Micromanipulation et microadhésion : problématiques et solutions

Jérôme Dejeu and Michaël Gauthier

FEMTO-ST

Département AS2M

jerome.dejeu@femto-st.fr

michael.gauthier@femto-st.fr

femto-st
sciences & technologies

INSTITUT CARNOT
FEMTO-Innovation

Enjeux de la micromanipulation

Définition de la micromanipulation

Etude de la manipulation des objets d'une taille caractéristique entre 1µm et 1mm.

1µm — 10µm — 100µm — 1mm

Microfabrication

Fabrication mécanique

Microscopie électronique

Microscopie optique

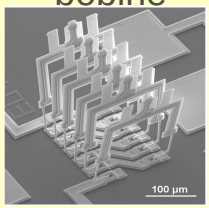
Prédominance des effets de surface

Pas d'objets industriels

en dessous de 100 micromètres (en 2005…)

1 mm — 100 µm — 10 µm — 1 µm

bobine

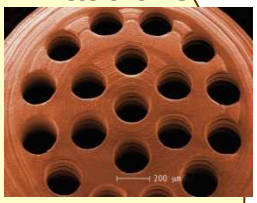


130 µm

engrenage

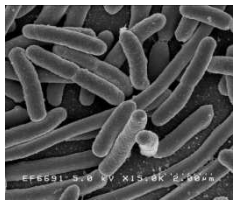
800 µm

prothèse auditive



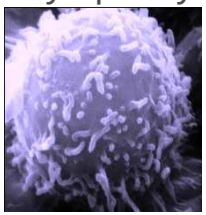
1 mm

bactérie



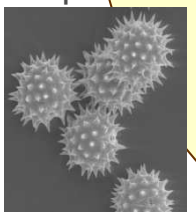
2-6 µm

lymphocyte



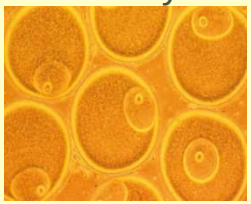
6-15 µm

pollen



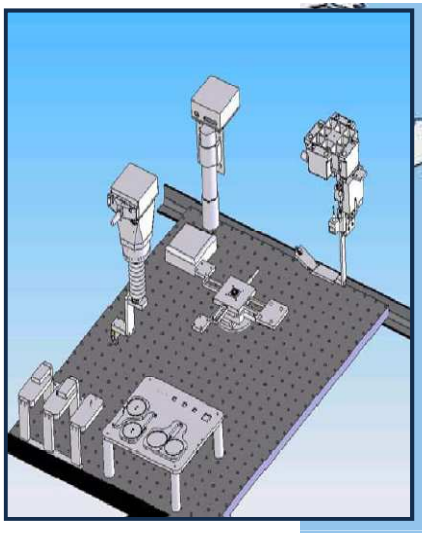
20-40 µm

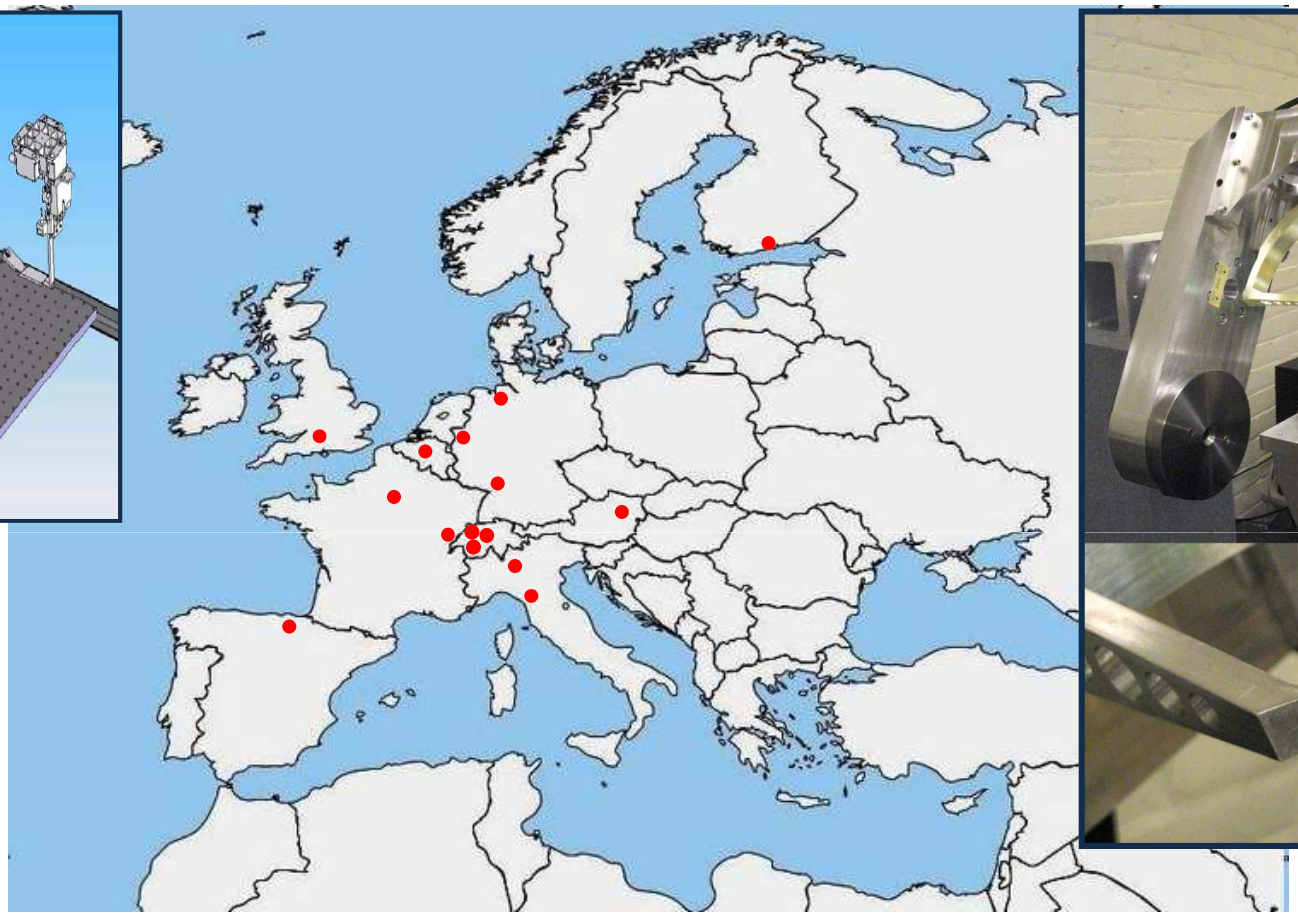
ovocyte

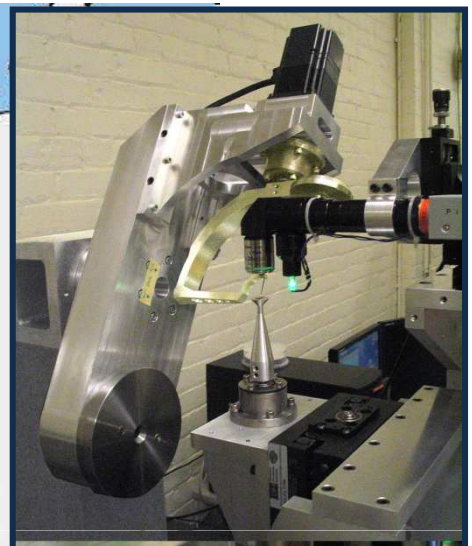


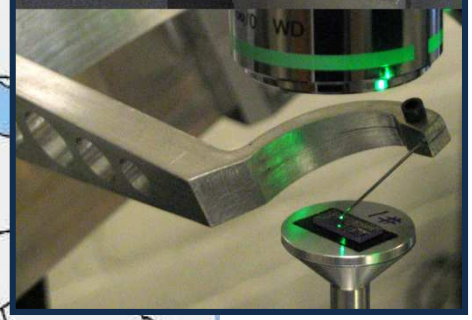
200 µm

Compétition internationale









+ USA (CMU, U. Arlington, …) + Japon (Nagoya, Tsukuba, …) + Canada (Toronto, Victoria)

Cellules robotisées pour les échelles « micro » encore loin des performances des cellules robotisées pour l'échelle « macro ».

Domaines applicatifs et scientifiques

- **Micro-assemblage** **(réduction globale de la taille des produits, intégration de nouvelles fonctionnalités)**

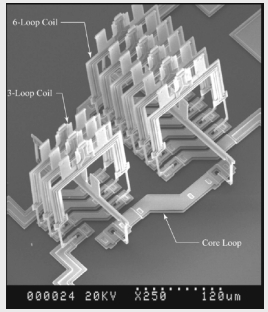
Micromécanismes

Microconnecteurs,
microroulement, etc.

(horlogerie, Medtech, etc.)

Microsystèmes

Hybridation technologique,
MEMS 3D,
fonctionnalités hors plan

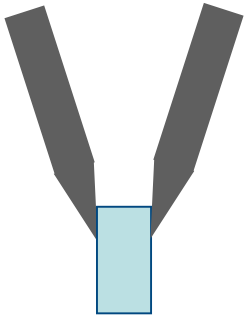


Du fait de la flexibilité requise pour la production, l'approche robotique est nécessaire.

- **Problématiques scientifiques**

Compréhension et modélisation des forces d'adhésion

Méthodes de préhension adaptées aux micro-objets



Mesure des forces de micropréhension

Mesure de la position des micro-objets : microvision

Robotique, Automatique

Modélisation, compréhension

- **Etude analytique des forces perturbatrices**

$$F_{hydro} = 6\pi.r.\mu.V$$

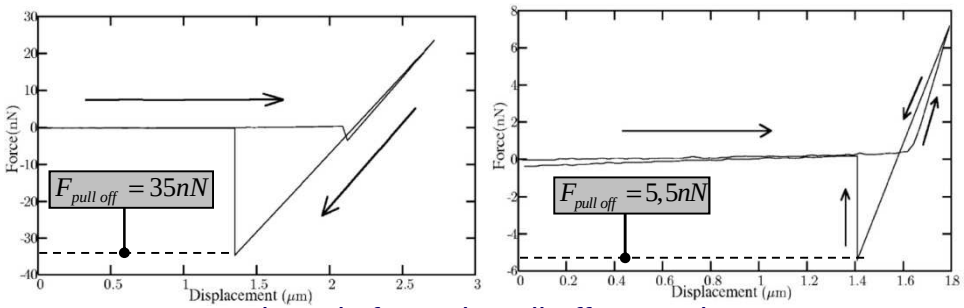
$$F_{vdw} = \frac{Ar}{6\delta^2}$$

$$F_{pull-off} = 2\pi r W_{12}$$

$$F_{elec} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon}\int\frac{Q_1 Q_2}{d\,(Q_1, Q_2)^2}$$

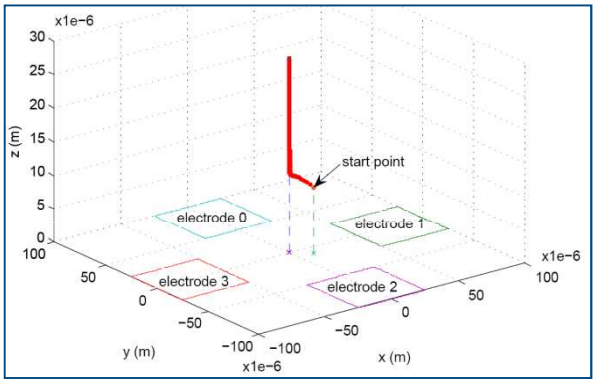
$$F_{DLVO} = \frac{2\pi\varepsilon}{1-e^{-2\kappa z}} G_D(\pm(\psi_{s1}^2+\psi_{s2}^2)e^{-2\kappa z} + 2\psi_{s1}\psi_{s2}e^{-\kappa z}$$

- **Mesures expérimentales**



Mesures comparatives de force de pull-off entre air et eau

- **Simulateur de trajectoire**

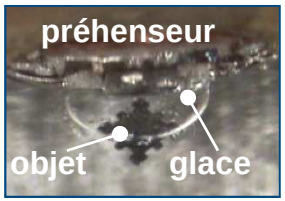


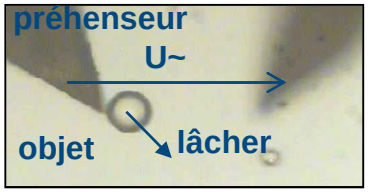
Trajectoire d'un micro-objet dans un champ électrique

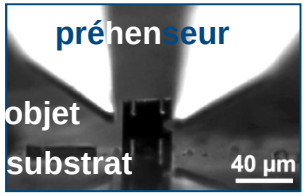
- **Analyse de l'impact du milieu**
  - Réduction des forces d'adhésion dans un liquide
  - Limitation de la vitesse maximale dans un liquide

Création de connaissances et de méthodes sur l'impact du liquide

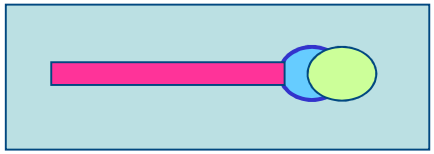
Micropréhension



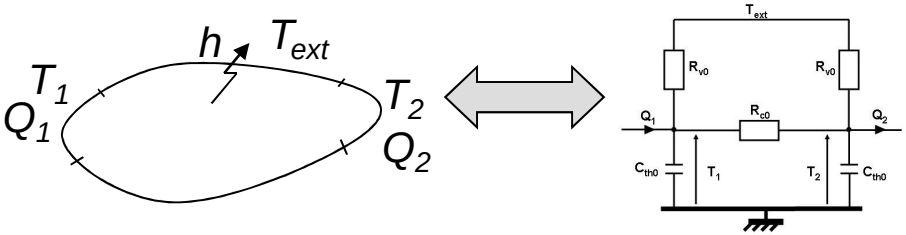




- **4 stratégies étudiées :**
  - **Préhension par glace**
  - **Préhension à deux doigts et lâcher par diélectrophorèse**
  - **Préhension à deux doigts et lâcher par substrat adhérant**
  - **Préhension à deux doigts avec fonctionnalisation chimique**
- **Préhension par glace :**
  - **Principe**



  - **Proposition de modèles thermiques**

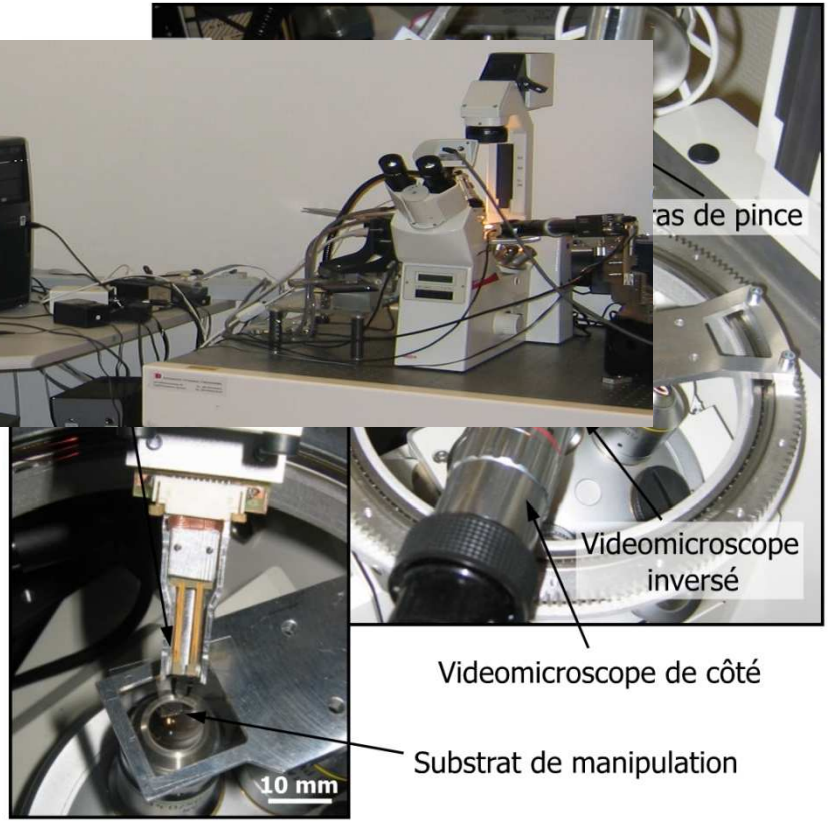


  - **Construction d'un modèle du démonstrateur**
  - **Démonstration du principe**

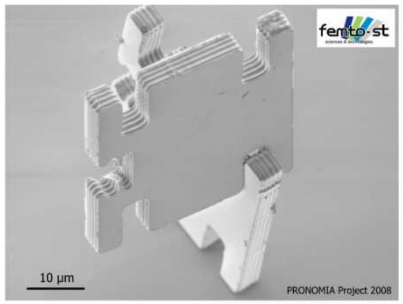
Création, étude et validation de nouveaux principes de préhension

- **Mettre un film de collage de bille**

Plateformes de micromanipulation



temps x5



Démonstration de micro-assemblages téléopérés d'objets de 40 micromètres

Perspectives scientifiques

- Etude de la micromanipulation

- poursuite de la modélisation du µmonde **:**

  géométries plus complexes

- poursuite de la miniaturisation **:**

  verrou "10 µm"

- augmentation des fonctionnalités **:**

  microproduit : solidarisation, connectique

Instrumentation

Fonctionnalisation de surface

Vers l'exploration d'objets plus petits

Vers des microproduits plus complexes

Micromanipulation et microadhésion : problématiques et solutions

Jérôme Dejeu and Michaël Gauthier

FEMTO-ST

Département AS2M

jerome.dejeu@femto-st.fr

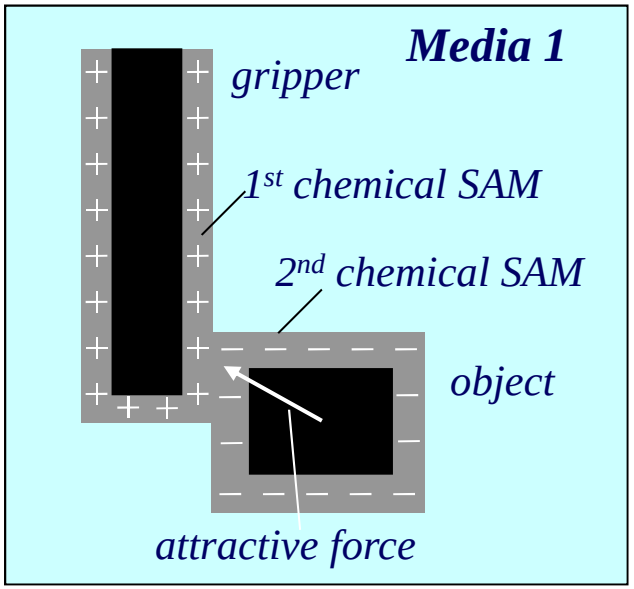
michael.gauthier@femto-st.fr

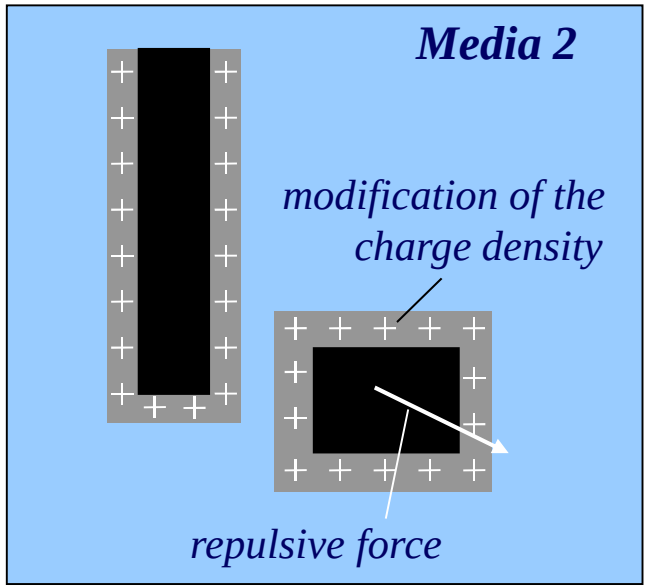
femto-st
sciences & technologies

INSTITUT CARNOT
FEMTO-Innovation

Objectifs

- Modification des forces d'approche (pull-in) et d'adhésion (pull-off) par modification du milieu :
  - sec - liquide
  - pH de la solution
  - Temperature





Objectifs

- Modification des forces d'approche (pull-in) et d'adhésion (pull-off) par modification du milieu :
  - sec - liquide
  - pH de la solution
  - Temperature

- Functionnalisation de surface (préhenseur et/ou micro-object)
  - Adsorption (interaction électrostatiques)
    - Polymèrss
  - Greffage (laisons covalentes)
    - Silanes

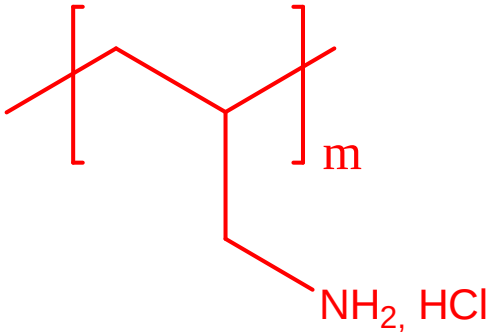
Composés Chimiques

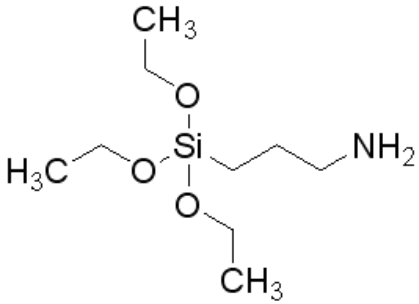
Surface

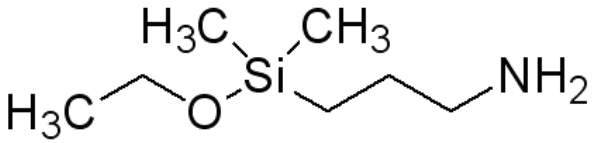
- Silicium ou silice

Composés chimiques

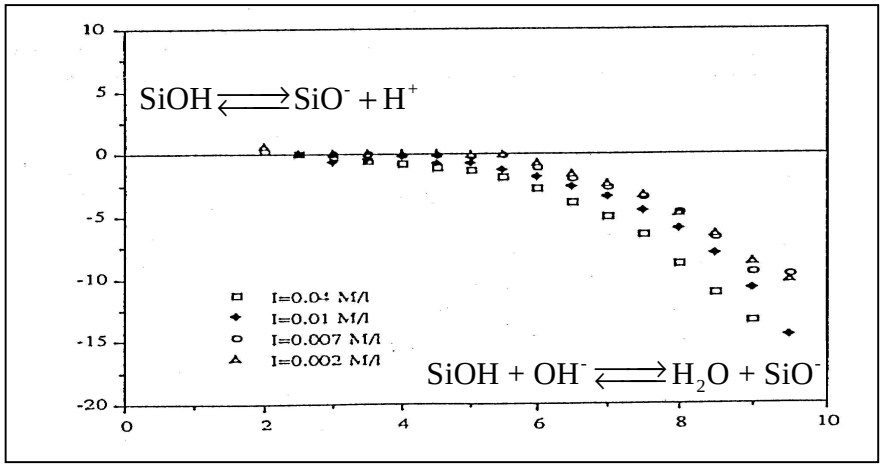
- Poly(Allylamine Hydrochloride) : PAH
- AminoPropylTriEthoxy Silane : APTES
- AminoPropylDiMethylethoxy Silane : APDMES







Charge

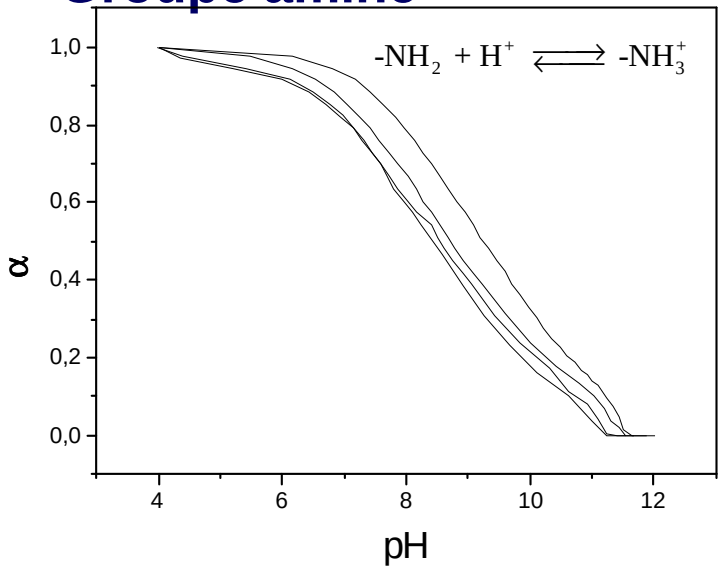


Surface

- **Silice ou silicium**

Composés chimiques

- **Groupe amine**

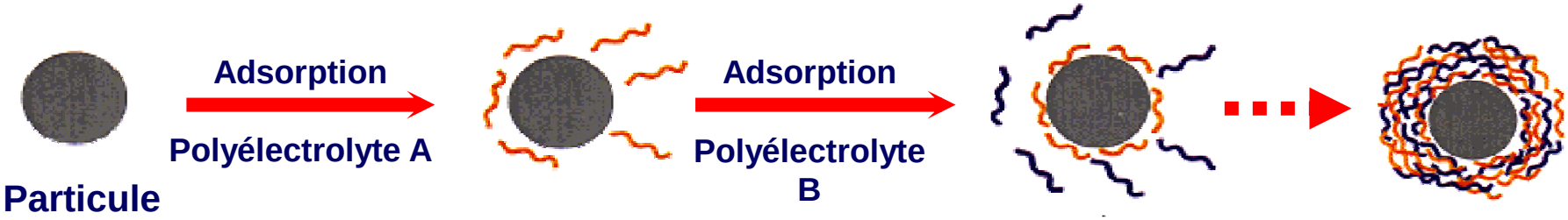


	Function Amine	groupes hydroxyl de la silice
pH acide	NH_3^+	Si(OH)
pH basique	NH_2	SiO^-

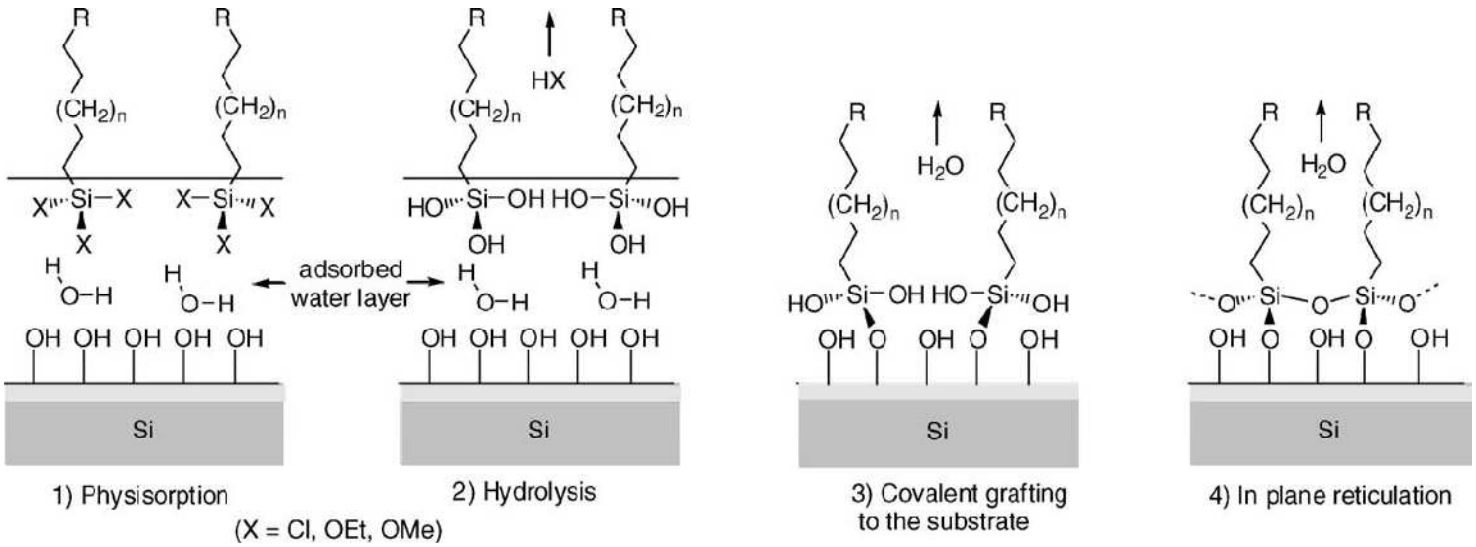
protonation

Fonctionnalisation chimique

Adsorption



Greffage de silane



Mesures Force-Distance

AFM : Microscope SNEMA

Poutre avec bille de borosilicate collé à l'extrémité, constante de raideur 0.3N/m

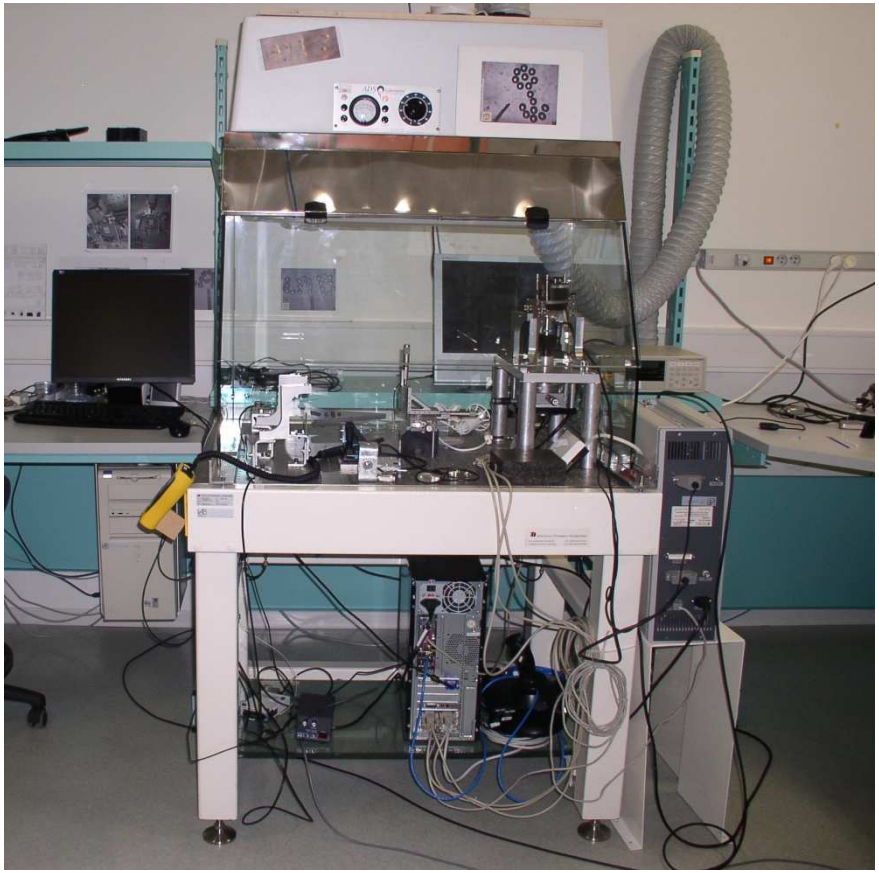
Vitesse d'approche 200 nm/s

Humidité 30%

9 mesures par échantillons

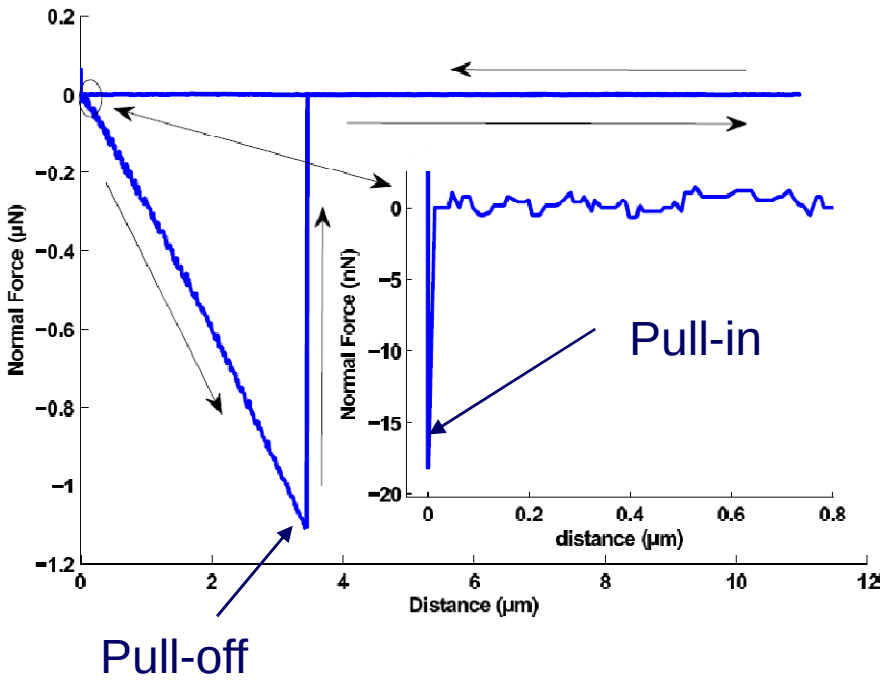
Ecart inférieur à 10%

Mesure en milieu liquide ou sec

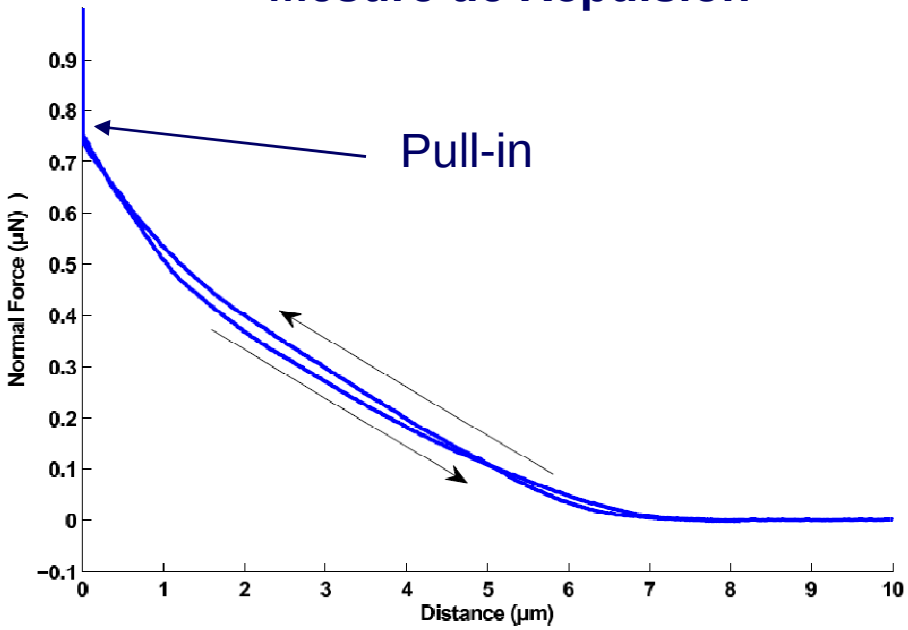


Coube typique distance-forces

Mesure d'attraction



Mesure de Repulsion



Pull-in négatif

Pull-off négative

pull-in positive

pull-off négative ou absence de pull-off

Système de micromanipulation

Pronomia Station

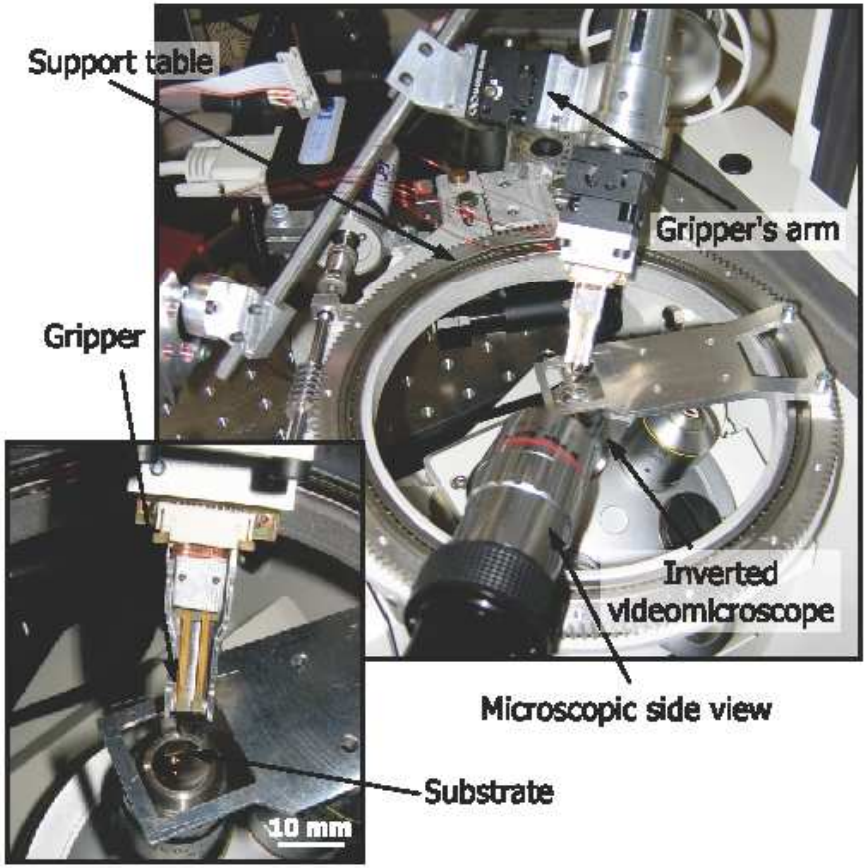
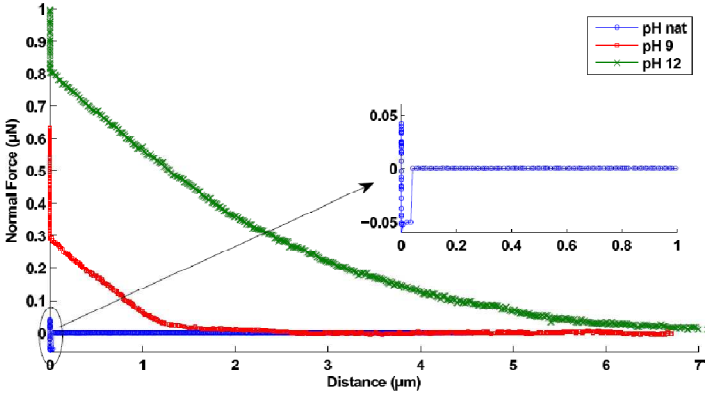
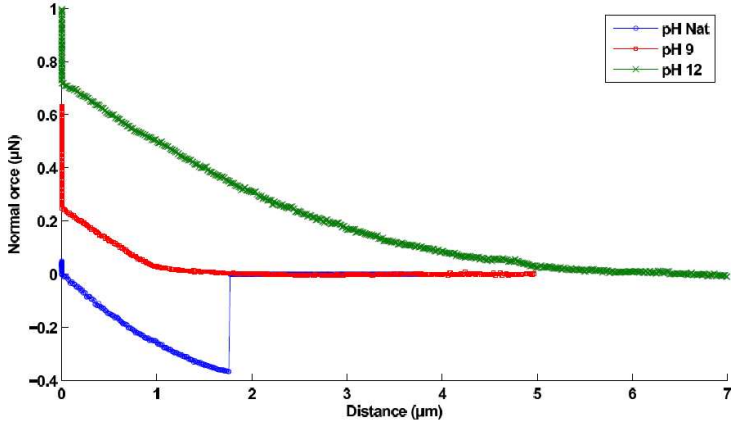


Table horizontal : 3 DOF
Bras du Gripper : 5 DOF
Microgripper : 4 DOF
Microscope inversé : LEICA DM-IRBE

Propriétés modifiables

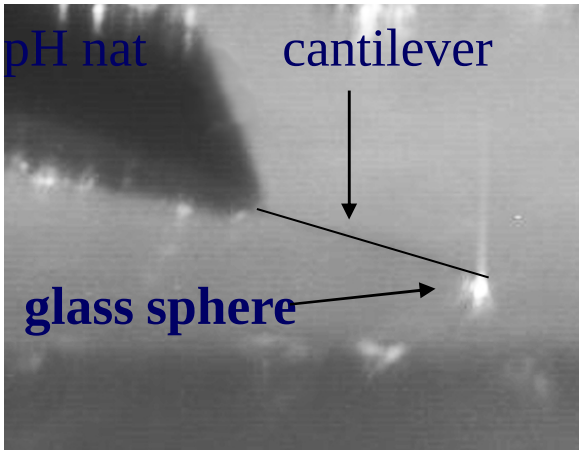
Substrat silice-APTES, poutre non fonctionnalisée



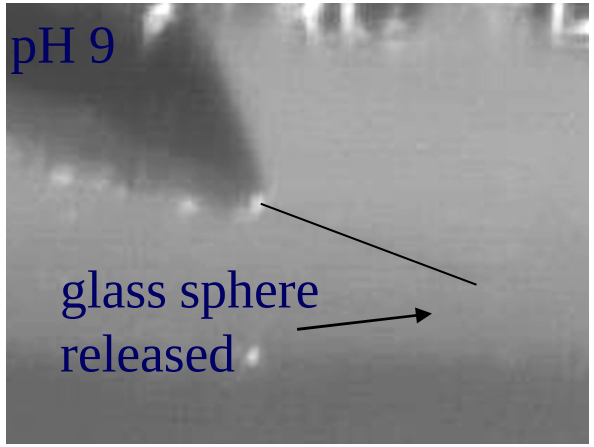


Modification du pull-in (de attractive à repulsive) par augmentation du pH
Modification du pull-off (de adhésif à non adhésif) par augmentation du pH

Attraper

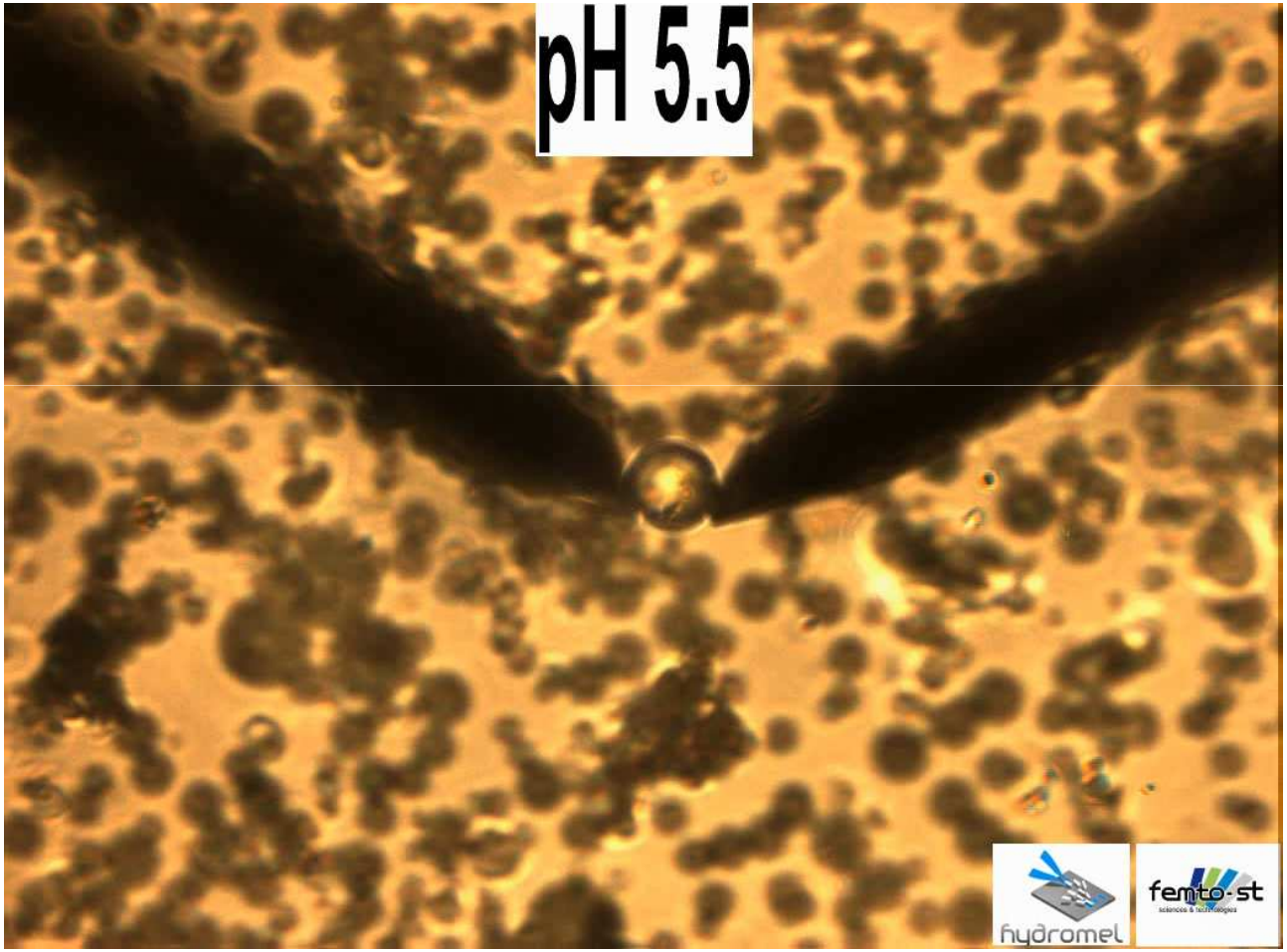


Lacher



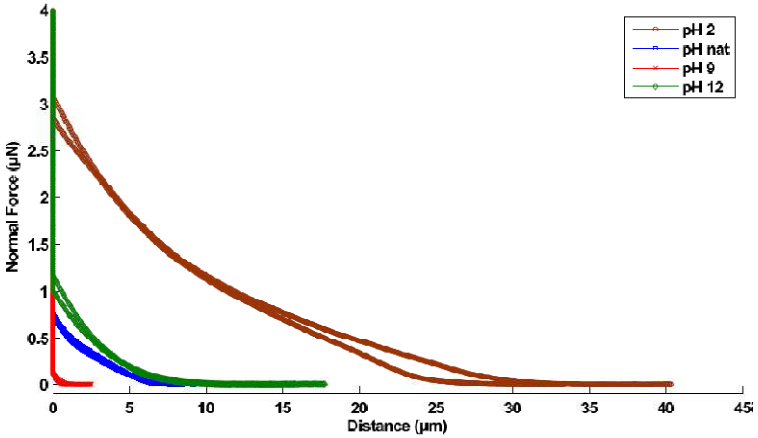
J. Dejeu et al., ACS Applied Materials & Interfaces, 2009, 1(9), 1966

Micromanipulation



Repulsion et pas adhesion

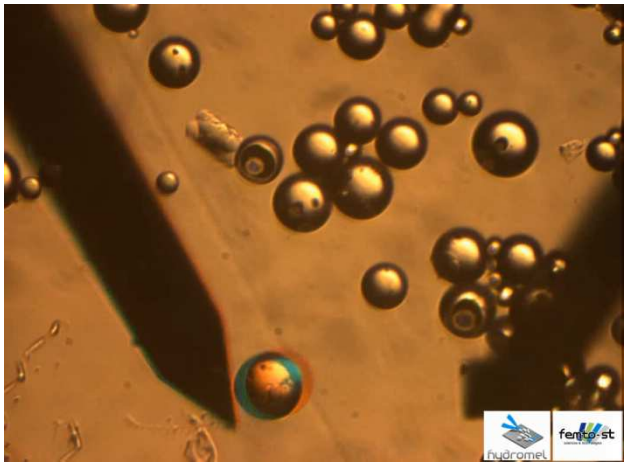
Surface et levier fonctionnalisés

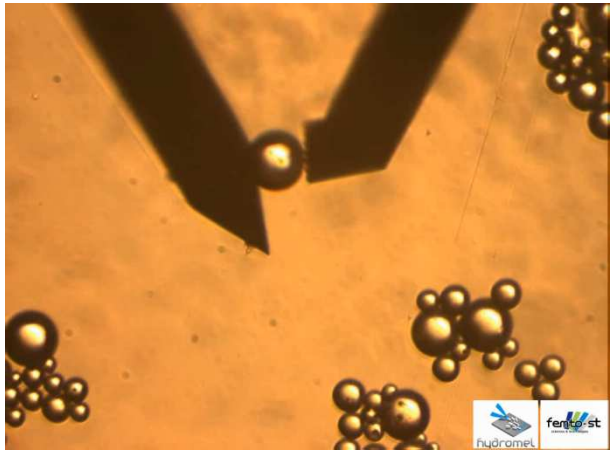


Pas de force adhesion

Toujours force repulsive

Grande distance d'interaction





Densité de Charges de Surface

Substrat considéré comme une surface infinie

$$\vec{E_1} = \frac{\sigma_1}{2\epsilon_3\epsilon_0}\vec{n_1}$$

σ_1 charge density of the substrate
ε_1 electric permittivity of the vacuum
ε_2 electric permittivity of the medium (80 for water)
$\vec{n_1}$ unit vector perpendicular to the substrate

Force électrostatique répulsive appliqué par la charge q_2 de l'object est :

$$\vec{F}_{pull-in} = q_2.\vec{E}_1 = 2\pi r_2^2 \frac{\sigma_1\sigma_2}{\epsilon_3\epsilon_0}\vec{n_1}$$

Même functionnalisation induit même charge

$$|\sigma_1| = \left(F_{pull-in\,1-1}\frac{\epsilon_3\epsilon_0}{2\pi r_2^2}\right)^{\frac{1}{2}}$$

APTES sur levier et APDMES sur le substrat

$$\sigma_2 = \frac{F_{pull-in\,1-2}}{\sigma_1}\frac{\epsilon_3\epsilon_0}{2\pi r_2^2}$$

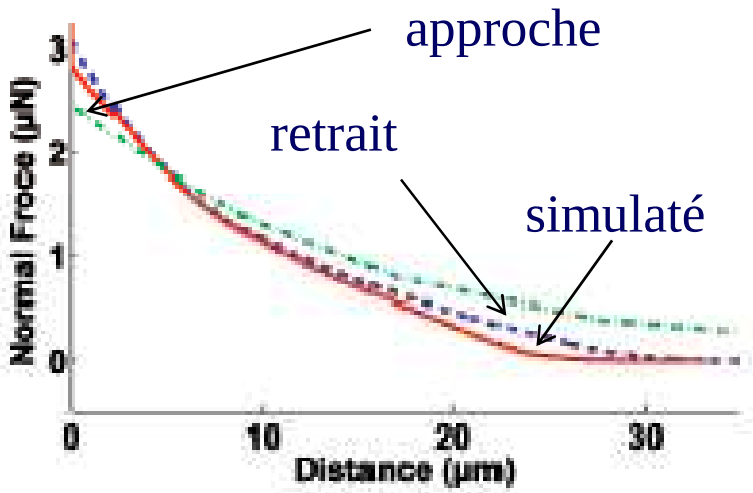
	APTES	APDMES
pH	σ_1 $(\mu C/cm^2)$	σ_2 $(\mu C/cm^2)$
pH 2	+0,38	+0,36
pH nat	+0,17	+0,19
pH 9	-0,08	-0,06
pH 12	-0,21	-0,21

Proche des charges de double couches

Interaction distance modelling

Modèle de force de Coulomb en élément fini :

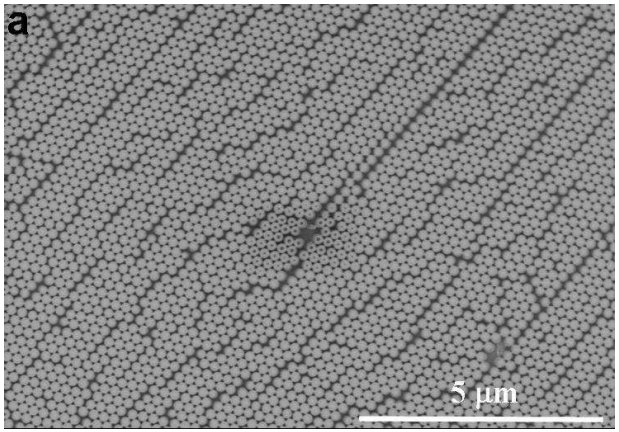
- **Surface finie et une sphère avec une charge σ_1**
- **COMSOL Multiphysics 3.5.**

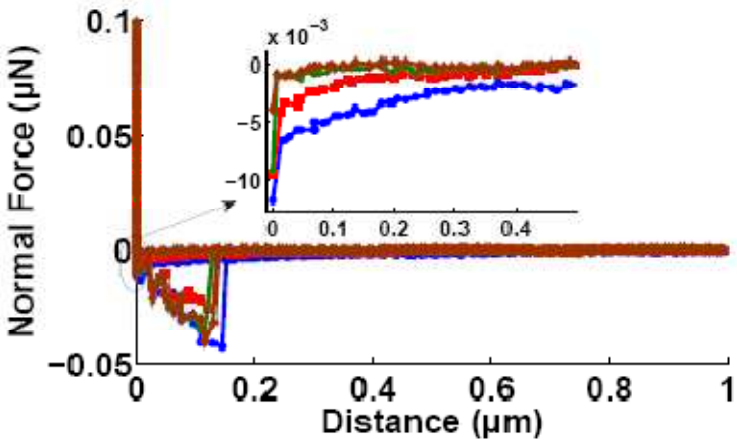


Modèle avec forces de Coulombs entre surfaces chargées expliquent :

- ✓La longue distance d'intéraction
- ✓La valeur de la force

Structuration de surface



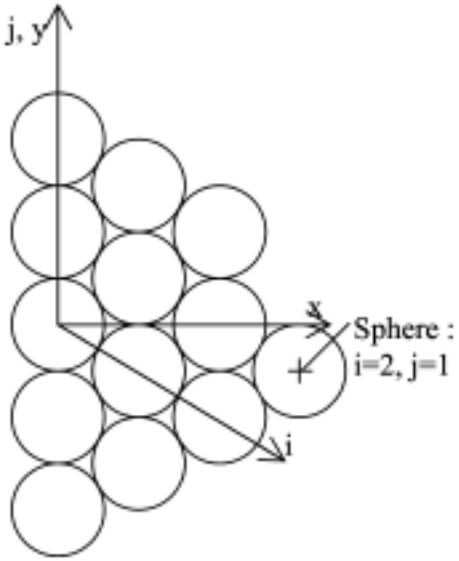


Force modélisée par la force de Van der Waal

$$\|\vec{F}_{ij}\| = \frac{Ar_{12}}{6z_{ij}^2}$$

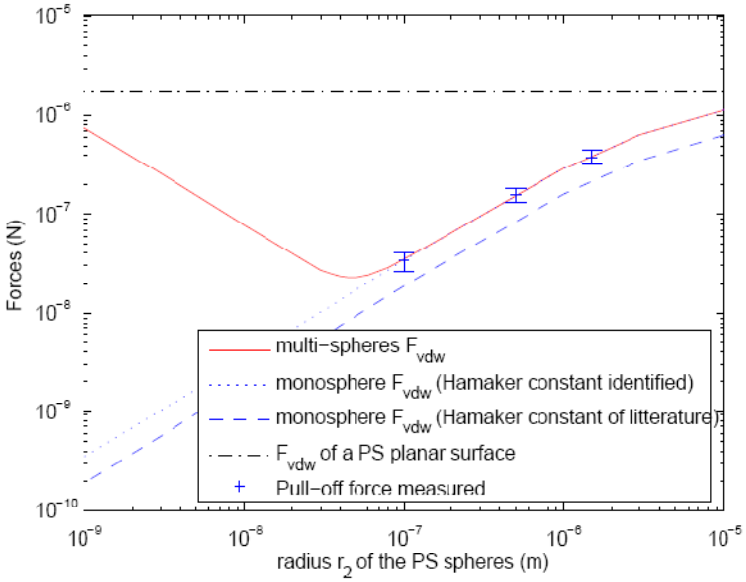
Z_{ij} obtenue à l'aide d'intéraction entre plusieurs sphères

$$z_{ij} = \sqrt{(r_2 + z_0 + r_1)^2 + 4r_2^2(j^2 - ij + i^2)} - r_1 - r_2$$



J. Dejeu et al., accepted in ACS Applied Material & Interface

Modélisation



A_{th} = 72 zJ

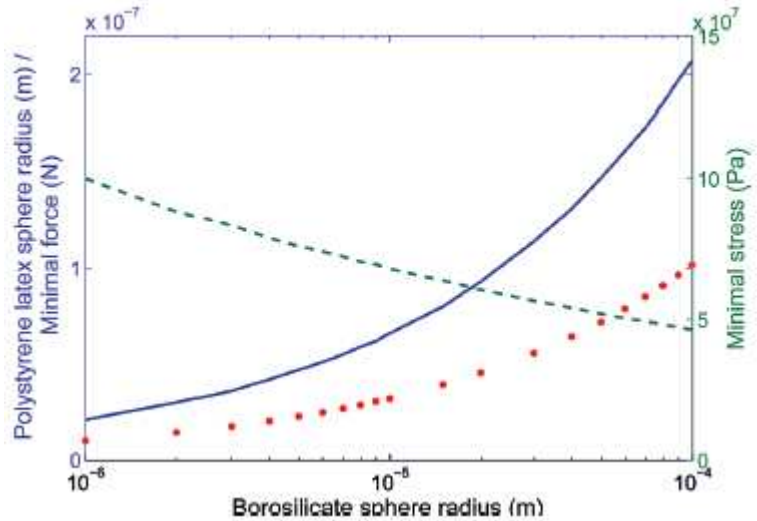
A_{id} = 121 zJ

30 % d'erreur

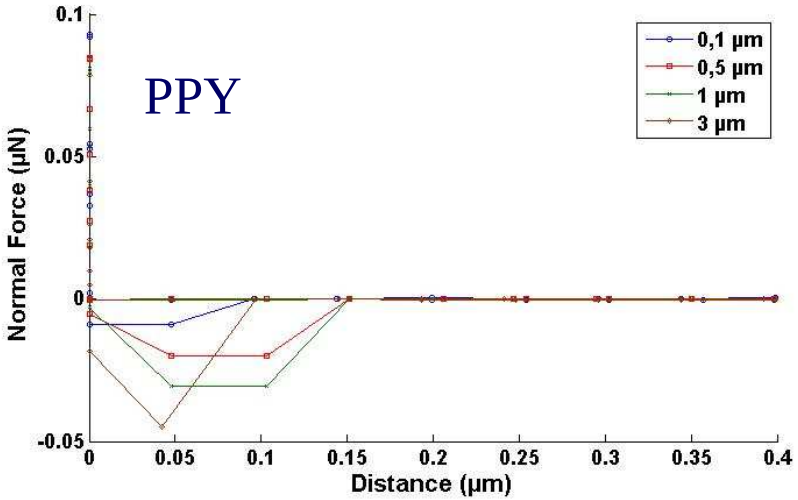
Présence d 'un minimum

Minimum fonction du diamètre de la bille collée sur le levier.

Démontrer cela par l'expérience

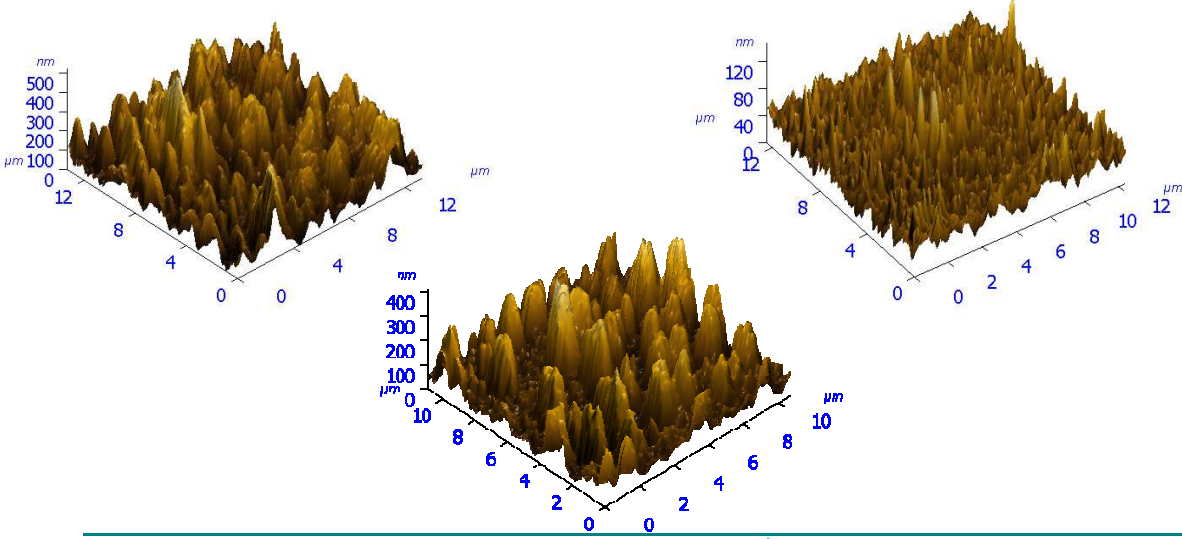


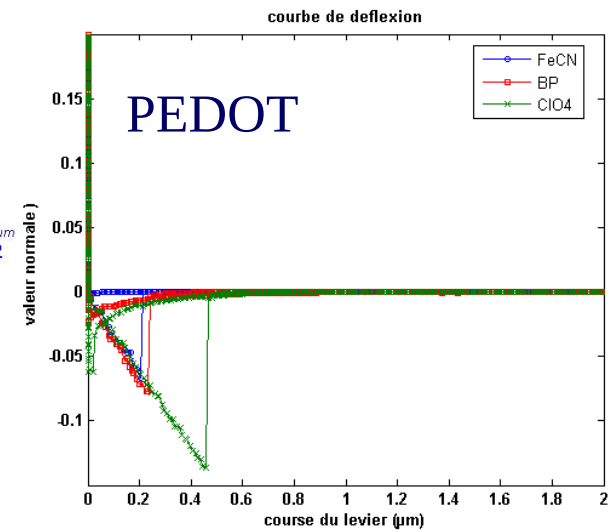
Electrodéposition : ppy et PEDOT



J. Dejet, B. Lakard et al., soumis à Thin Solid Film

PPy thickness	Without US	With US
3 µm	32 nN	41 nN
1 µm	34 nN	36 nN
0,5 µm	37 nN	18 nN
0,3 µm	41 nN	16 nN
0,1 µm	44 nN	12 nN
Uncoated Si	1 µN	





Electrodéposition : PANi et PPD

Conclusions

Fonctionnalisation change les propriétés d'adhésion

Modification du pull-off and du pull-in par modification du pH

Micro-assemblage facilité par un choix judicieux de la fonctionnalisation et du pH utilisé pour controler le relarguage de micro-objects

Electrodéposition et structuration diminue fortement le pull-off

Travaux futurs

- Tâche de micromanipulation avec des doigts functionnalisés
- Fonctionnalisation d'autres surfaces (or, tungstène, carbone, ...)
- Validation du modèle de structuration avec d'autres tailles de billes PS
- Solidarisation de micro-objects
- Collaboration industrielles

Remerciements

FEMTO-ST :

B. Lopez Walle, M. Kharboutly, D. Hériban, P. Rougeot, G. Fortier, B. Tamadazte, N. Piat, S. Dembele, J. Agnus, W. Boireau, N. Chaillet.

UTINAM

B. Lakard, S. Lakard

EMPA

M. Bechelany

ULB :

C. Lenders, P. Lambert

ISIR :

S. Alvo, S. Régnier.