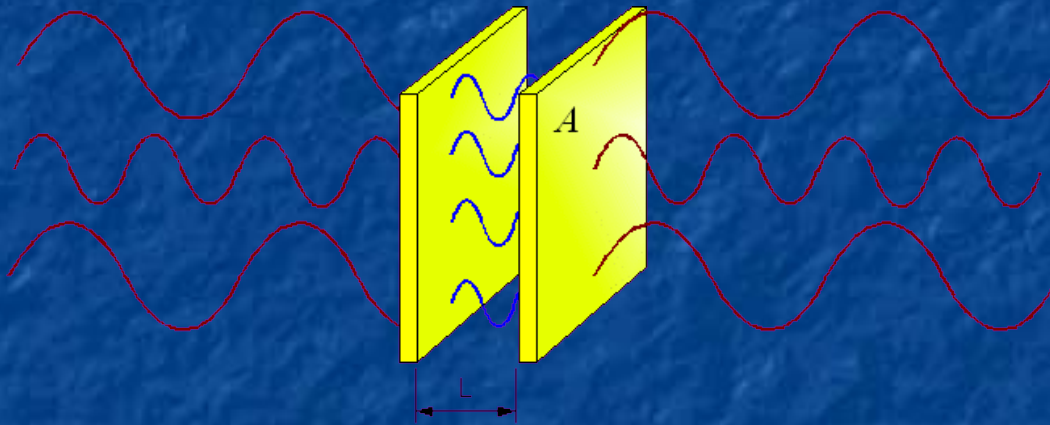


Vers un microscope de force de Casimir :

mesure de forces faibles et nanositionnement absolu



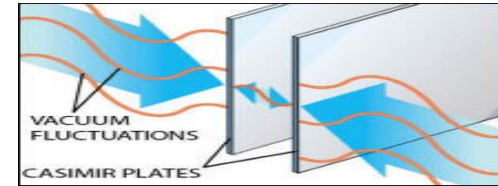
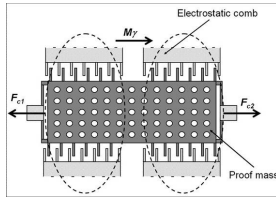
Guillaume Jourdan

Sous la direction de :

Joël Chevrier, Astrid Lambrecht

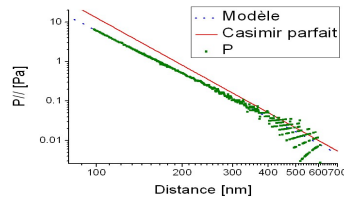
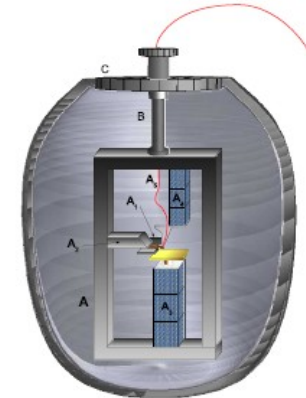
Institut Néel, ESRF, LKB

I Effet Casimir



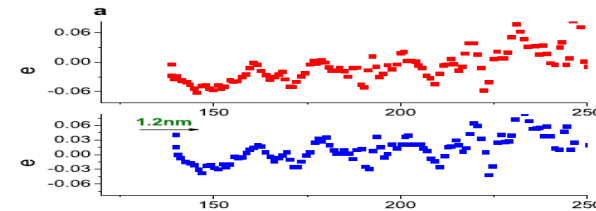
II Les enjeux

III Microscope de force de Casimir

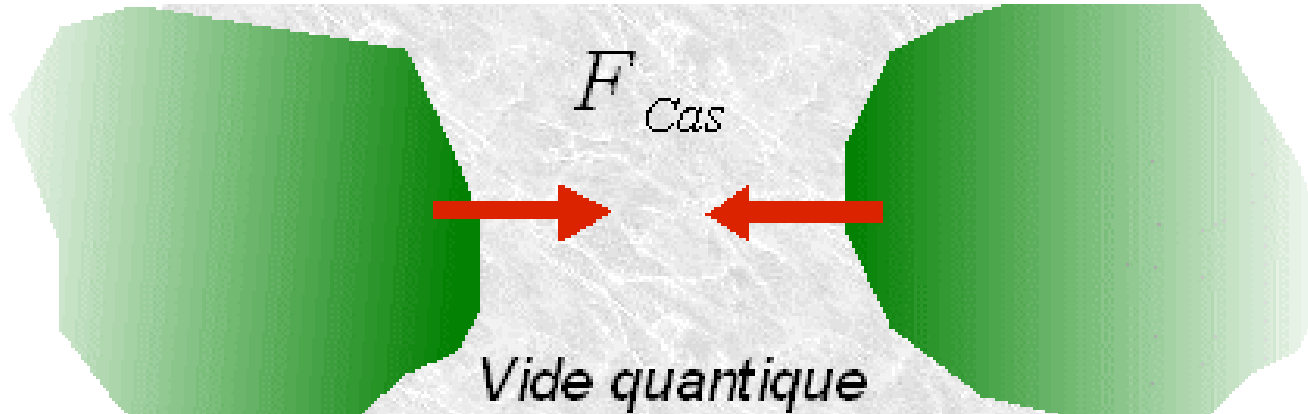


IV Mesure @ échelles nm- μ m

V Mesure absolue de force



L'effet Casimir : *une altération du vide quantique*



- Vide « classique »

Espace

Sans Matière

Sans Champ EM

- Vide « quantique »

Champ EM : État fondamental

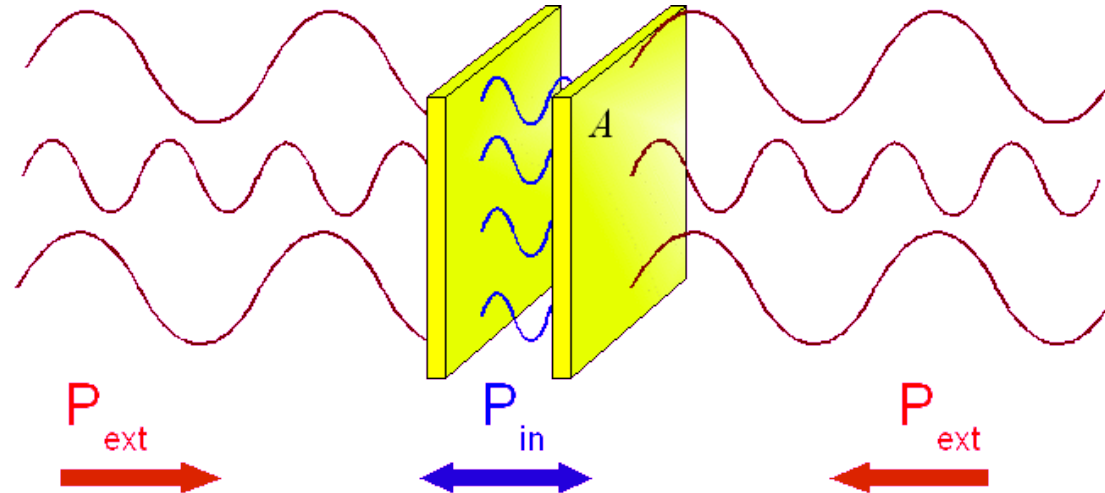
Fluctuations de champ

$$\langle E \rangle = 0 \quad \Delta E^2 \neq 0$$

...

Confinement du champ EM

dans son état fondamental



Cavité matérielle

Modification

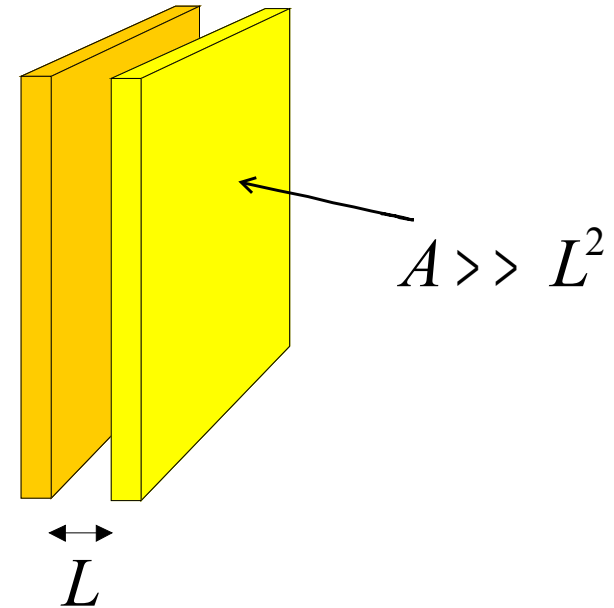
fluctuations du vide

Pression de radiation

$$P_{in} \neq P_{ext}$$

La force de Casimir dans le cas idéal (1948)

- Hypothèses :
 - Miroirs plans parallèles
 - Réflexion parfaite
 - $T = 0 \text{ K}$
 - Surfaces planes

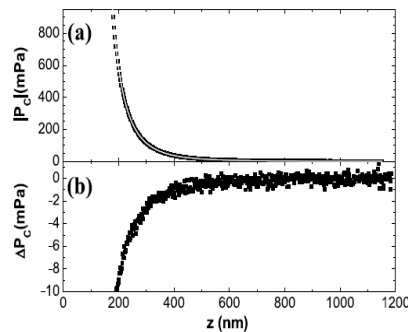
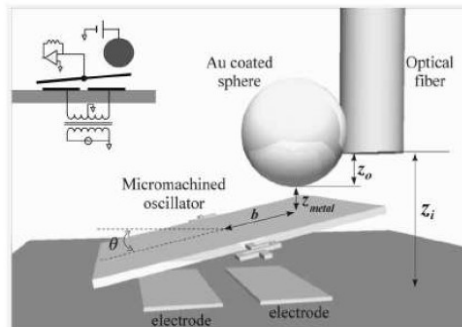


$$F_{Cas} = \frac{\hbar c \pi^2}{240 L^4} A$$

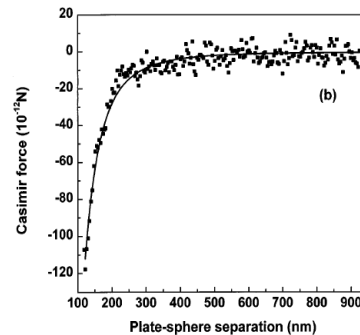
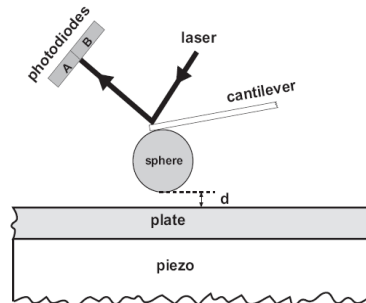
$$L = 100 \text{ nm} \rightarrow \frac{F_{Cas}}{A} \approx 13 \text{ Pa}$$

- **Observation** en 1958 : Sparnaay
- **Mesures quantitatives** : depuis 1997

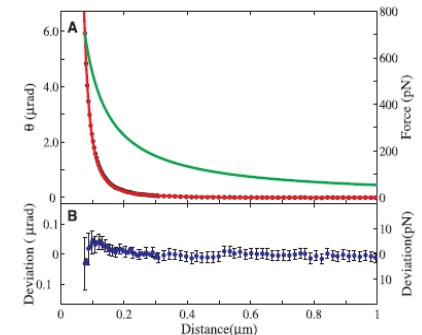
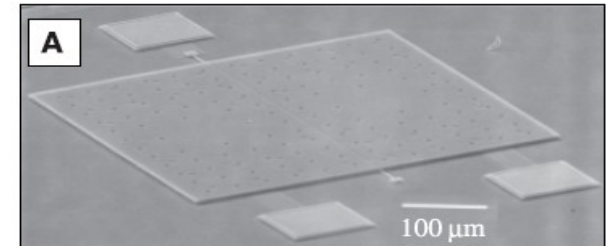
Lamoreaux, Mohideen, Capasso, Onofrio, Decca...



Decca



Mohideen



Capasso

Couplage champ EM / matière : réflectivité réelle des miroirs

constante diélectrique

$$\varepsilon(\omega)$$

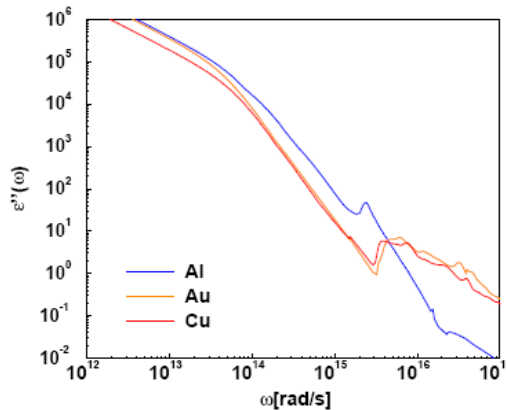


Correction

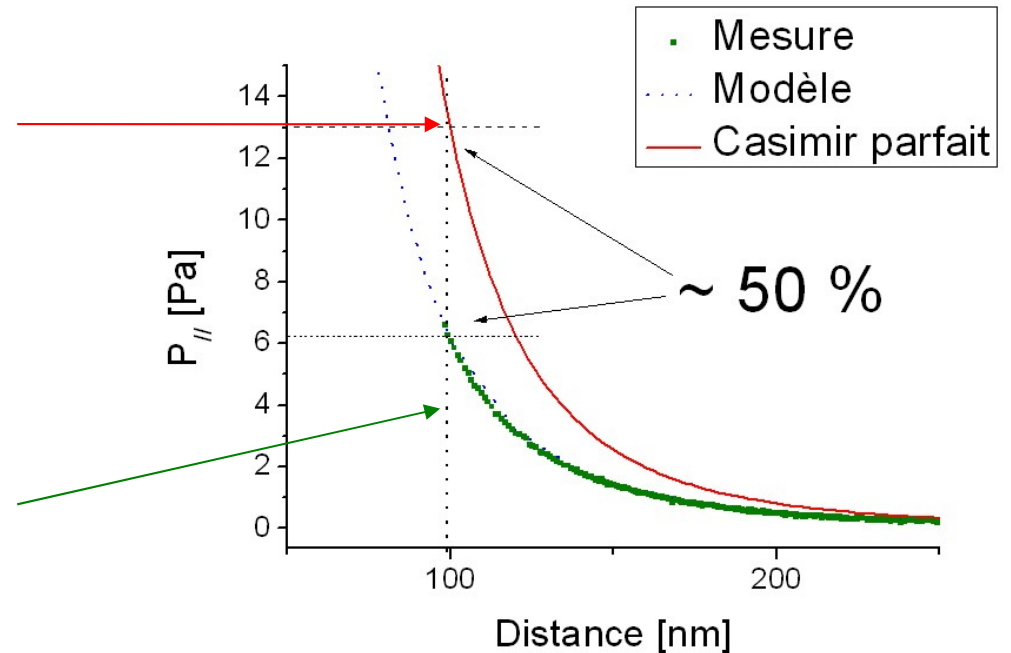
A. Lambrecht et al

Pression de Casimir Au-Au

• Miroir **parfait** : $\varepsilon(\omega) = -\infty$



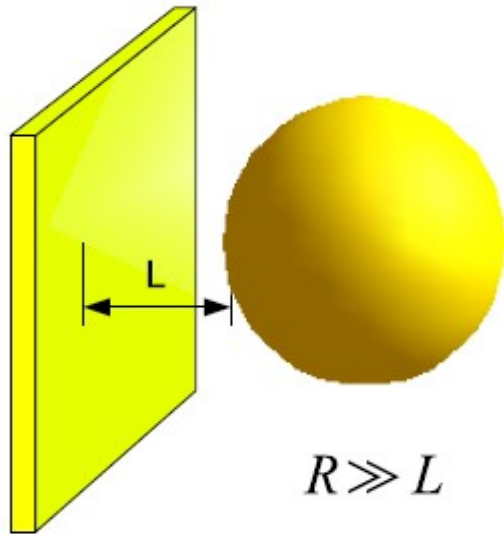
• Miroir **réel** :



Géométrie sphère plan

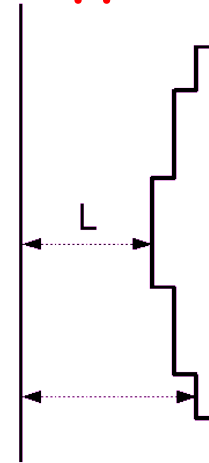
Configuration bien définie

1 seul d° de liberté L



Évaluation de la force :

approximation de proximité (PFA)



$$R \gg L$$

$$F = dF_{// L_1} + dF_{// L_2} + \dots$$

$$F_{Plan-sphère} = 2\pi R \frac{E_{//}}{A}$$

II Motivations de l'étude

Aspects

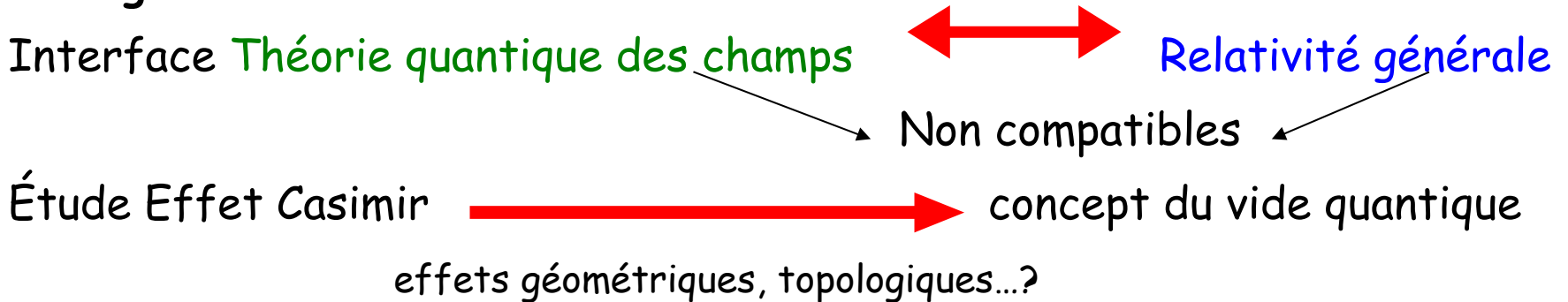
- **Théoriques** : fondements de la physique
- **Pratiques** : réalisation de nano systèmes mécaniques

Une manifestation mécanique du vide quantique

- Catastrophe du vide (TQC) :

Divergence de l'énergie du vide : description non satisfaisante!

- Énergie du vide :

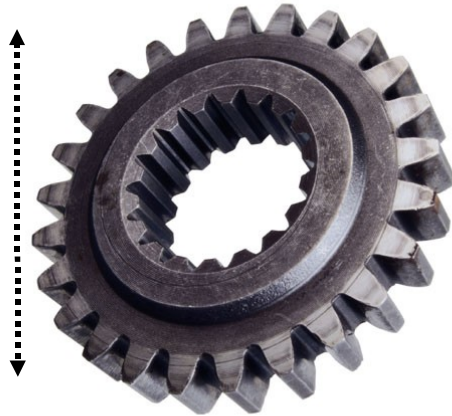


- Déviation loi de Newton :

Prédictions : modèles d'unification des forces fondamentales

Contraintes mécaniques aux échelles submicrométriques

$L \sim 1 \text{ cm}$



Échelle submicrométrique ?



$L \sim 10-100 \text{ nm}$

Forces : volume $\propto L^3$ \longrightarrow Forces : surface $\propto L^2$

Gravitation

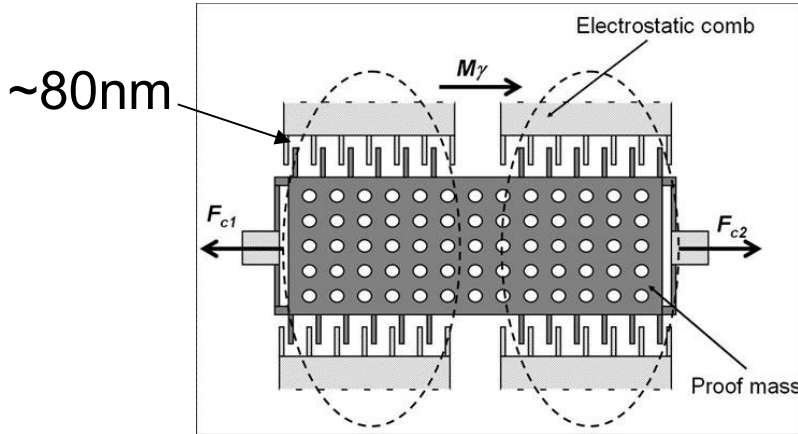
Contraintes internes

• Dans le vide : *électrostatique, Casimir*

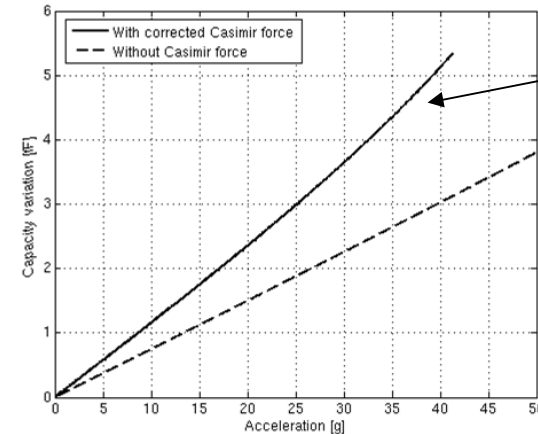
• Cas général : + *tension de surface, capillarité, frictions...*

Couplages : - *environnement (bruit de force)*
- *actions en retour du système de détection*
- *phénomènes thermiques, électroniques, magnétiques, optiques...*

Une nouvelle conception des nanosystèmes électromécaniques ?



Nano accéléromètres : CEA LETI



Avec
Force
de Casimir

Sensibilité : L Duraffourg, P Andreucci (simulation)

Problèmes : élaboration, fonctionnement NEMS

« Repenser » la conception du Nems :

Intégrer la force de Casimir : actionnement, interaction objets...

Au-delà de la configuration classique *contrôler la force de Casimir*

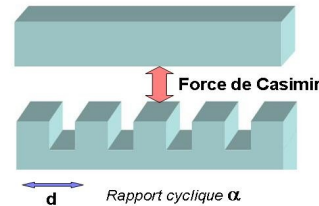
Comprendre :

- Couplage champ EM / matière
- Confinement du champ EM : géométrie / conditions aux limites

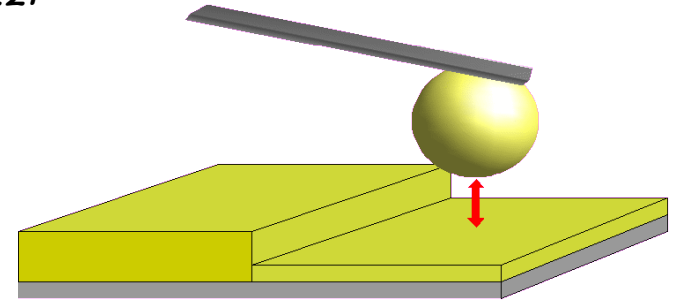
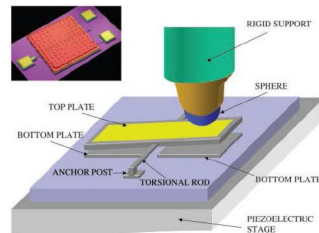
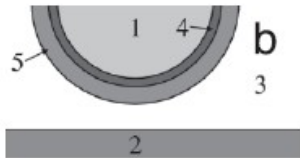
Matériaux : semi-conducteur silicium... *U. Mohideen*

Plasmonique : *F. Intravaia*

- nanostructuration de surface
- métamatériaux...



Effet de couche mince : *F. Capasso, D. Iannuzzi*

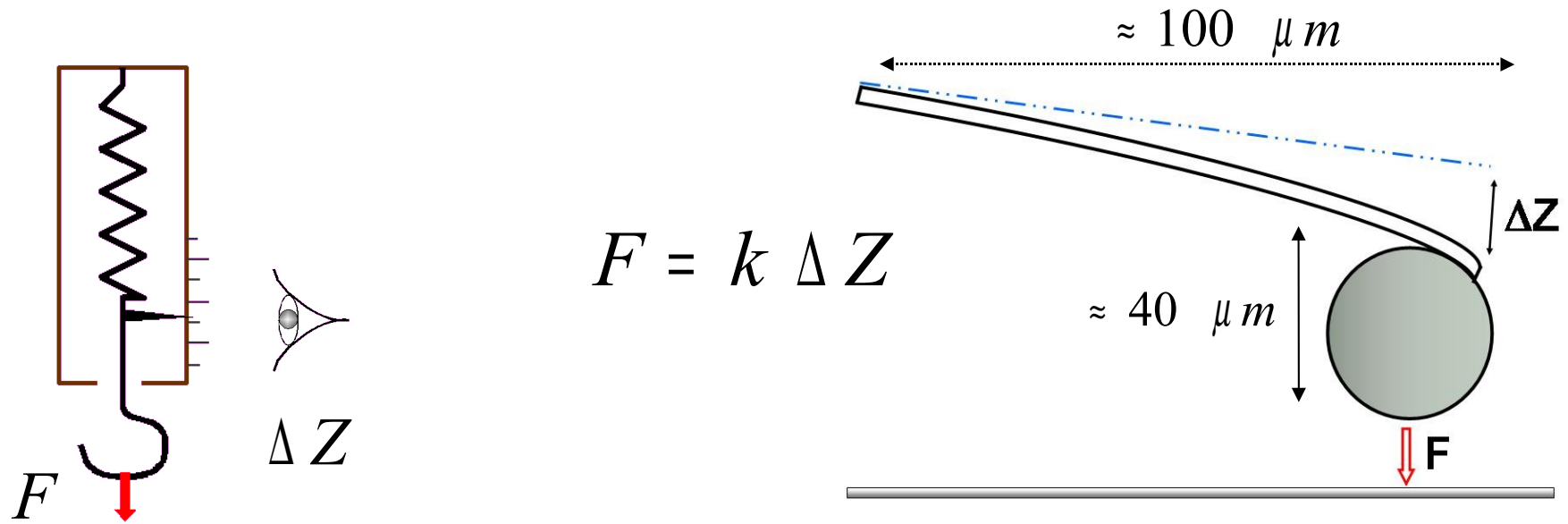


III Définition du microscope

- Principe de la mesure de force / gradient de force
- Contraintes expérimentales : cahier des charges
- Montage expérimental

Le microlevier

un dynamomètre de dimension micrométrique



Élasticité des matériaux, pour de faibles contraintes

Force ➔ mouvement

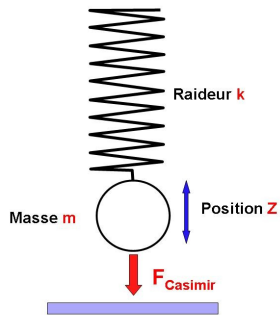
Lecture position : œil, interféromètre à fibre optique

Sensibilité à un gradient de force perturbation de la fréquence de résonance

I] Microlevier

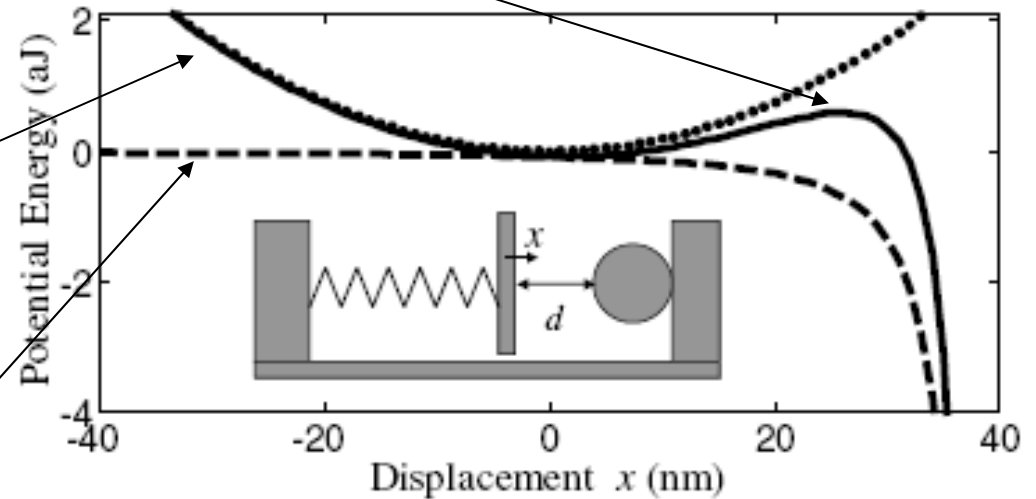
=

Oscillateur
harmonique 1D



E_{osc}

$$E_p = E_{osc} + E_{Cas}$$

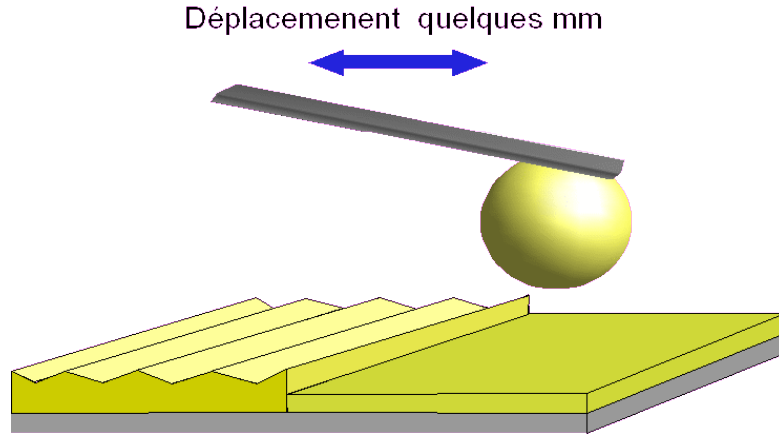


II] Énergie potentielle E_{Cas}

$$F_{Cas} = - \frac{dE_{Cas}}{dz}$$

$$\Delta f_{res} = - \frac{f_{res 0}}{2k} \frac{\partial F}{\partial z}$$

Tester différentes configurations de surfaces



• **Même sonde :**

Comparaison directe

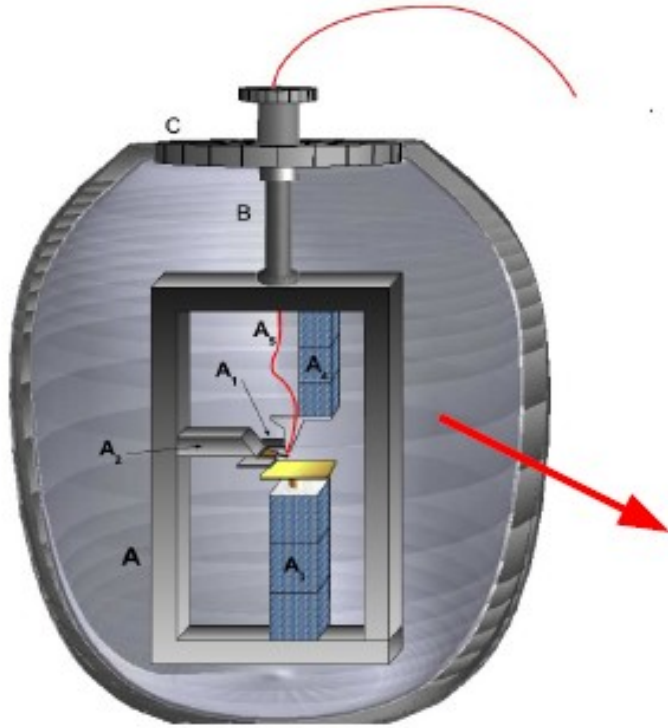
• **Configuration « classique » :**

Tester l'écart à la "sphéricité" de la sonde

Cahier des charges :

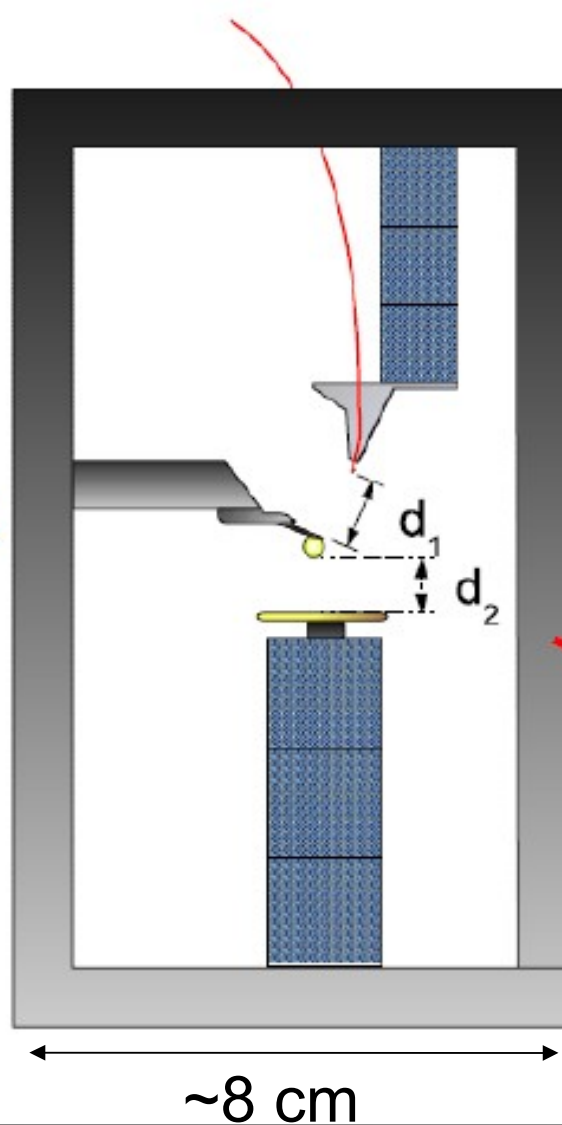
- Déplacement horizontal (millimètre au micron) : choix de la zone d'étude
- Déplacement vertical (résolution nanométrique) : spectroscopie de force
- **Pas de contact physique**
- Sous vide ($P = 10^{-6}$ Torr)
- **Mesure absolue** de la force et de la position
- Précision / contrôle des appareils de mesure....

Le montage expérimental (1)



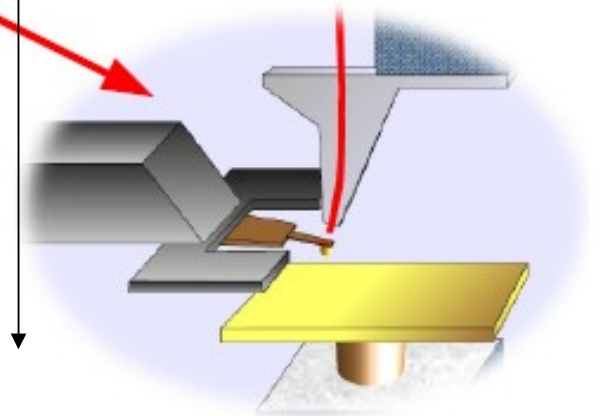
Chambre à vide

$$P = 10^{-7} \text{ Torr}$$

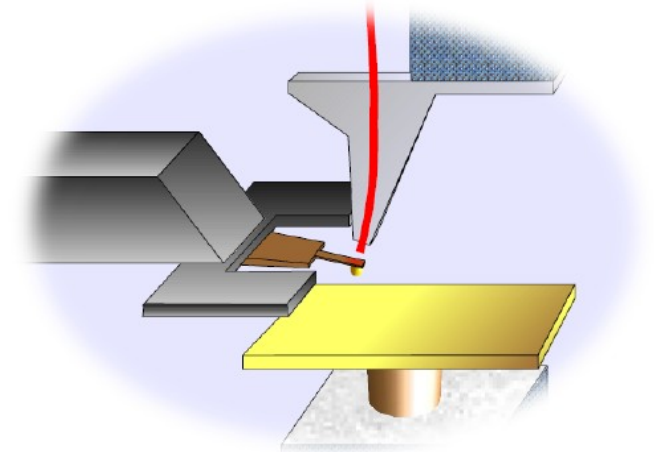
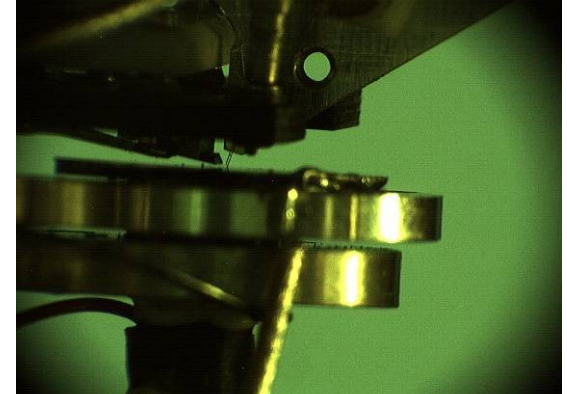
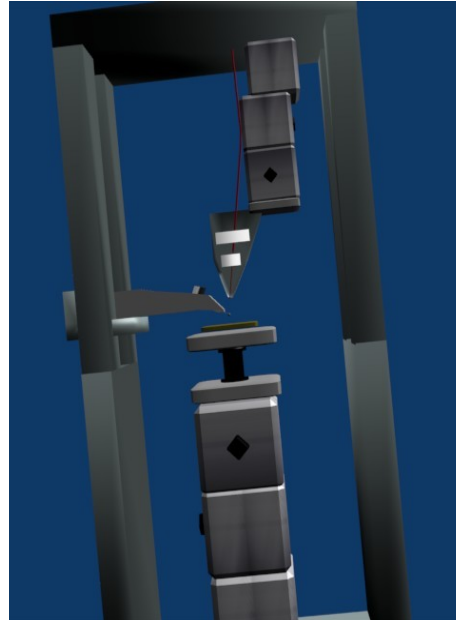


~15 cm

~8 cm



Le montage expérimental (2)

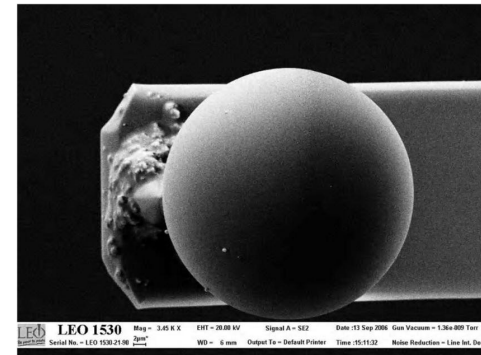
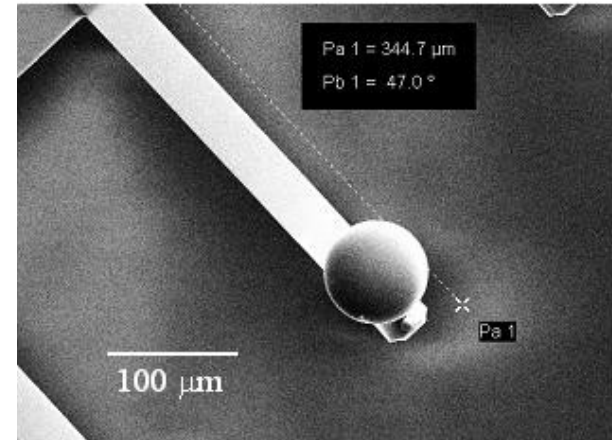
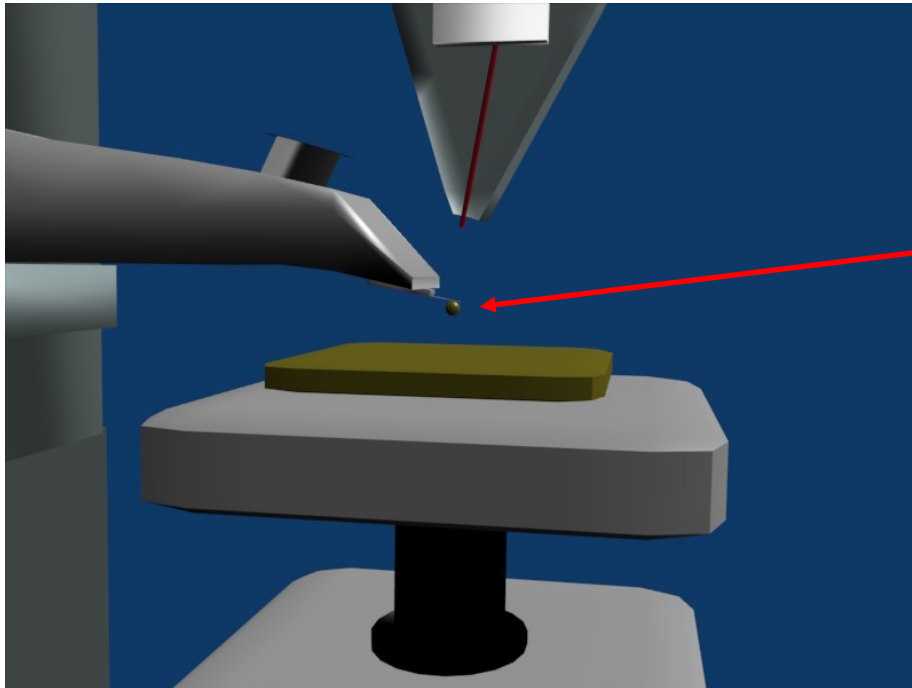


Le cadre

M Navizet, G Torricelli

La sonde de force

Préparation de la sonde de force *microlevier + microsphère*



couche d'or de 300nm



sphère en or massif

$$R_s = 20\mu m$$

Rugosité rms 3 nm

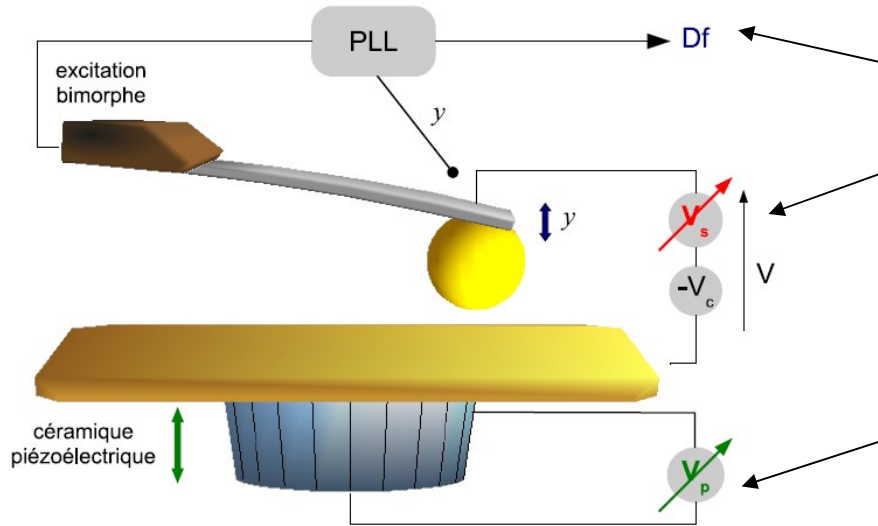
Préparation : *Simon Le Denmat*

IV Mesure de force à l'échelle submicrométrique

- Procédure d'acquisition d'une courbe de force

- Quelques problèmes expérimentaux

Procédure d'acquisition d'une courbe de gradient de force



Mesure **Gradient** df_{res}

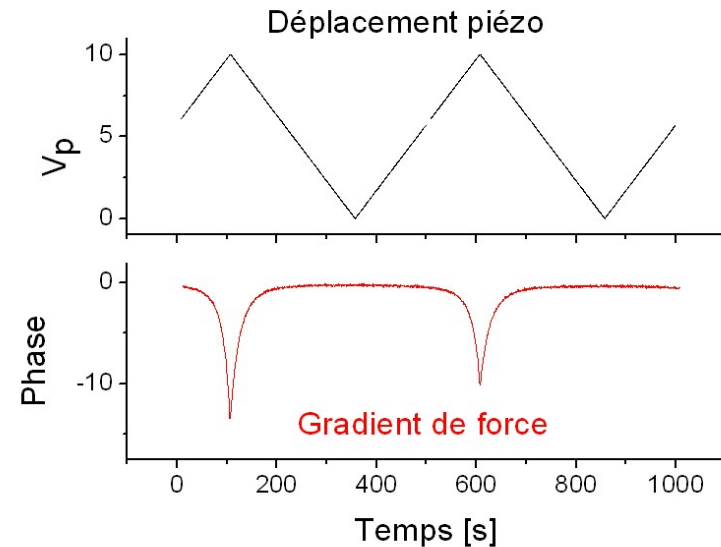
Contrôle **force électrostatique**

$$F_e = \frac{1}{2} C' V^2$$

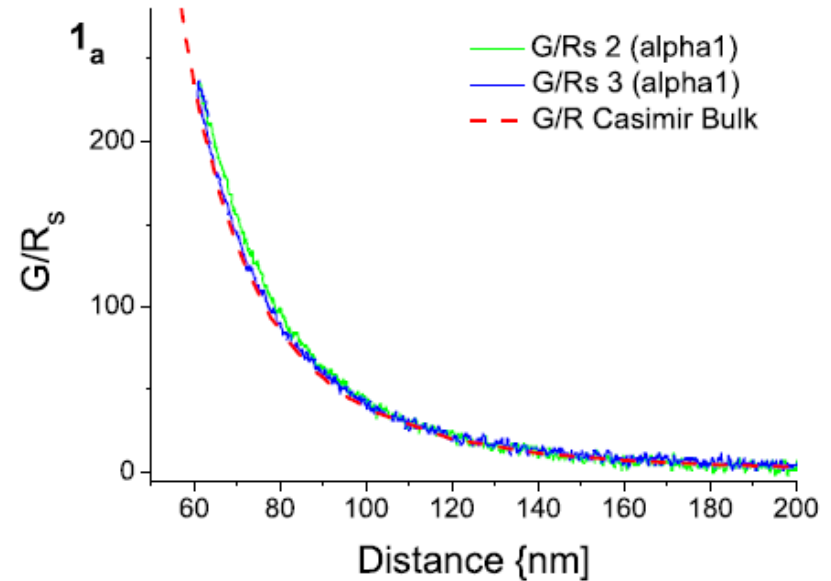
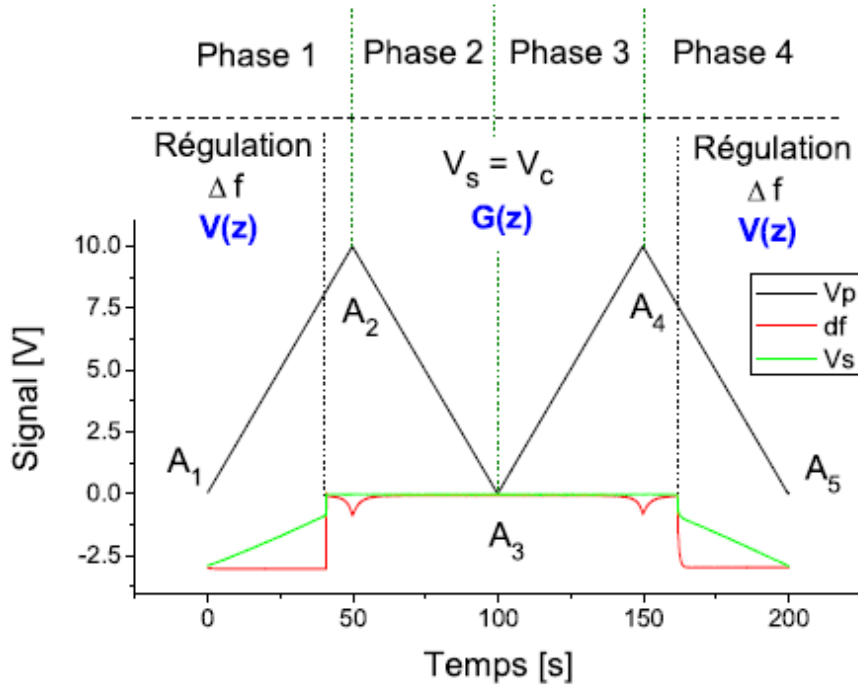
Contrôle **distance sphère/échantillon**

Cycle d'approche et de retrait

- *Plusieurs cycles successifs*
- *Pas de contact*



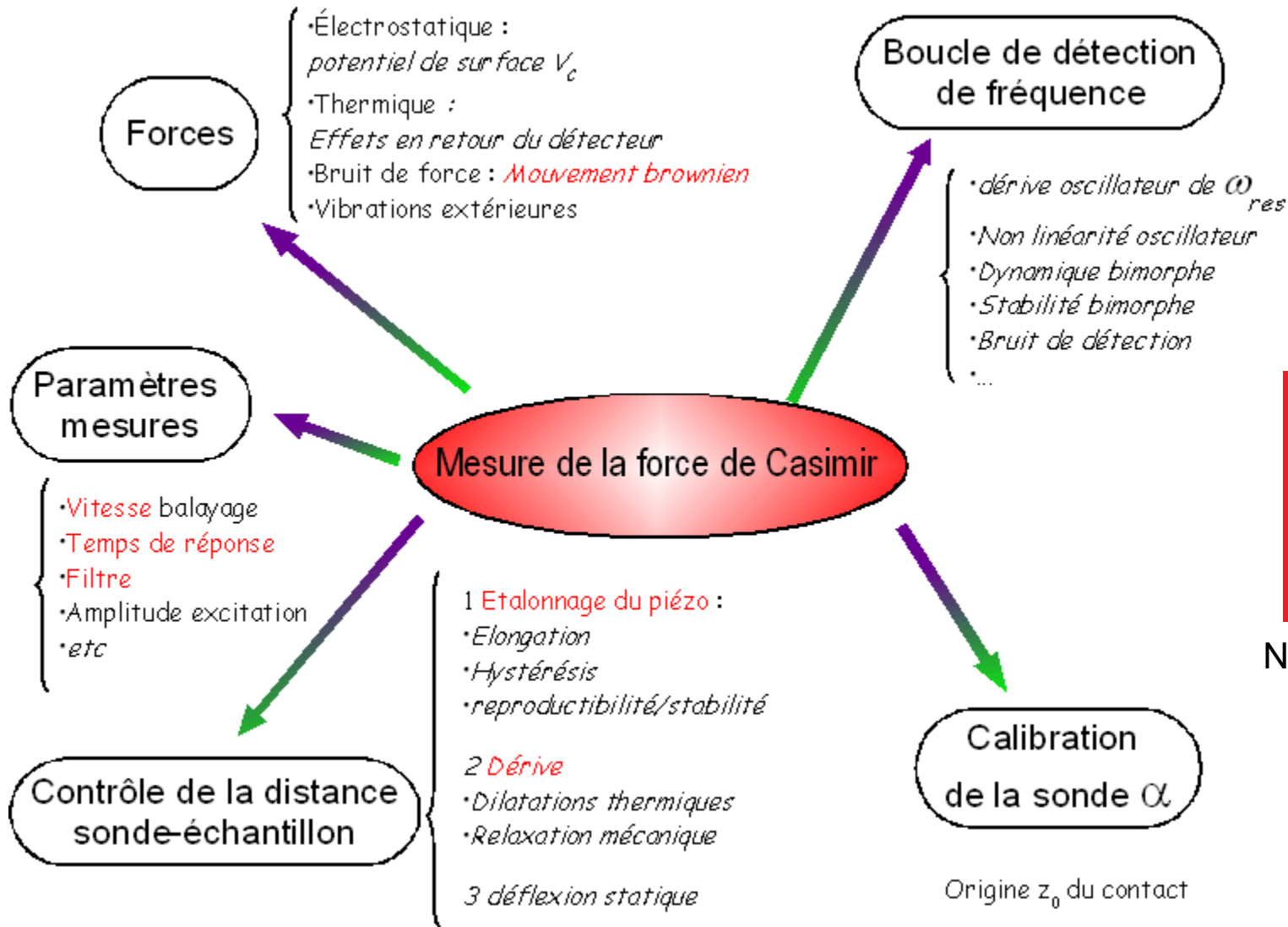
Du cycle de mesure à la courbe de force de Casimir



Conversion signaux bruts / signal $P_{\text{Casimir}}(L)$:

-Calibration appareil

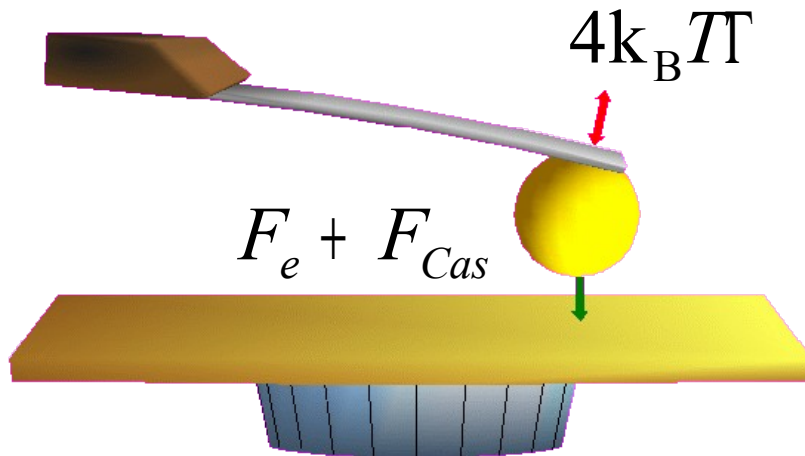
-problèmes expérimentaux



"It is very difficult stuff — you have to be paranoid about possible sources of error."
— Federico Capasso

Nature **447** (2007)

Sous vide



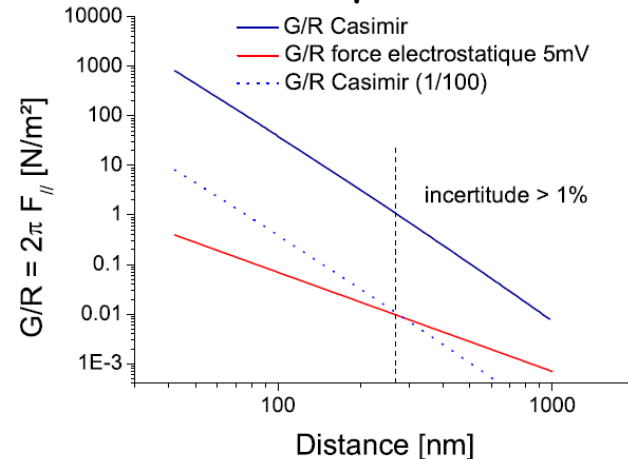
• **Force électrostatique**

$$F_e = \frac{1}{2} C' (V - V_0)^2$$

$$V = V_0 \pm 5 \text{ mV}$$

Compensation :

Incertitude < 1 % pour $L < 300 \text{ nm}$



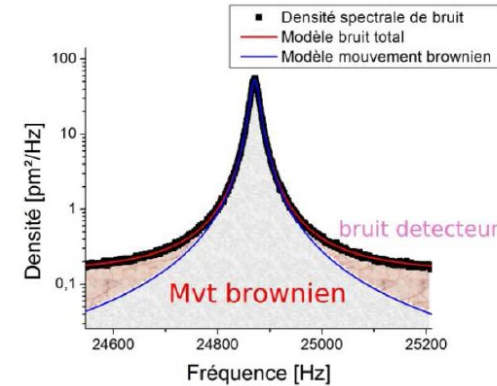
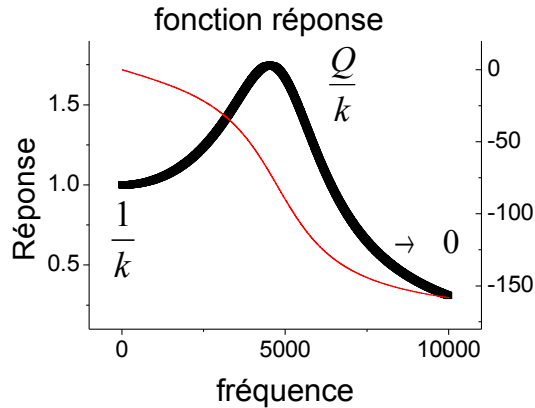
• **Bruit de force :**

Le mouvement Brownien $4k_B T$

Théorème fluctuation dissipation

Résolution au fN (mode dynamique) amplification mécanique par le microlevier

$$R = \frac{X}{F}$$



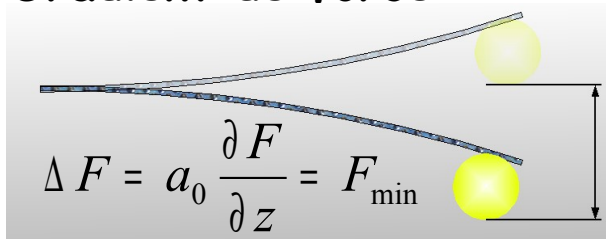
Bruit de force : dominant @ f_{res}

Résolution (*sous vide*, $T=300\text{ K}$, @ résonance)

• Force

$$F_{min} \approx 10 \text{ fN}/\sqrt{\text{Hz}}$$

• Gradient de force



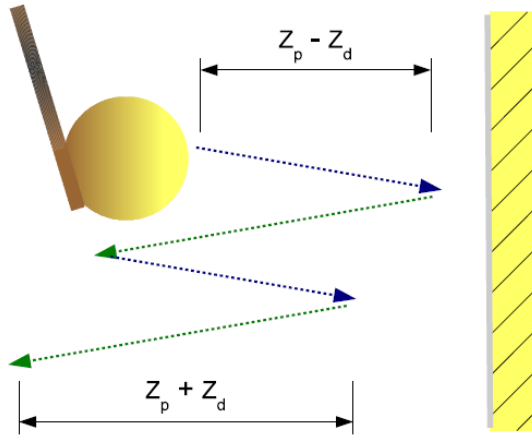
$$\frac{\partial F}{\partial z} = \frac{F_{min}}{a_0}$$

$$a_0 = 10 \text{ nm}$$

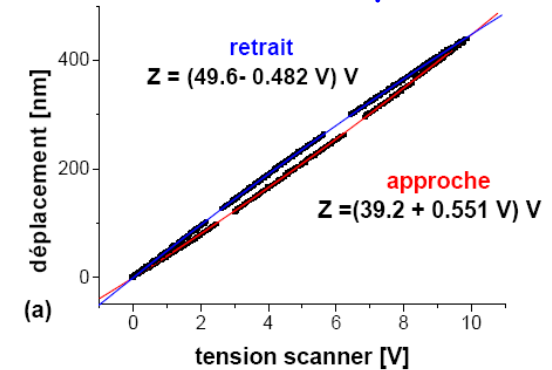
$$\frac{\partial F}{\partial z} \approx 1 \text{ fN/nm}/\sqrt{\text{Hz}}$$

Contrôle du positionnement au nanomètre ?

mouvement = **piézo** + **dérive**

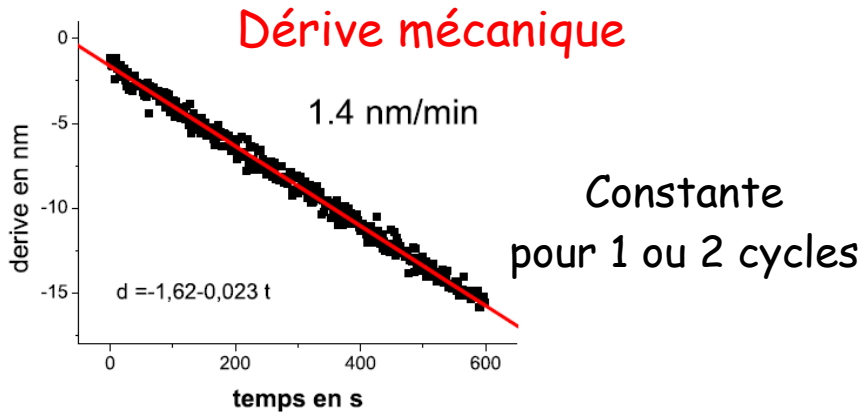


Translateur piézo



Reproductibilité \rightarrow même cycle :

- Fréquence
- Amplitude
- Signal triangulaire



Corrections
phase traitement des données

« Courte » distance

« Longue » distance



Variations abruptes

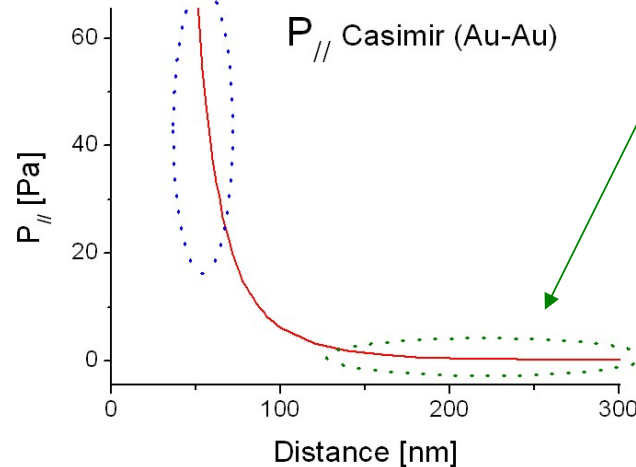
Déformation signal

Bande passante :

B_p

Vitesse de balayage

V_{scan}



Mesure faibles gradients

Bande passante

B_p



Dérive oscillateur

Variation spatiale du gradient de force :

Optimisation des paramètres expérimentaux

V Mesure absolue d'un gradient de force

- Comment obtenir une **mesure absolue** ?
- Sources d'erreur de l'étude
- Performances ?
- Perspectives : Effet de couche mince

Développement instrumental

Sensibilité α , distance absolue

Conditions requises ?

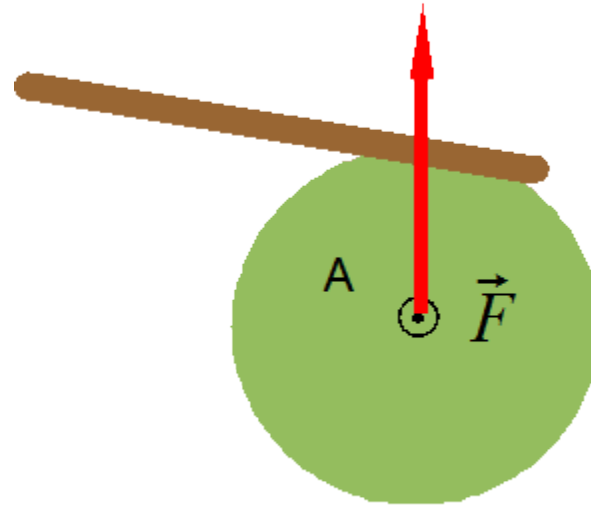
Précision mesure < qq % ?



$$\frac{\partial F}{\partial z} = \alpha \Delta f_{res}$$

force de référence / $F_{Casimir}$

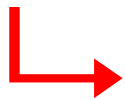
- Précision modèle de force
- Même contrainte mécanique



En A

$$\vec{F} \rightarrow e_z \rightarrow$$

$$M = 0$$



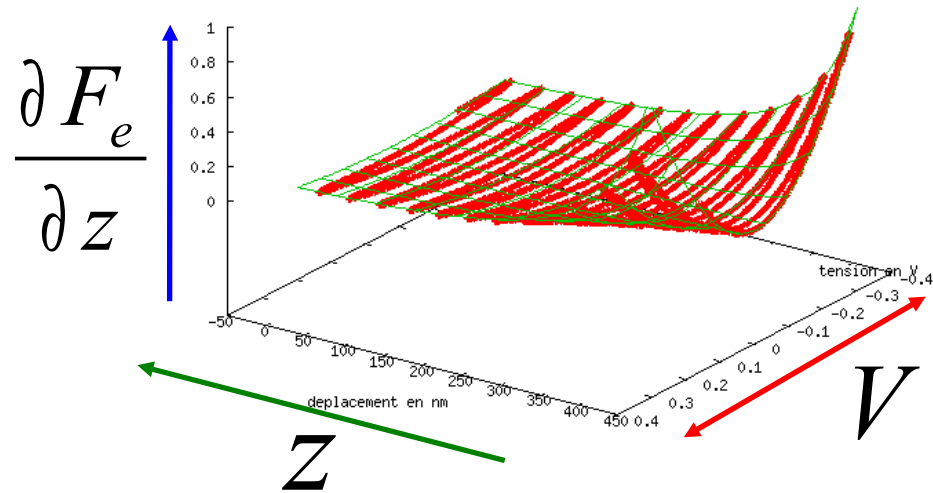
= forces comparables

Force électrostatique

Géométrie sphère/plan

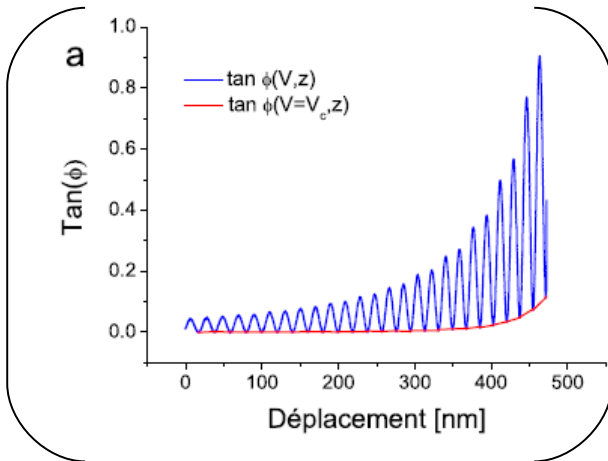
Force électrostatique

comparaison modèle / expérience

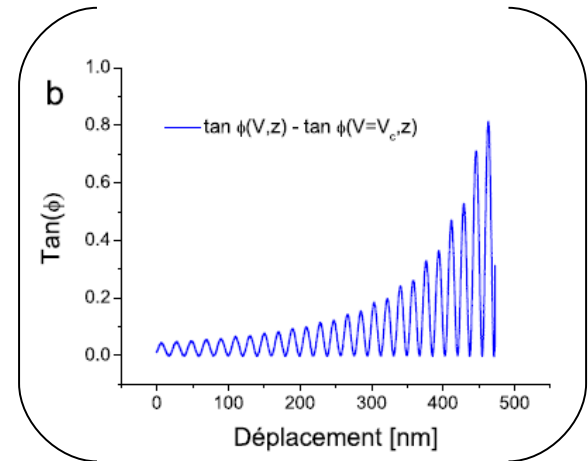


Pour $R \sim 20 \mu\text{m}$, $z < 500 \text{ nm}$
Précision $< 1 \%$

$$\frac{\partial F_e}{\partial z} = \pi \epsilon_0 R \frac{V^2}{z^2}$$



■ « Casimir » =



Ensuite Calibration de la sonde

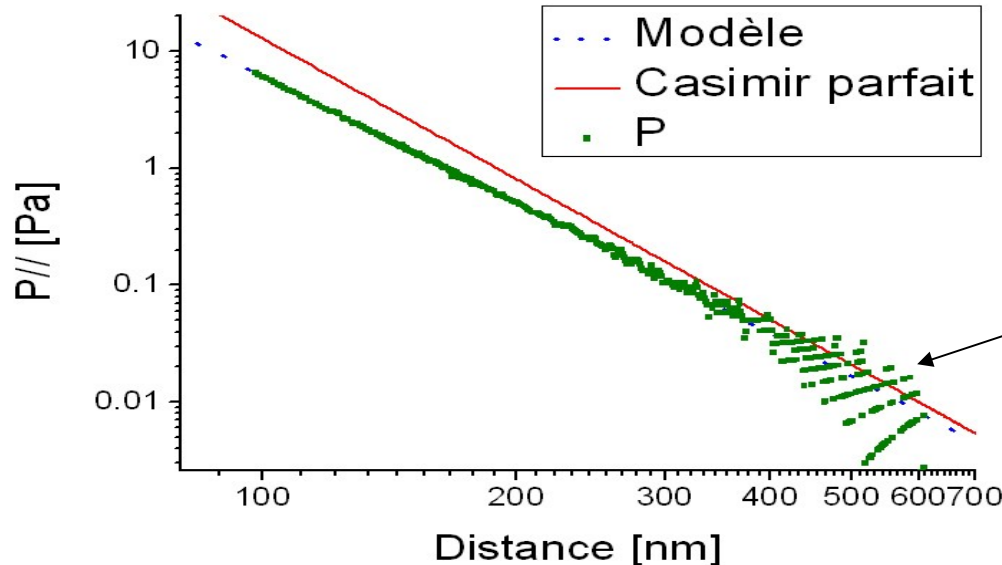
$$\frac{F'_{Cas}}{2\pi R} = P_{Cas} //$$

$$\frac{F'_e}{2\pi R} = \frac{\epsilon_0}{2} \frac{V^2}{z^2} = \alpha df_{res}$$

Modèle à tester
A. Lambrecht et al

$$\frac{F'}{2\pi R} = \alpha df_{res}$$

Ajustement sans
Rayon de la sphère



Limitée
par
le mvt brownien

Modèle &
Évaluation

Dispersion 5 %
 $\epsilon(\omega)$ or

Origines désaccord

Préparation
sonde / échantillon

Géométrie sphère/plan parfaite?

Sources d'erreurs

Mesure

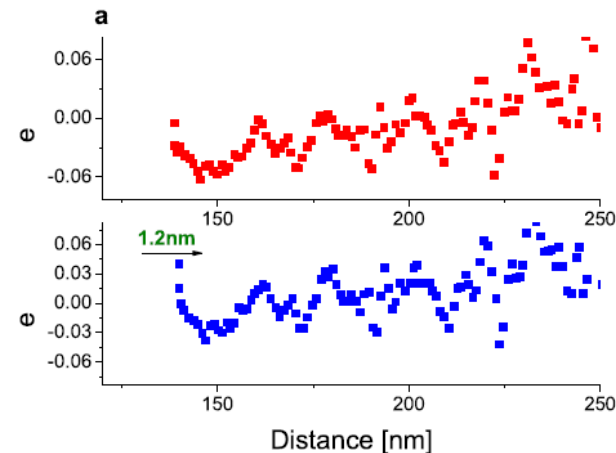
Précisions expérimentales :
• Position 1 à 2 nm
• Sensibilité 1-2 %

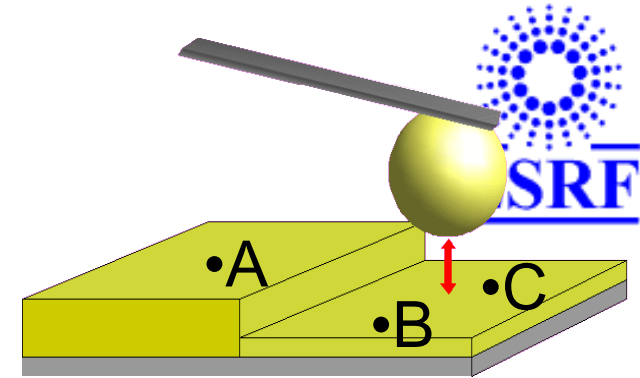
Erreurs systématiques dominantes

Écart 0 à 6 % →

Translation 1.2 nm ou 3 % sur α ou $\epsilon(\omega)$

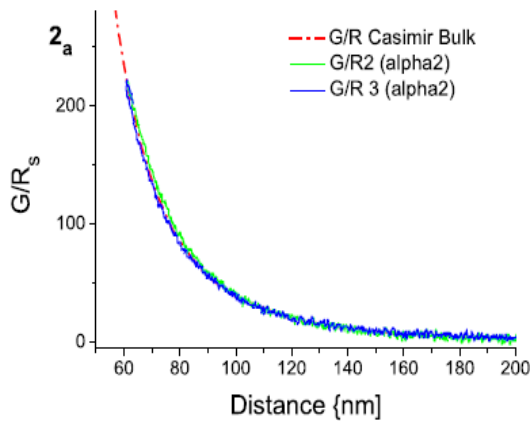
Écart -3 à 3 % →



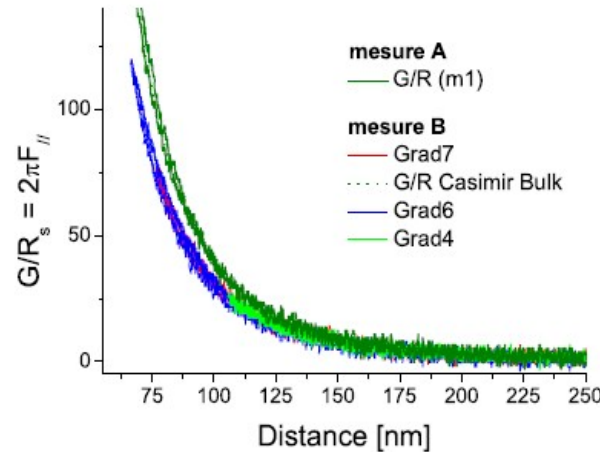


1- Etude en configuration de couches minces :

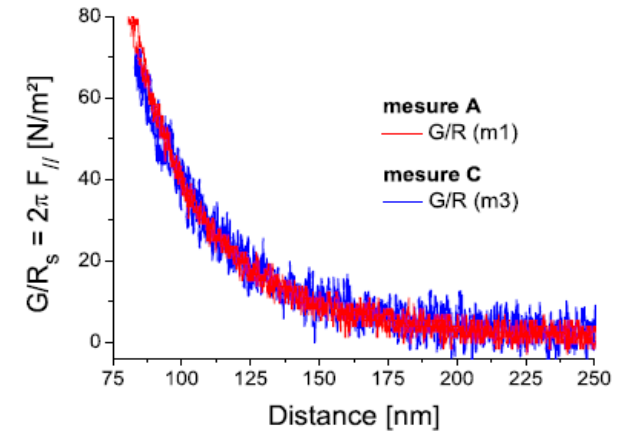
Mesure A



Mesure B



Mesure C



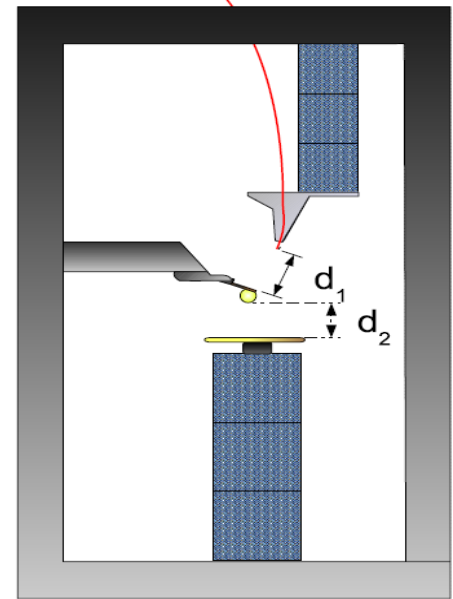
Désaccord A et B?

- > erreurs expérimentales : écart bien réel
- quel échantillon, quelle constante diélectrique...? (analyse en cours)

Perspectives

Développements instrumentaux

1- Pb majeur de l'étude : dérives mécaniques



- $T = 300\text{ K}$: stabilisation T, capteur position sonde/surface
Wilfrid Schwartz

- $T = 4\text{ K}$: dérives plus faibles, résolution en force meilleure
Alexis Mosset

2- Contrôle déplacement

translateur piézo asservi en position ($< 1\text{ nm}$)



Remerciement

Joël Chevrier et Astrid Lambrecht

Préparation des sondes : *Simon Le Denmat, Irina (MEB), Khaled*

Casimir Team : *Gauthier, Justine, Wilfrid, Alexis*

Equipe ESRF : *Fabio Comin, Florence, Alessandro, Mario, Olivier, Michal Sönke Timothée Monique Emilie Raphaëlle*

Equipe Spectro : *Serge Huant, Frederico, Benoit, Hermann, Thierry, Jean François, Yannick*

Equipe LKB :

Serge Reynaud, Brahim, Francesco, Irina, François Xavier, Rémy

Les Membres du (ex)LEPES

Mes Parents, mon frère et ma soeur (& beaux), mes nièces

Et puis tous les amis : *Morgan & Thomas (Nos soirées et sorties d'escalade, débats de physique aussi...)*

Amis de Grenoble, Lyon, Paris, Cachan, Mexico et d'ailleurs

Pascalo & Rogers + B122 G.Loose ;-)

Ernesto (Kingstown)