution latérale fonction de la qualité de la pointe $\Delta r_{xy} \geq 1 \text{ \AA} = 0.1 \text{ nm}$.

→ Résolution atomique possible.

Microscopie à effet tunnel.

➤ Principe - Intensité du courant tunnel - Interprétation des images.

$$I_{\text{tunnel}} = \int_{E_F}^{E_F + eV} \rho_{\text{surface}}(E + eV) \rho_{\text{pointe}}(R_{\text{pointe}}, E) T(E, V) dE$$

$$\partial I_{\text{tunnel}} / \partial (eV_x) = \rho_{\text{surface}}(E + eV) \rho_{\text{pointe}}(R_{\text{pointe}}, E) T(E, V)$$

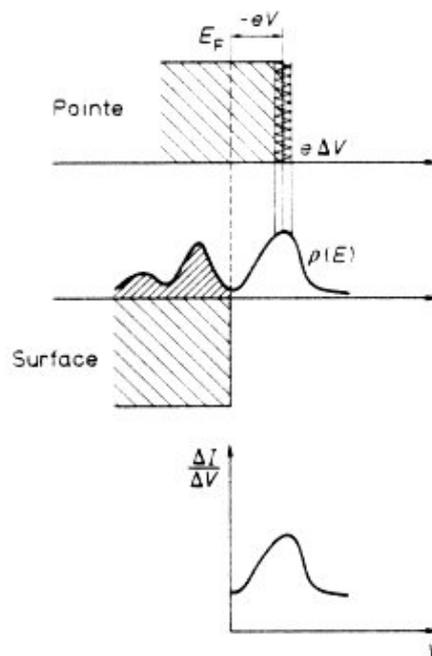
. E_f niveau de Fermi, $E = E_f + eV_x$ avec $0 \leq V_x \leq V$,

. ρ_{surface} densité locale des états électroniques de la surface,

. ρ_{pointe} densité locale des états électroniques de la pointe évaluée au centre de courbure de celle-ci R_{pointe} (pointe W),

. $T(E, V)$ coefficient de transmission de la barrière (élément de matrice $|M|^2 \propto \exp(-2Kd)$, $K = \sqrt{2m_e \Phi} / \hbar$).

En mode Z, les images de microscopie par effet tunnel sont des représentations de la densité électronique locale au voisinage du niveau de Fermi à la position de la pointe.



Une modulation ΔV est superposée à la rampe de tension V appliquée entre pointe et surface et le signal $\Delta I / \Delta V$ est mesuré à l'aide d'une détection synchrone.

Fig. 4. - Relation entre la densité d'états électroniques de la surface analysée avec le signal $\Delta I / \Delta V$.

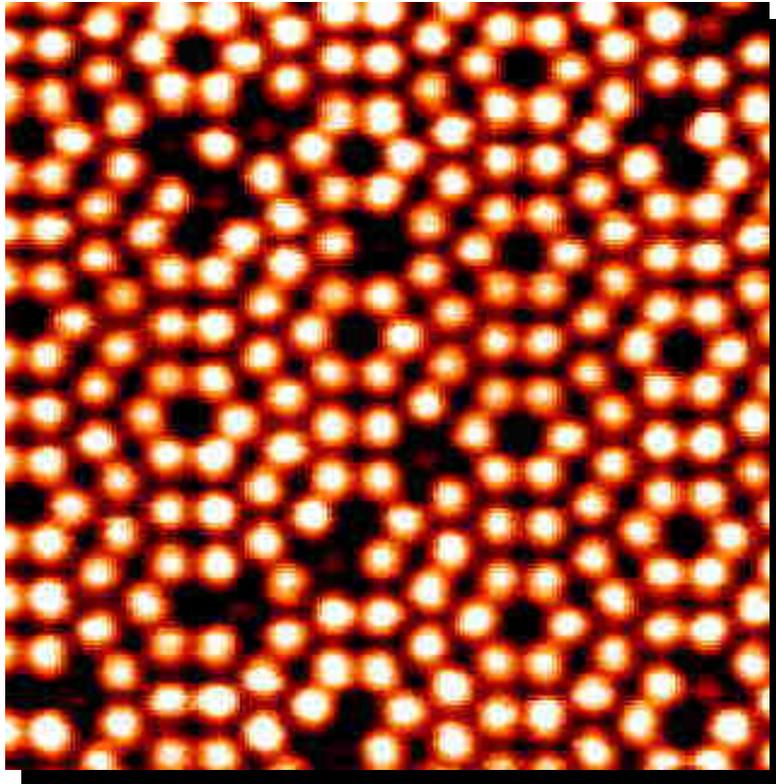
Microscopie à effet tunnel.

➤ Applications.

Étude, par imagerie directe, de structures de surface d'échantillons conducteurs et semi-conducteurs :

. Étude de surfaces métalliques : surfaces vicinales...

. Étude des structures atomique et électronique des reconstructions de surface de semi-conducteurs,



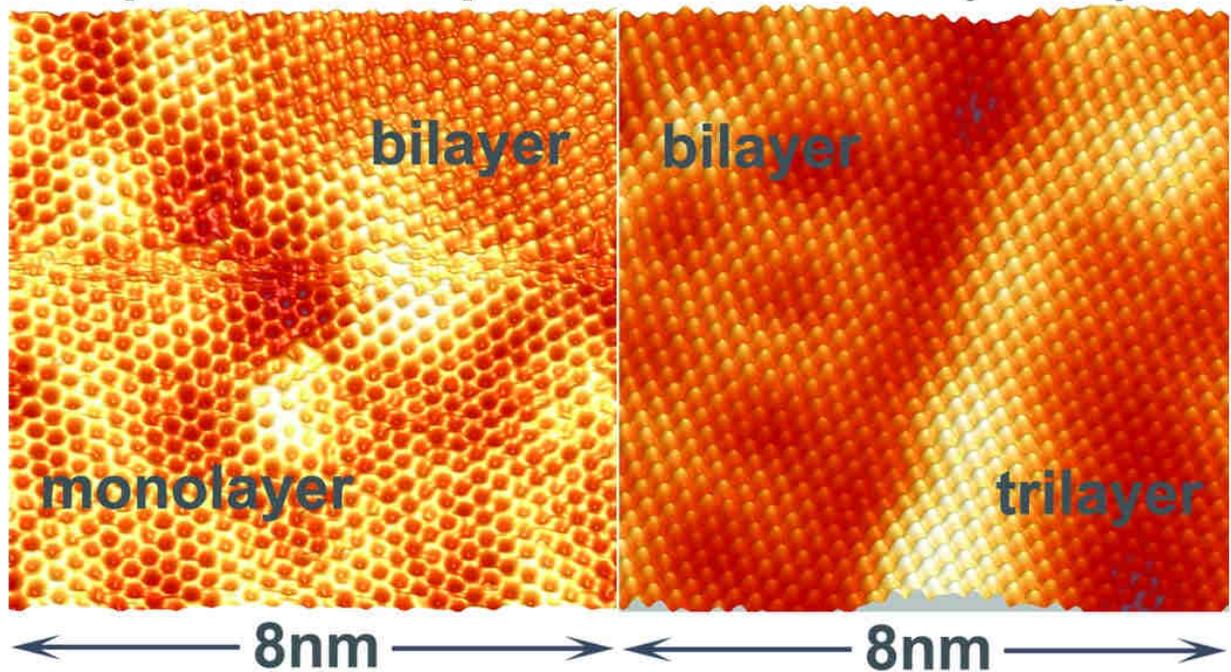
Si(111) Reconstruction (7x7) - document OMICRON VP GmbH

. Étude des étapes initiales de phénomènes d'adsorption, d'absorption, de réactions de surface, de catalyse...

Étude spectrométrique de la structure électronique de surface
Scanning Tunneling Spectroscopy STS,

. courbes $\Delta I/\Delta V = f(V)$, $d \ln I / d \ln V = f(V)$...

Epitaxial Graphene on 6H-SiC(0001)



Epitaxial Graphene sur 6H-SiC(0001)

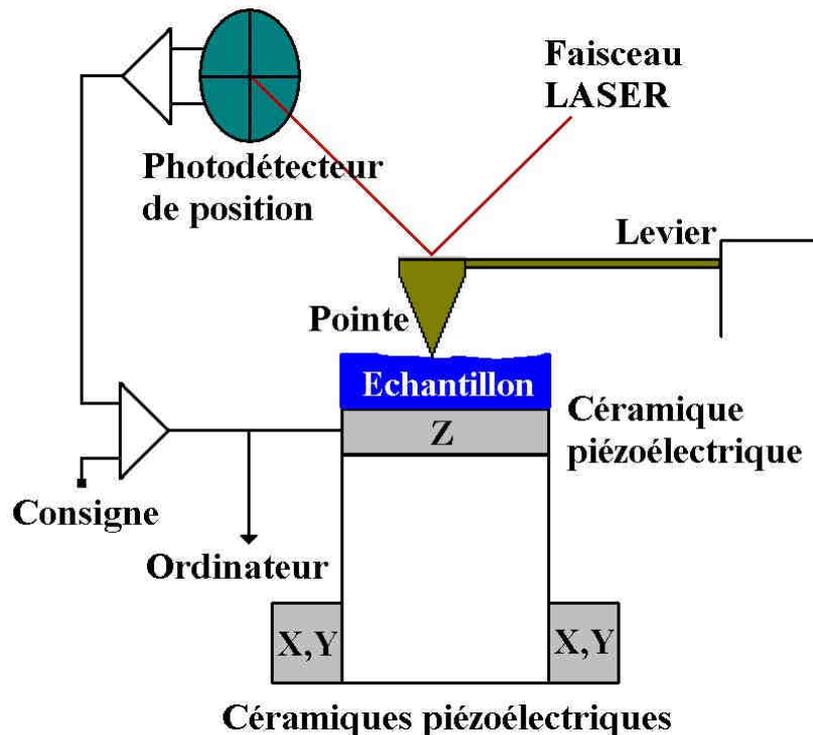
Han Huang, Wei Chen, Shi Chen and Andrew Thye Shen Wee ACS Nano 2 (2008) 2513

Microscopie à force atomique.

Scanning Force Microscopy SFM, Magnetic Force Microscopy MFM,
Dynamic Force Microscopy DFM, Lateral Force Microscopy LFM,
Atomic Force Microscopy AFM, Electrostatic Force Microscopy EFM

➤ **Principe** - G. Binnig, C.F. Quate, Ch. Gerber, *Phys. Rev. Lett.* **56**, 930, (1986).

Imager une surface via la mesure des forces d'interaction qui s'exercent entre les atomes d'une surface et ceux d'une pointe sonde.



Une pointe, fixée à l'extrémité libre d'un levier (cantilever) balaie (mouvements $X_{éch.}$, $Y_{éch.}$) une surface à courte distance.

Les interactions pointe - surface déforment le levier.

Ces déformations δz , mesurées par un capteur de déplacements ($F = k \cdot \delta z$), constituent le signal d'entrée d'une boucle d'asservissement.

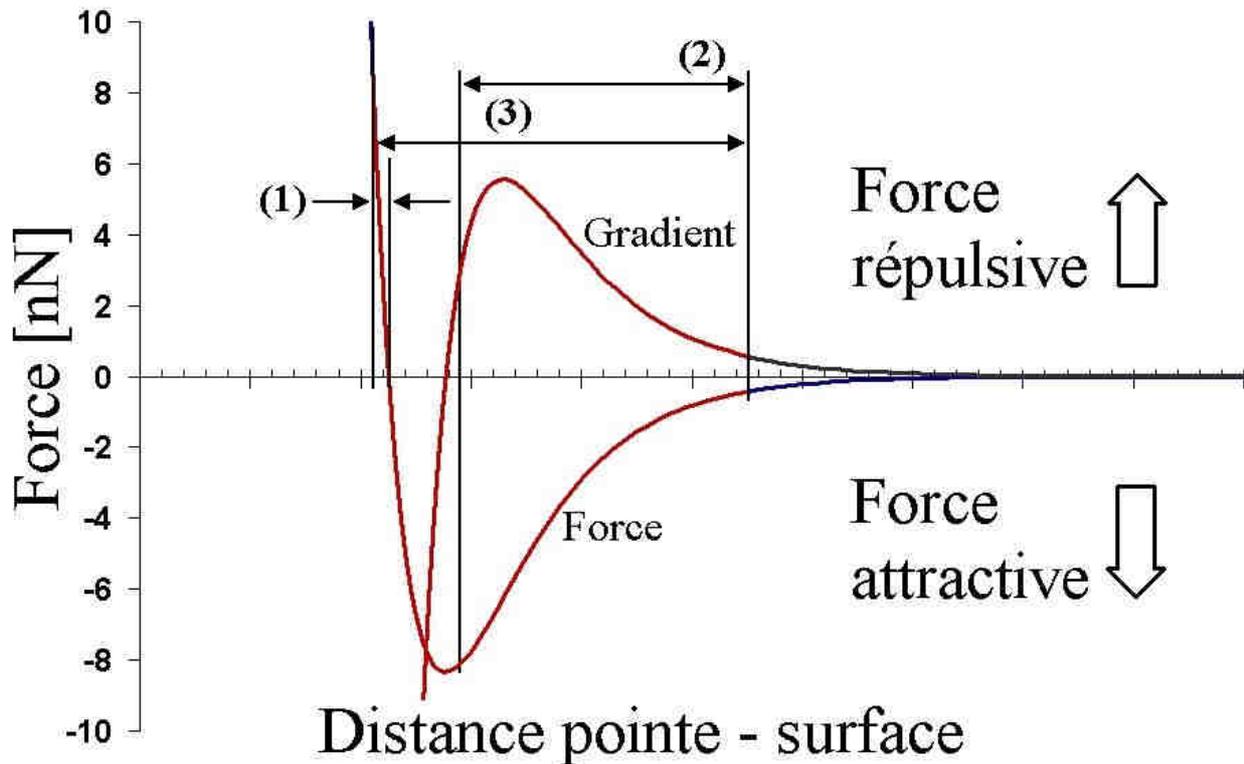
La régulation de la distance pointe surface (mouvement $Z_{éch.}$) donne accès au profil isoforce de la surface.

Dimensions pointe : $L = 2 \mu\text{m}$, $\varnothing = 100 \text{ \AA}$,

levier : $100 \leq L \leq 200 \mu\text{m}$, $10 \leq \ell \leq 40 \mu\text{m}$, $0.3 \leq e \leq 2 \mu\text{m}$,

Microscopie à force atomique.

➤ Modes de fonctionnement d'un microscope à force atomique.



Un microscope à force atomique opère suivant trois régimes de fonctionnement principaux, à savoir le **mode contact**, le **mode non contact** et le **mode de contact intermittent**.

(1) Le **mode contact** correspond à **des distances pointe - surface faibles** de l'ordre de quelques Å, pour lesquelles les **forces de contact sont répulsives (Forces de Born/Pauli)**,

(2) Le **mode non contact** correspond à **des distances pointe - surface importantes** de l'ordre de quelques Å à quelques 100 Å, pour lesquelles les **forces sont attractives (Van der Waals...)**,

(3) Le **mode contact intermittent (Tapping modeTM)** correspond à une combinaison des deux modes précédents.

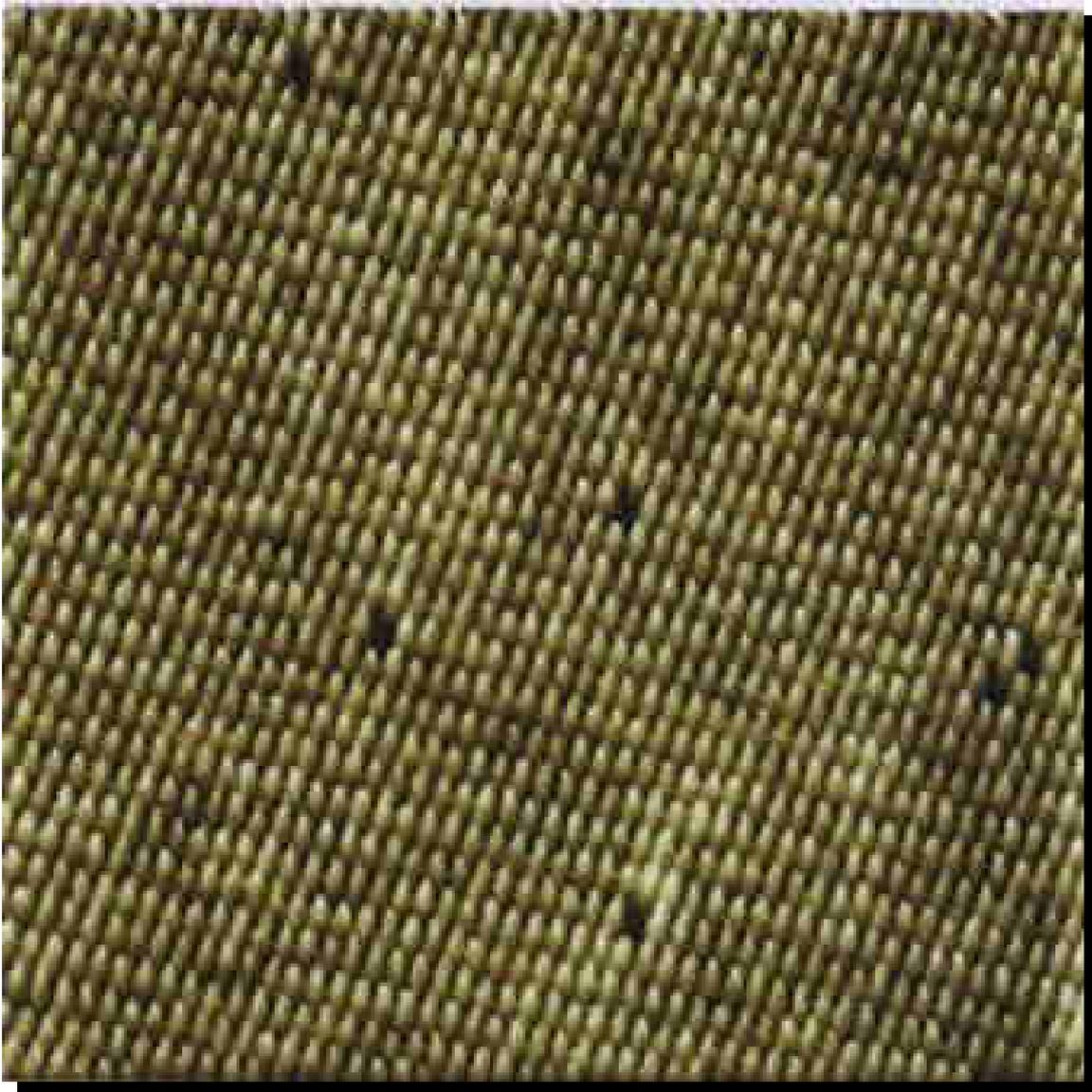
Microscopie à force atomique.

➤ Applications.

Étude, par imagerie directe, de structures de surface d'échantillons conducteurs, semi-conducteurs et *isolants*.

Résolution verticale $\approx 0.1 \text{ \AA}$,

Résolution latérale $\approx 10 \text{ \AA}$ en *mode contact - R^{tn} -atomique*,
 $\approx 1 \text{ \AA}$ en *mode vibrant - R^{tn} atomique*.



Surface InAs(110) imagée par AFM en mode vibrant. Plan terminé As, présence de défauts ponctuels, image 20 nm x 20 nm. W. Allers, A. Schwarz, U.D. Schwarz, R. Wiesendanger, Institute of Applied Physics, University of Hamburg, Allemagne.

Microscopie à effet tunnel.

- **Principe - Effet tunnel**, mécanique quantique $\Delta E \Delta t \sim \hbar$ - G. Binnig, H. Rohrer, *Helv. Phys. Acta* **55**, (1982) 726.
- **Principe - Mise en œuvre de la microscopie tunnel.**
- **Principe - Intensité du courant tunnel - Interprétation des images.**
- **Applications.**

Microscopie à force atomique.

- **Principe** - G. Binnig, C.F. Quate, Ch. Gerber, *Phys. Rev. Lett.* **56**, 930, (1986).
- **Modes de fonctionnement d'un microscope à force atomique.**
- **Applications.**