Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique

Modélisation et simulation du comportement des micro-objets

Sébastien Alvo, doctorant (2ème année) ISIR/Femto-st

Stéphane Régnier, ISIR (UPMC, Paris)
Michaël Gauthier, département AS2M de FEMTO-ST (UFC, Besançon)

Sommaire

I. Présentation générale
   1. Contexte: la micromanipulation
   2. Problématique
   3. Objectifs de mes travaux

II. Étude analytique: Adhésion et forces de van der Waals
   1. Effet d'échelle et modèle de force
   2. Modèle itératif
   3. Comparaison aux modèles existants

III. Étude expérimentale: Mesure de force de pull off
   1. Expérience et setup expérimental
   2. Problèmes rencontrés et premières hypothèses
   3. Premiers résultats

Contexte: micromanipulation

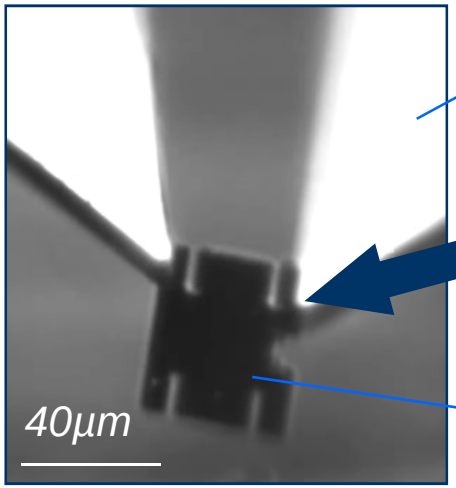
- Objectif: manipulation d'objets de taille microscopique
  - Manipulation: prise, déplacement, dépose
  - Objet: solide de taille caractéristique 100nm 100µm

- Enjeux:
  - Manipulation d'objets biologiques
  - Caractérisation physique d'objets
  - Micro-assemblage

Problématique

Comportement des micro-objets difficile à appréhender à l'échelle microscopique:

- Besoin d'outils de simulation pour développer des nouvelles stratégies de micro-assemblage
- Manque de modèles de forces d'interaction entre micro-objets pour la micromanipulation



Micropréhenseur

Nécessité de connaitre les interactions

Micro-objets

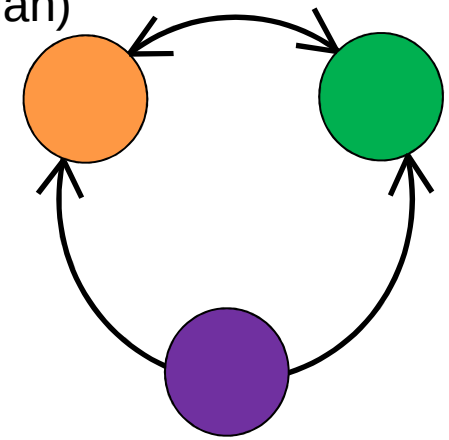
Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique

Objectifs de mes travaux

- Objets de 100nm à 100µm
- Étude de l'adhésion dans le cadre de la micromanipulation
  - Quantification de la force d'adhésion au contact = pull off

Modèle analytique
Géométries simples
(sphère/plan)

Modèle numérique (Matlab, éléments finis …)
→ Tester les hypothèses du modèle analytique
→ Problème à géométrie complexe



Validation expérimentale

Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique

Sommaire

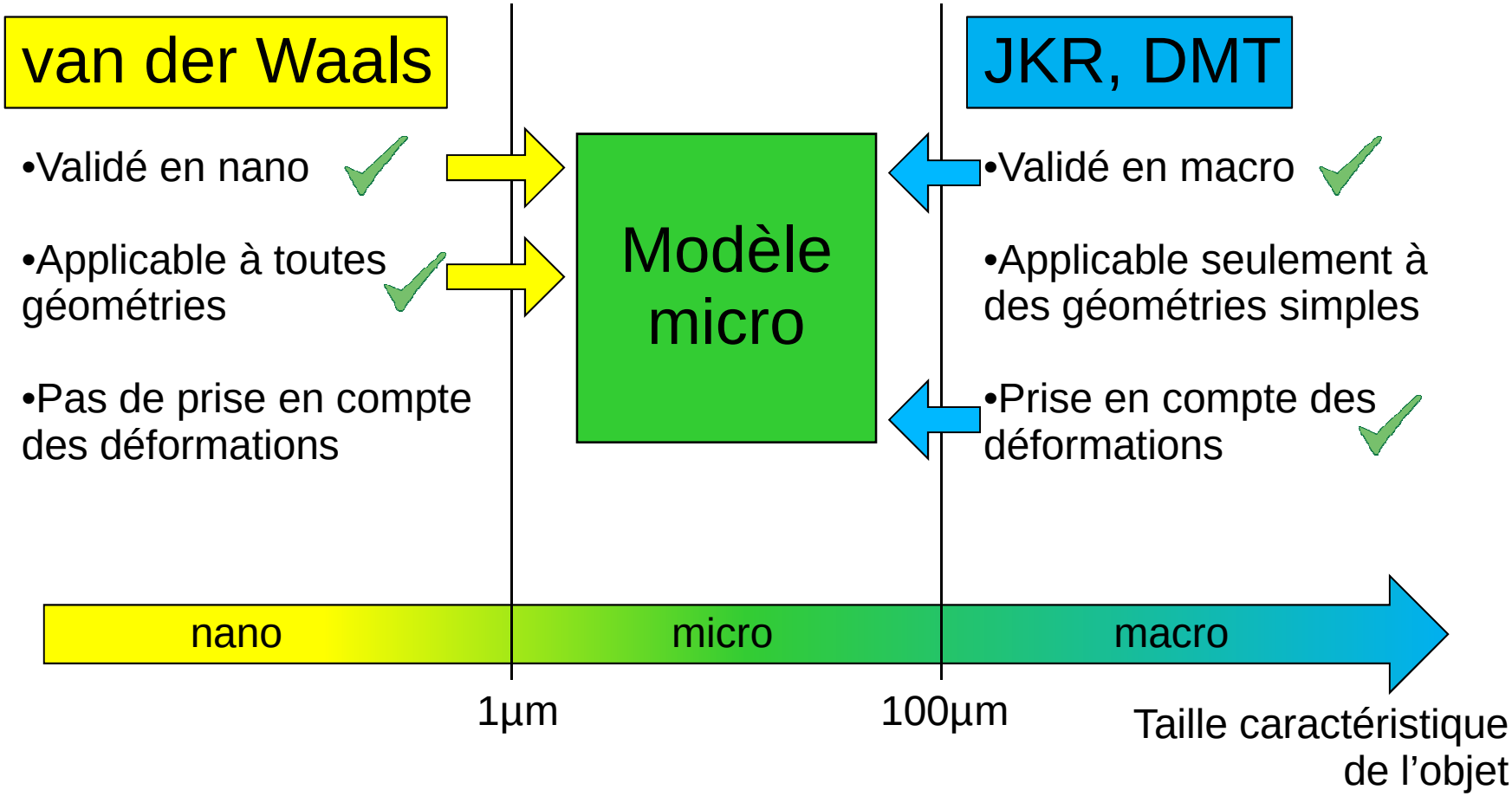
I. Présentation générale
1. Contexte: la micromanipulation
2. Problématique
3. Objectifs de mes travaux

II. Étude analytique: Adhésion et forces de van der Waals
1. Effet d'échelle et modèle de force
2. Modèle itératif
3. Comparaison aux modèles existants

III. Étude expérimentale: Mesure de force de pull off
1. Expérience et setup expérimental
2. Problèmes rencontrés et premières hypothèses
3. Premiers résultats

Effet d'échelle et modèles de forces

Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique

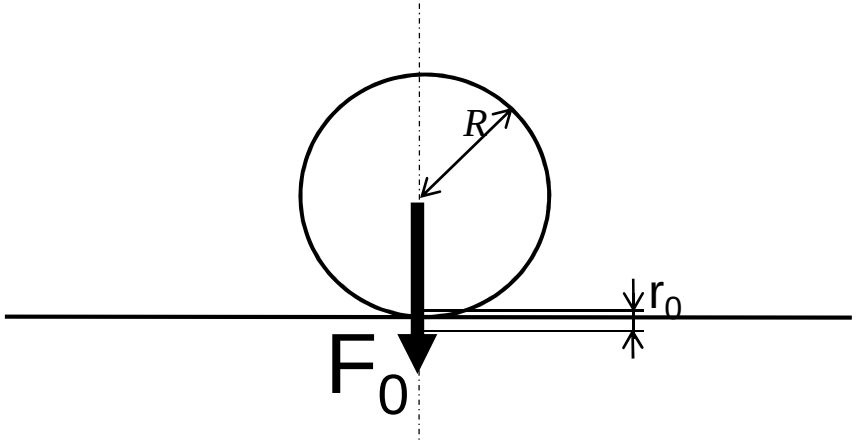


Modèle itératif

Géométrie

↓

van der Waals



$$F_0 = -\frac{AR}{6r_0^2}$$ (vdW Sphère/plan)

A: coefficient d'Hamaker
r_0: distance d'équilibre au contact

Modèle itératif

Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique

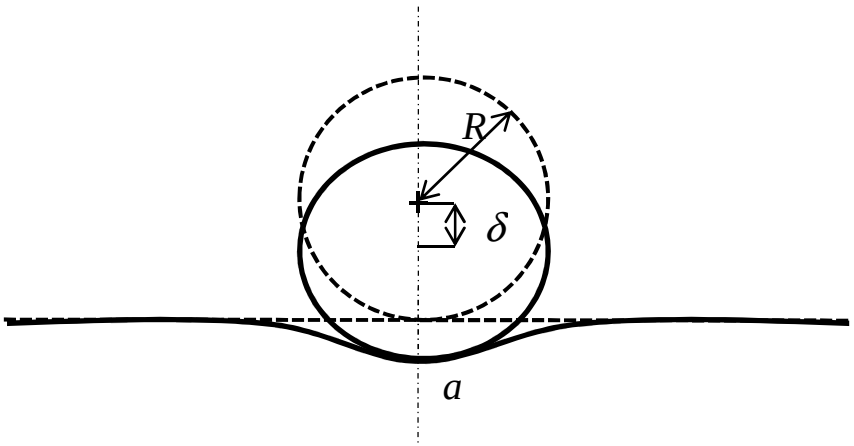
Géométrie

↓

van der Waals

↓ F_0

Déformation

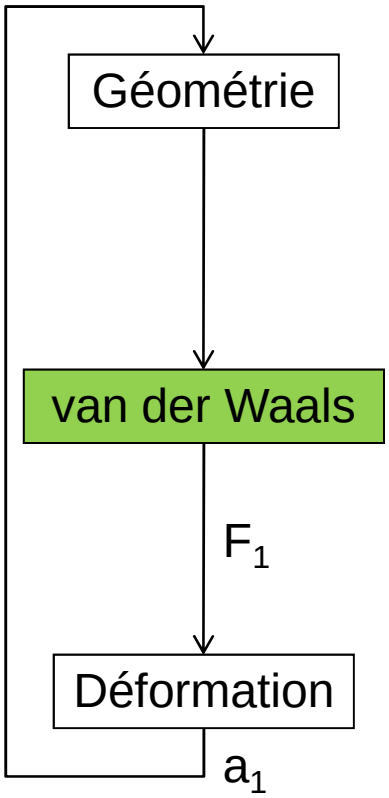


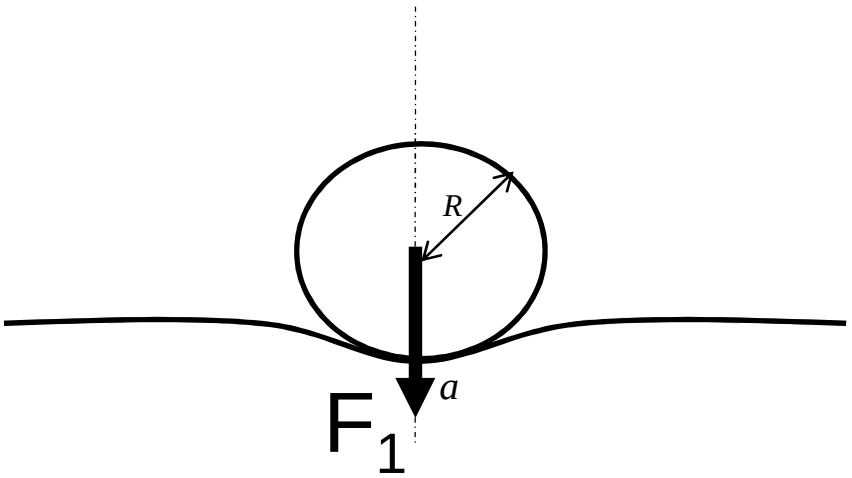
$$F_0 = -\frac{AR}{6r_0^2}$$ (vdW Sphère/plan)

$$a_1 = \left(\frac{AR^2}{8E^* r_0^2}\right)^{1/3}$$ (Hertz)

Modèle itératif

Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique



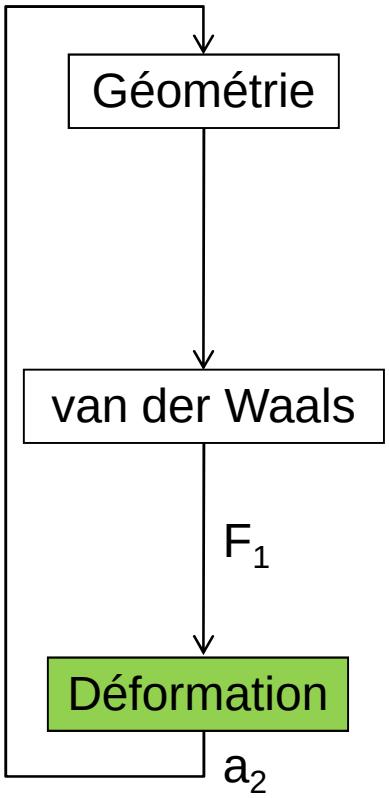


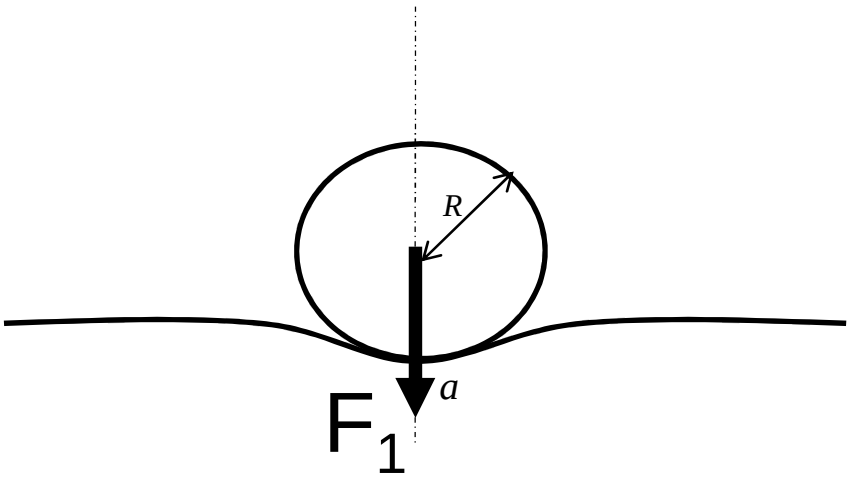
$$F_1 = F_0 - \frac{A a_1^2}{3 r_0^3} < F_0$$

$$a_1 = \left(\frac{A R^2}{8 E^* r_0^2} \right)^{1/3}$$ (Hertz)

Modèle itératif

Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique



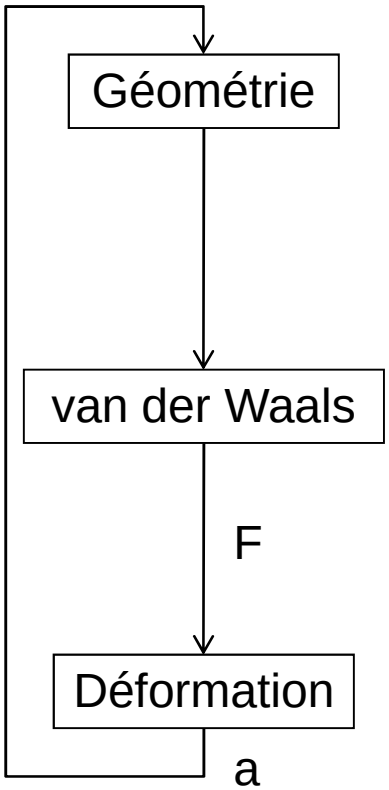


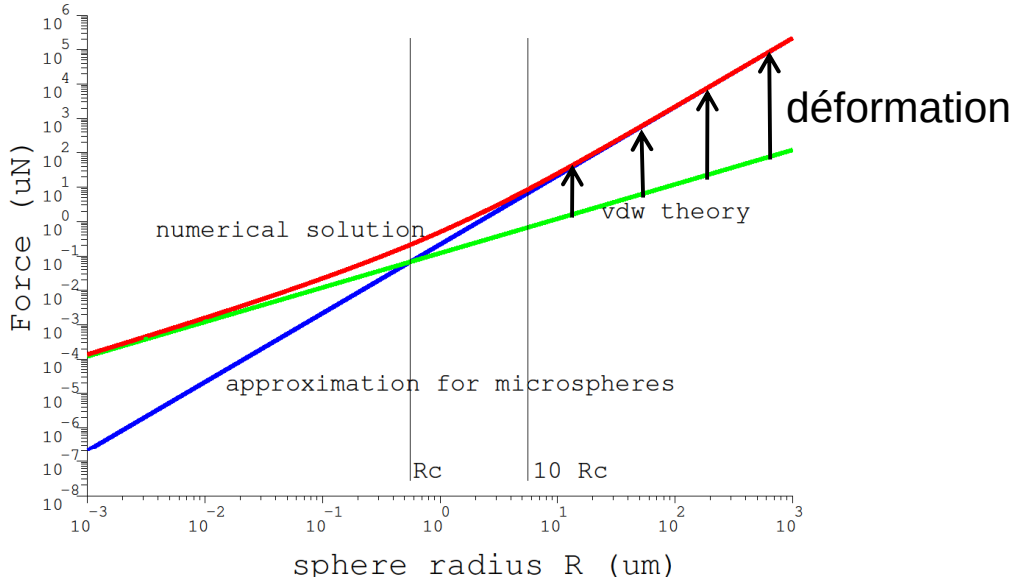
$$F_1 = F_0 - \frac{A a_1^2}{3 r_0^3} < F_0$$

$$a_2 > a_1$$

Modèle itératif

Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique





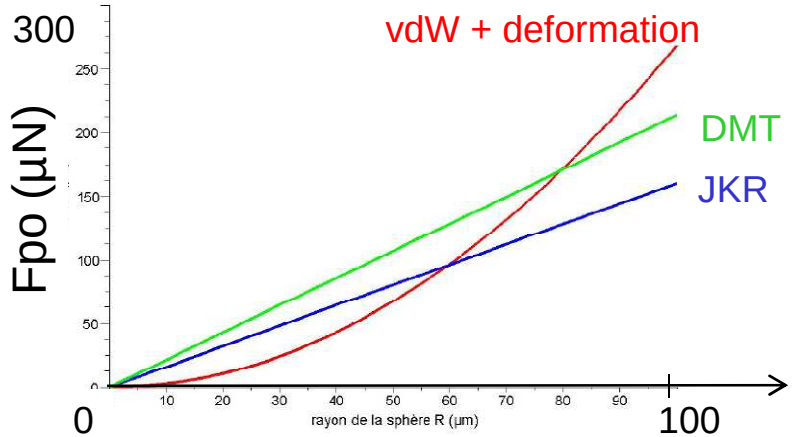
$$F = -\frac{A^3 R^2}{48 r_0^9 E^{*2}}$$

Comparaison aux modèles existants

Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique

vdW + déformation	JKR / DMT
$$F = -\frac{A^3 R^2}{48 r_0^9 E^{*2}}$$	$$-2\pi R w_{12} < F < -\frac{3}{2}\pi R w_{12}$$
Dépendances:	Dépendances:
•Caractéristiques mécaniques et physiques	•Énergie de surface w_{12}
•R^2	•R

F_{po} Sphère / plan Si:



Rayon de la sphère (µm)

Comparaison aux modèles existants

vdW + déformation	JKR / DMT
$$F = -\frac{A^3 R^2}{48 r_0^9 E^{*2}}$$	$$-2\pi R w_{12} < F < -\frac{3}{2}\pi R w_{12}$$
Dépendances: •Caractéristiques mécaniques et physiques •R^2	Dépendances: •Énergie de surface w_{12} •R

Exposant de R peut être un moyen de vérification expérimental

Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique

Sommaire

I. Présentation générale
   1. Contexte: la micromanipulation
   2. Problématique
   3. Objectifs de mes travaux

II. Étude analytique: Adhésion et forces de van der Waals
   1. Effet d'échelle et modèle de force
   2. Modèle itératif
   3. Comparaison aux modèles existants

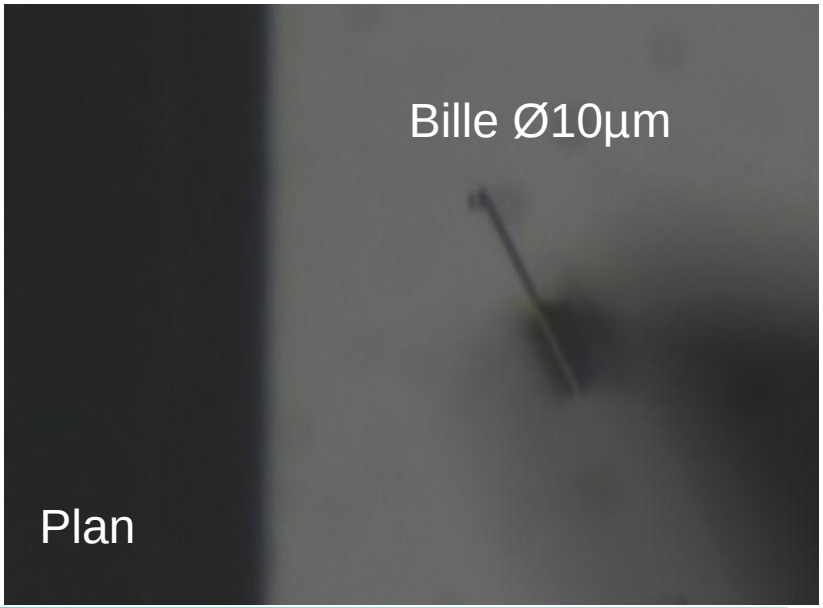
III. Étude expérimentale: Mesure de force de pull off
   1. Expérience et setup expérimental
   2. Problèmes rencontrés et premières hypothèses
   3. Premiers résultats

Objectif des expériences

- Besoin: mesures de forces de pull off
  - Bonne répétabilité en vue d'une corrélation avec le modèle
  - Mesures pour plusieurs diamètres de billes

- Première étape: Restrictions des mesures de forces de Pull off à:
  - Sphère Ø10µm / plan
  - Même matériau

- 2 types d'expériences
  - Si: proche micromanipulation
  - Au

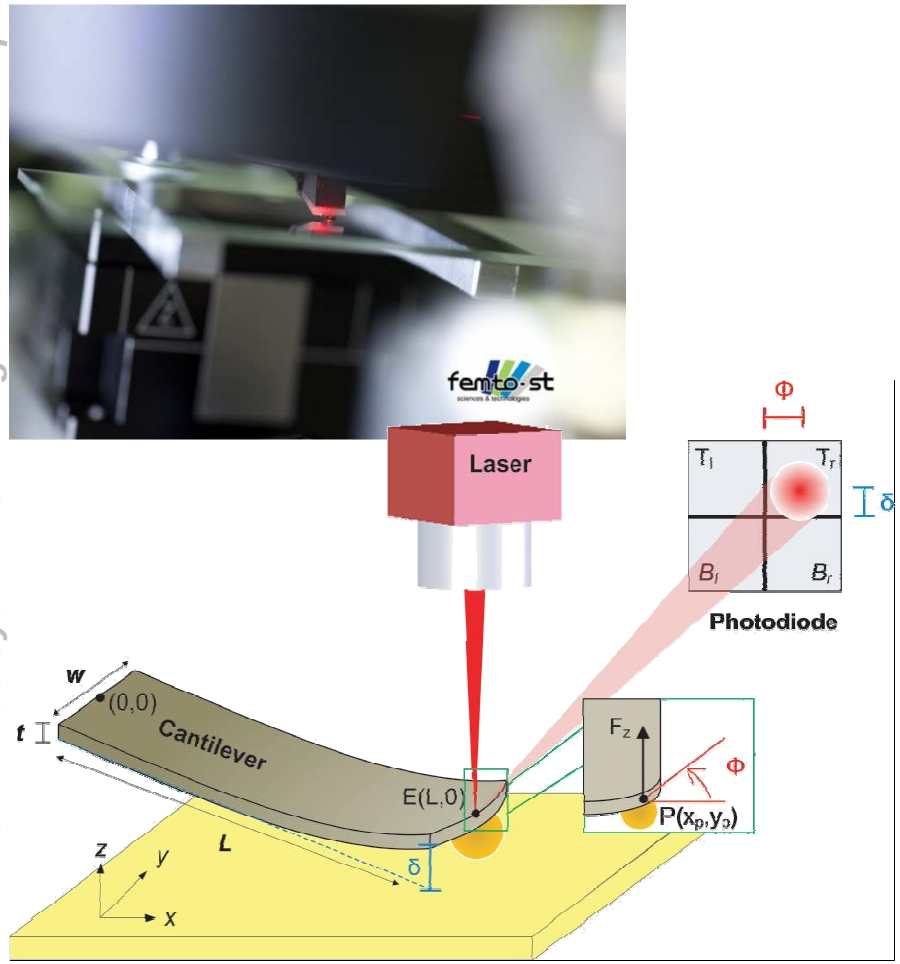


Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique

Moyens de mesure

AFM

Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique



Principe:

•Mesure basée sur la déflexion d'une poutre (cantilever)

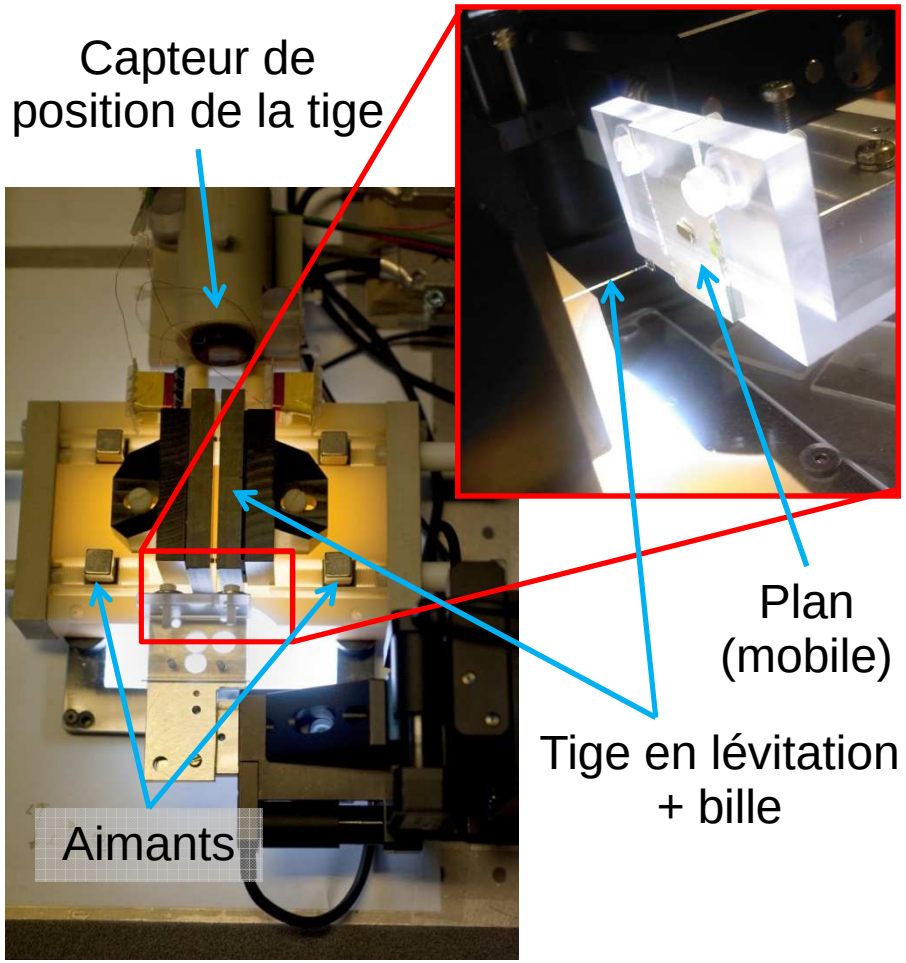
Moyens de mesure

Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique

Capteur à lévitation magnétique

Principe:

- Tige en lévitation équivalente à un ressort de faible raideur
- Mesure de force basée sur une mesure de distance

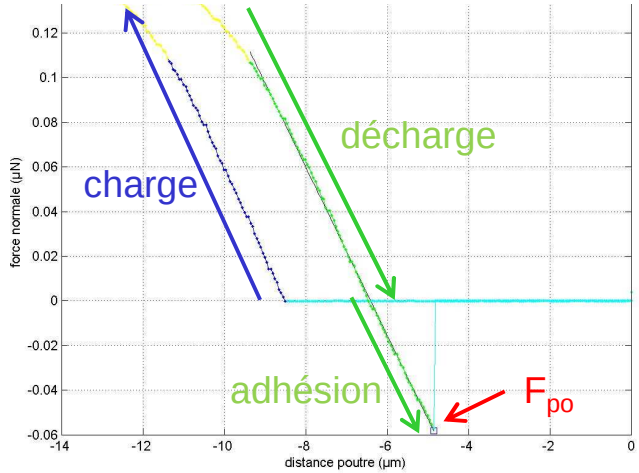


Méthodes de mesure

- Courbe d'approche / retrait
  - Force de pull off

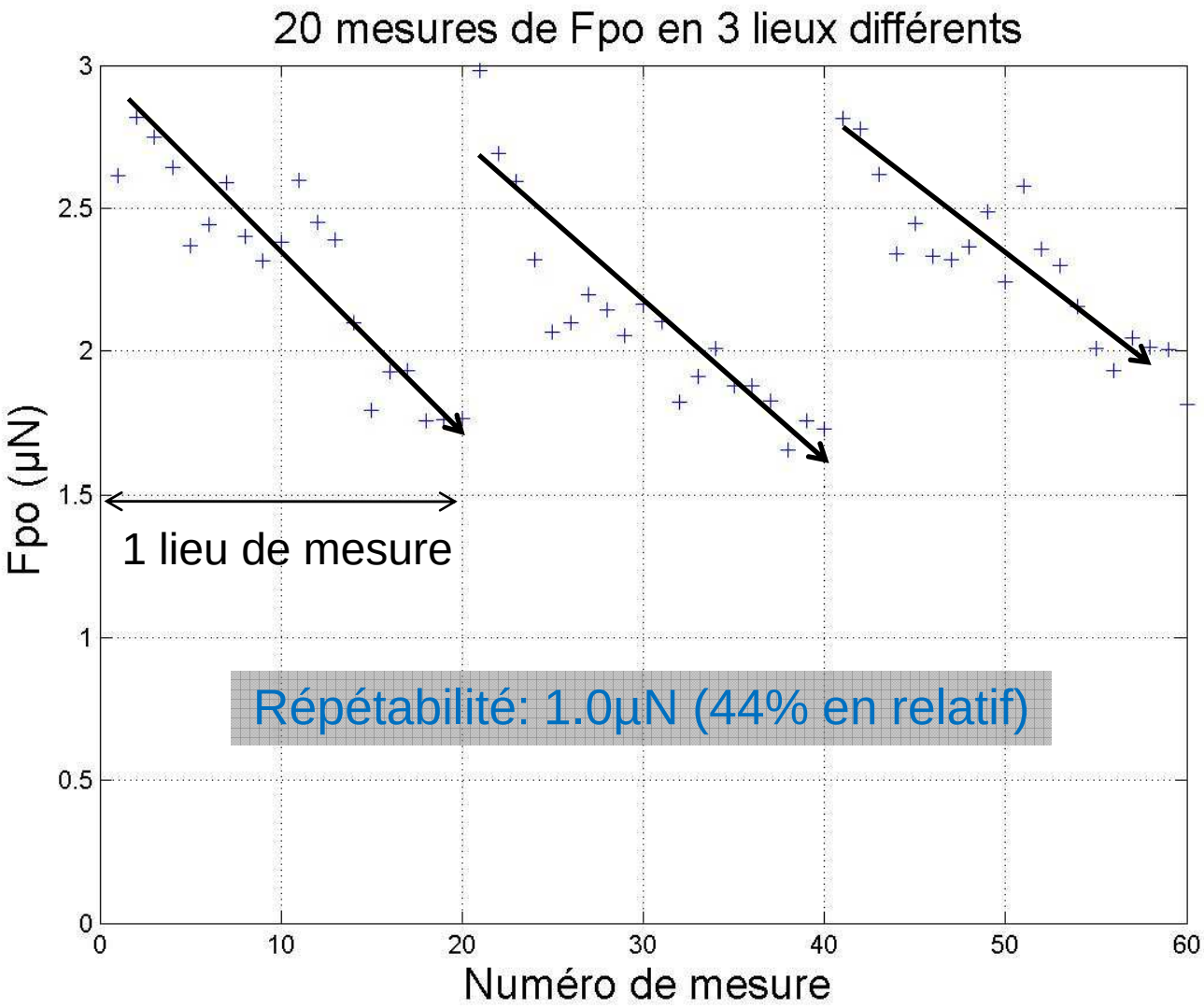
- Traitement des mesures par méthode statistique
  - Analyse de la variance
  - Mise en évidence de l'influence des paramètres expérimentaux

Courbe d'approche/retrait (AFM)



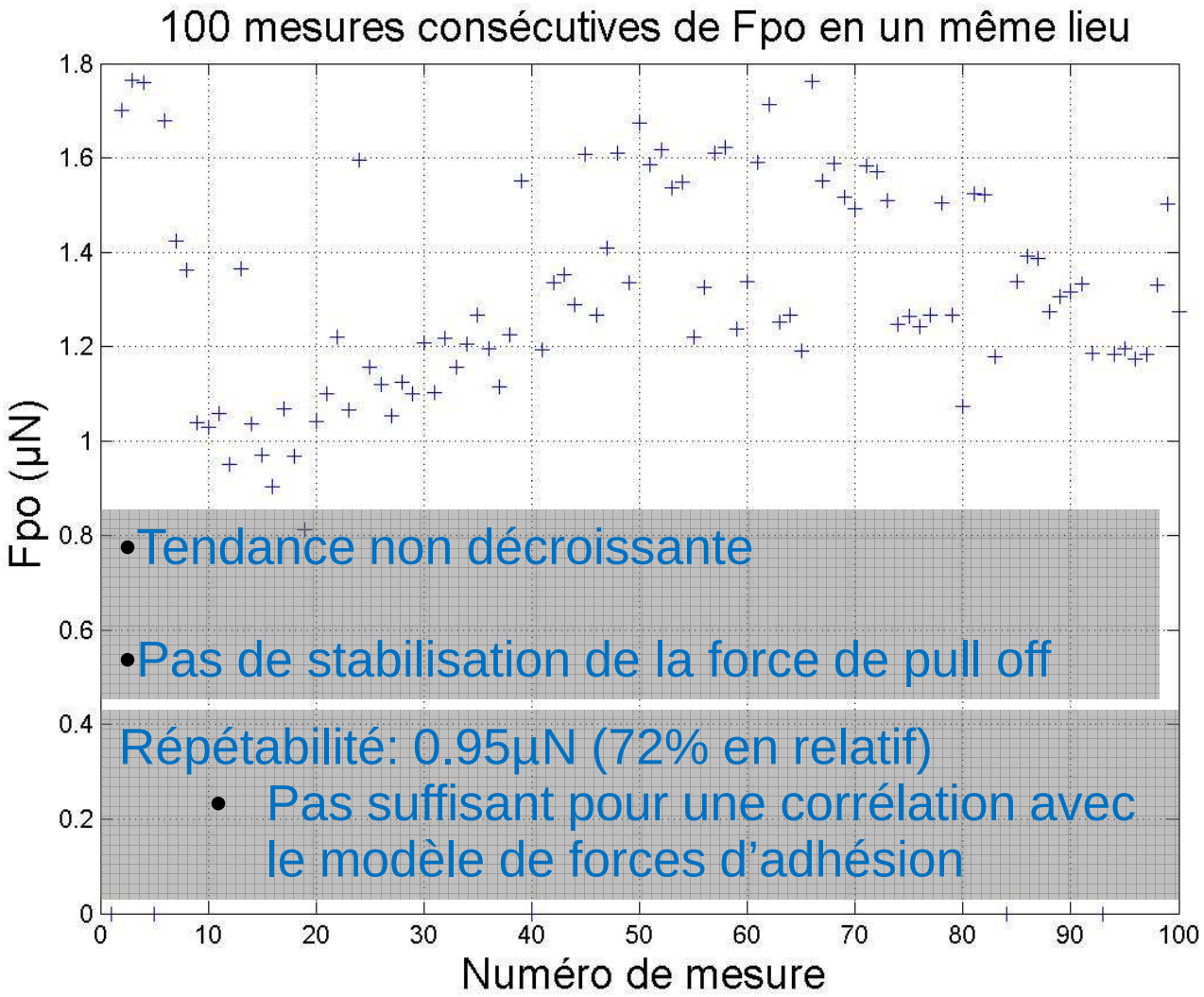
Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique

Premières mesures: Si



Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique

Premières mesures: Si



- Tendance non décroissante
- Pas de stabilisation de la force de pull off

Répétabilité: 0.95µN (72% en relatif)

- Pas suffisant pour une corrélation avec le modèle de forces d'adhésion

Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique

Hypothèses pour la non répétabilité

- Oxydation du silicium
  →Modification des propriétés du contact

- Influence du procédé de nettoyage
  →Charges électriques locales

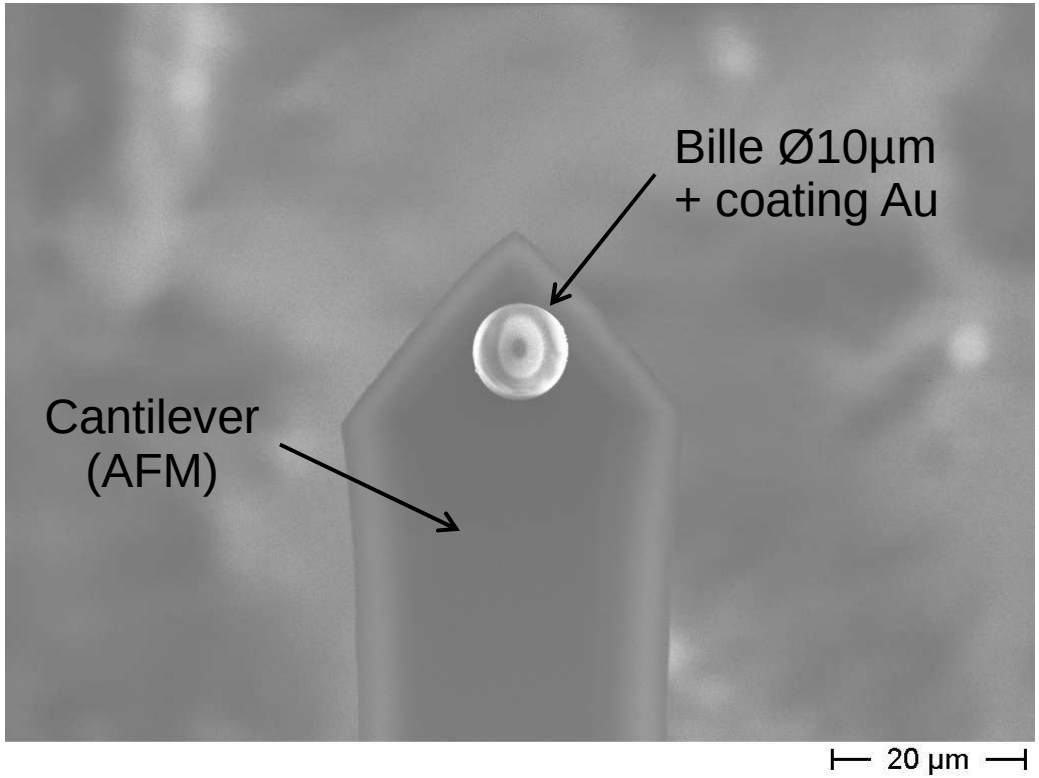
- Ménisque de capillarité attirant les impuretés durant le contact

⇒ Matériau non oxydable et conducteur : **l'or**

Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique

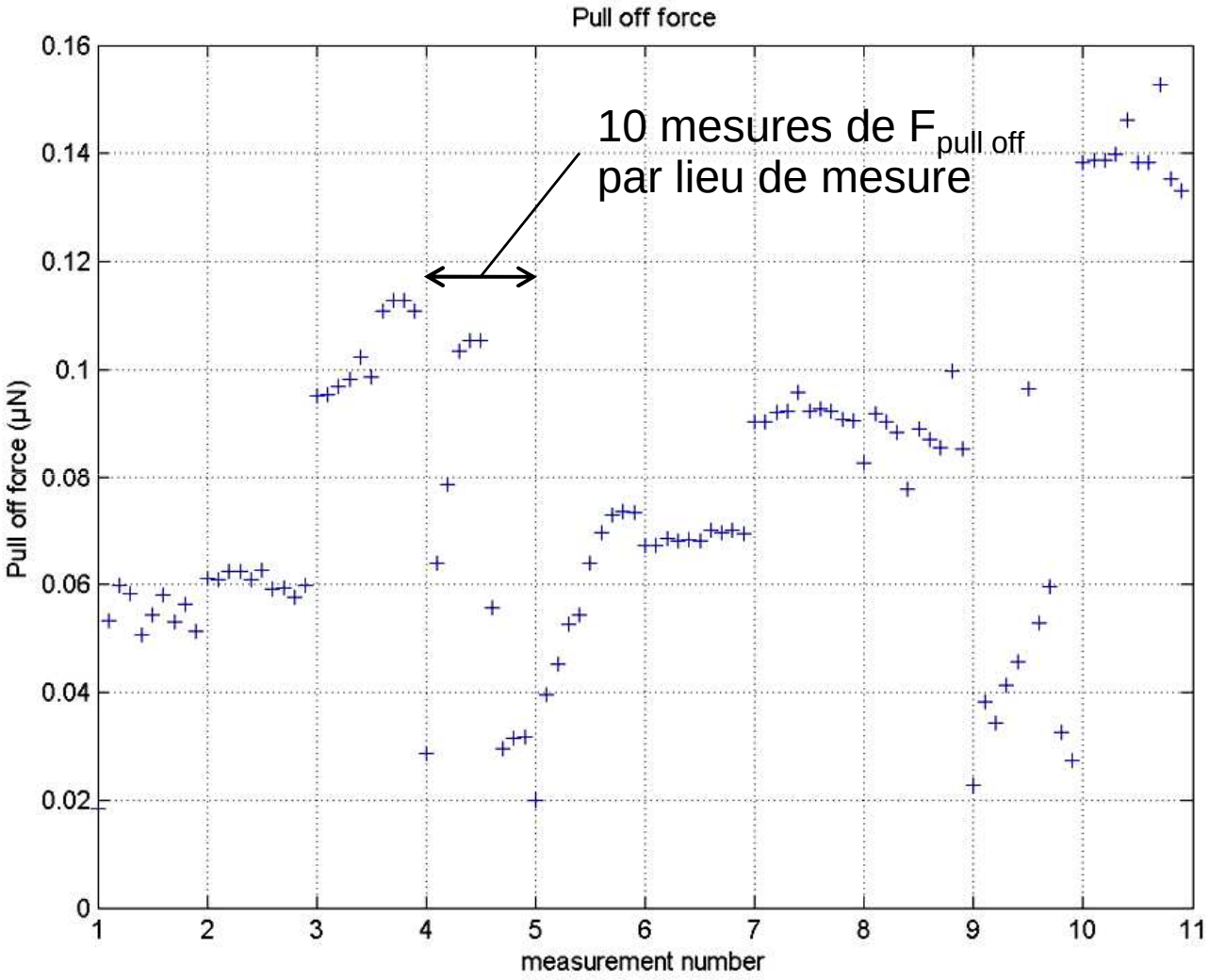
Coating d'or

- Coating Au ≃ 70nm
  - Conducteur
  - Mécaniquement non équivalent à des sphères d'or pur



Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique

Au: premiers résultats



Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique

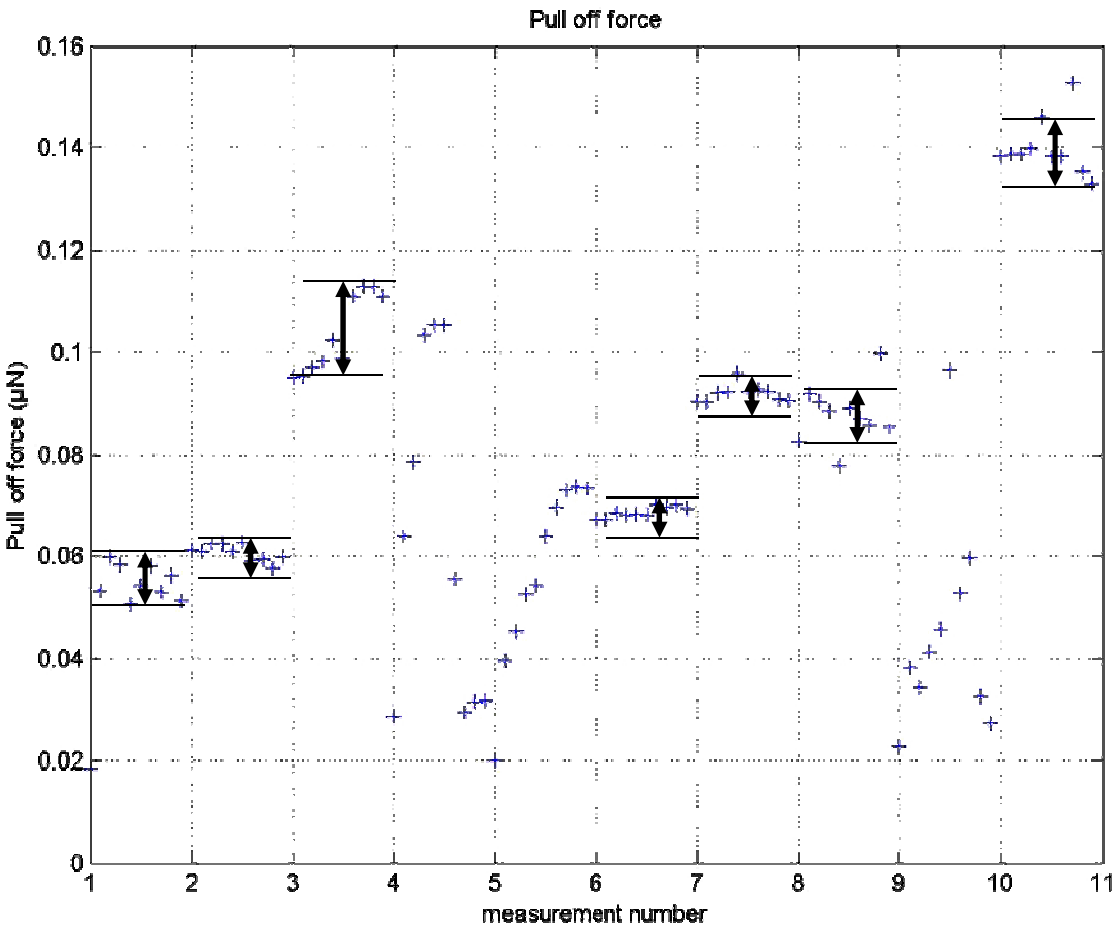
Au: premiers résultats

Bonne répétabilité en plusieurs points de mesure

Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique

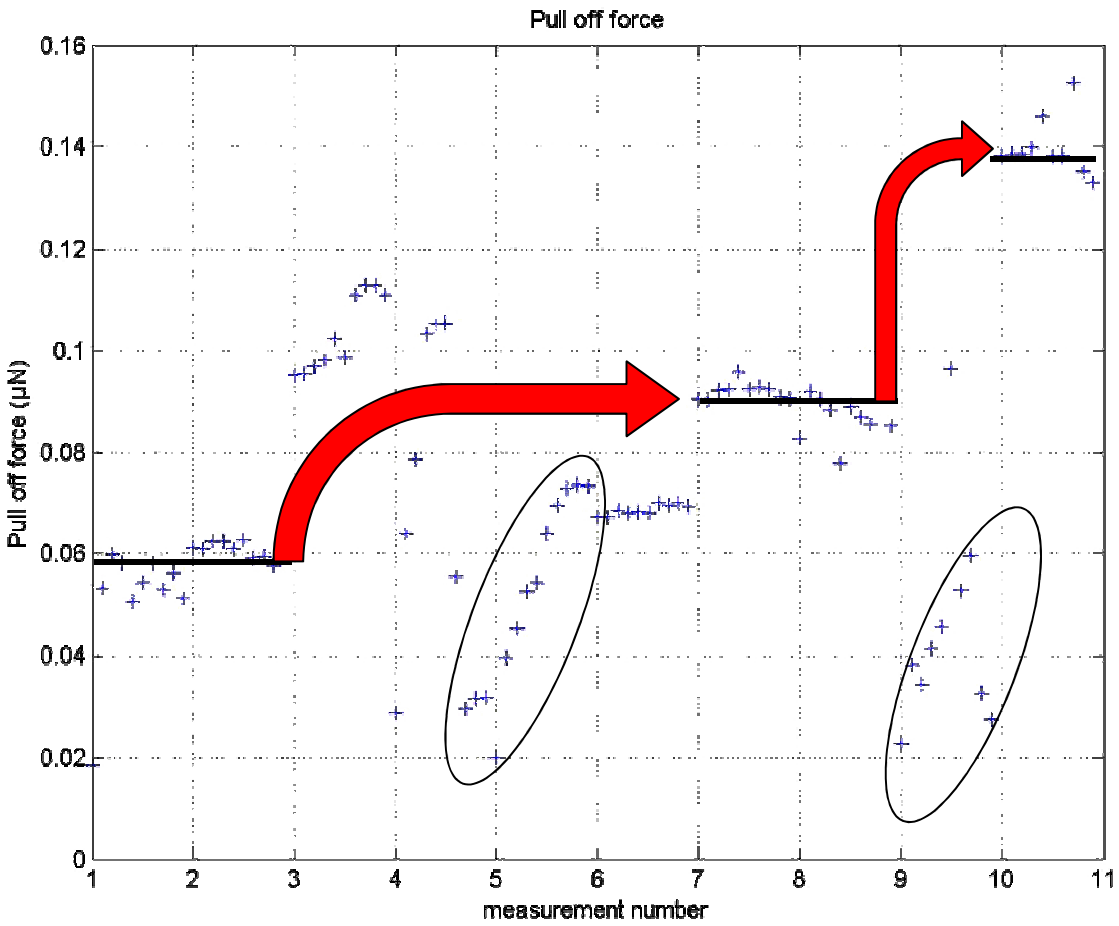
Répétabilité:

De 3 à 22 nN
(4 à 25% en relatif)



Premiers résultats

Influence de certains points sur les suivants

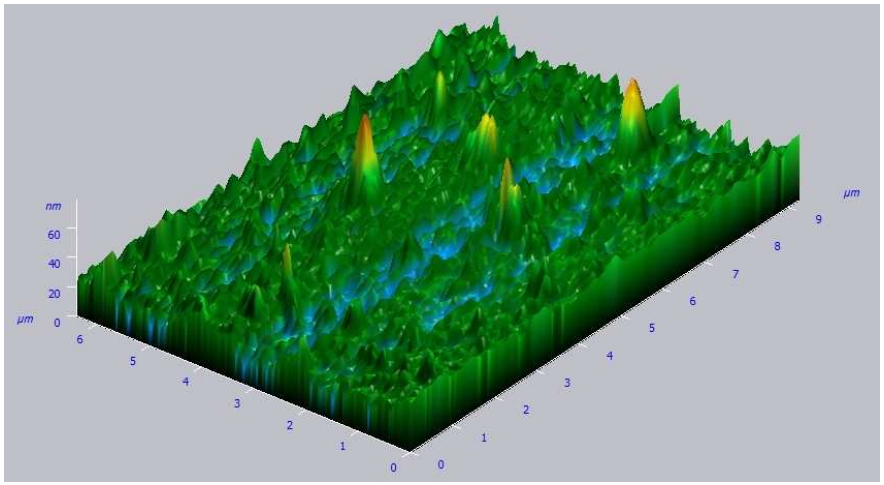


Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique

Interprétation et premières hypothèses

- Effet de la rugosité
  →Différences entre les points

- Effet des pics de rugosité
  →Augmentation globale des forces mesurées



Scan (imagerie AFM) de la surface d'or utilisée

Conclusion

- Étude analytique
  - Modèle itératif à l'échelle microscopique
  - Expression de la force de pull off dans le cas sphère/plan

- Validation expérimentale
  - Difficultés sur Si
  - Objets en Au: bonne répétabilité
  - Interprétation des résultats

Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique

Perspectives

- Corrélation modèle / expérience (R^2 vs R)

- Extension du modèle itératif à des géométries complexes
  - Sphère/sphère
  - Rugosité

Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique

Modélisation et simulation du comportement des micro-objets

Sébastien Alvo, doctorant (2ème année) ISIR/Femto-st

Stéphane Régnier, ISIR (UPMC, Paris)
Michaël Gauthier, département AS2M de FEMTO-ST (UFC, Besançon)