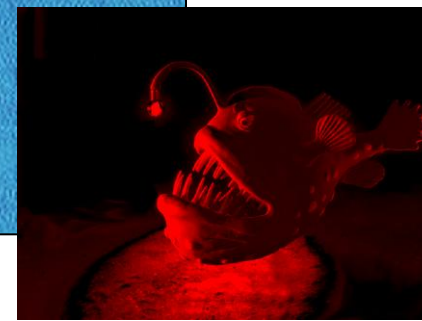
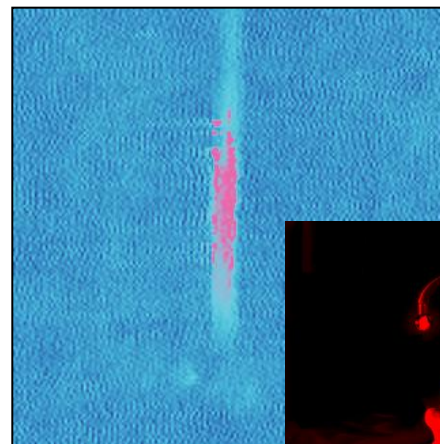
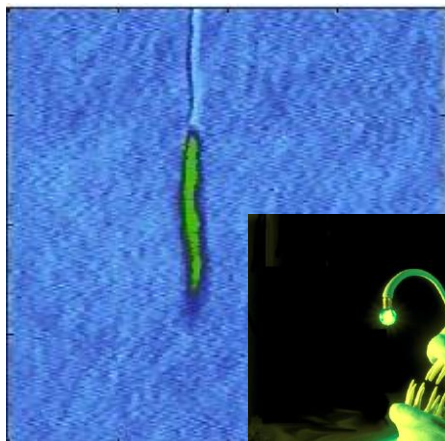


# Contact intermittent (AM-AFM) Courbes approche-retrait

Matthieu George



# Références

Les Microscopies de Force,  
C. Fretigny

Microscopie de Force Dynamique,  
J-P. Aimé, R. Boisgard, G. Couturier

Nonlinear dynamical properties of an oscillating tip-cantilever system in the tapping mode, L. Nony, R. Boisgard et J.P. Aimé, Journal of Chem. Phys. 111, 1999

Dynamic atomic force microscopy methods, R. Garcia, R. Perez, Surface Science Reports 47, 2002



# **Contact intermittent (AM-AFM)**

## **Courbes approche-retrait**

**1. Principe et intérêt**

**2. Oscillateur Harmonique Forcé Amorti**

**3. En présence de la surface**

**3.1 CAR et bi-stabilité de la solution**

**3.2 Phase et énergie dissipée**

**4. Exemples d'application**

**Conclusion - Perspectives**

# Terminologie

Modes dynamiques :

régulation sur l'amplitude → AM-AFM

régulation sur la fréquence → FM-AFM

En AM-AFM, deux modes de fonctionnement

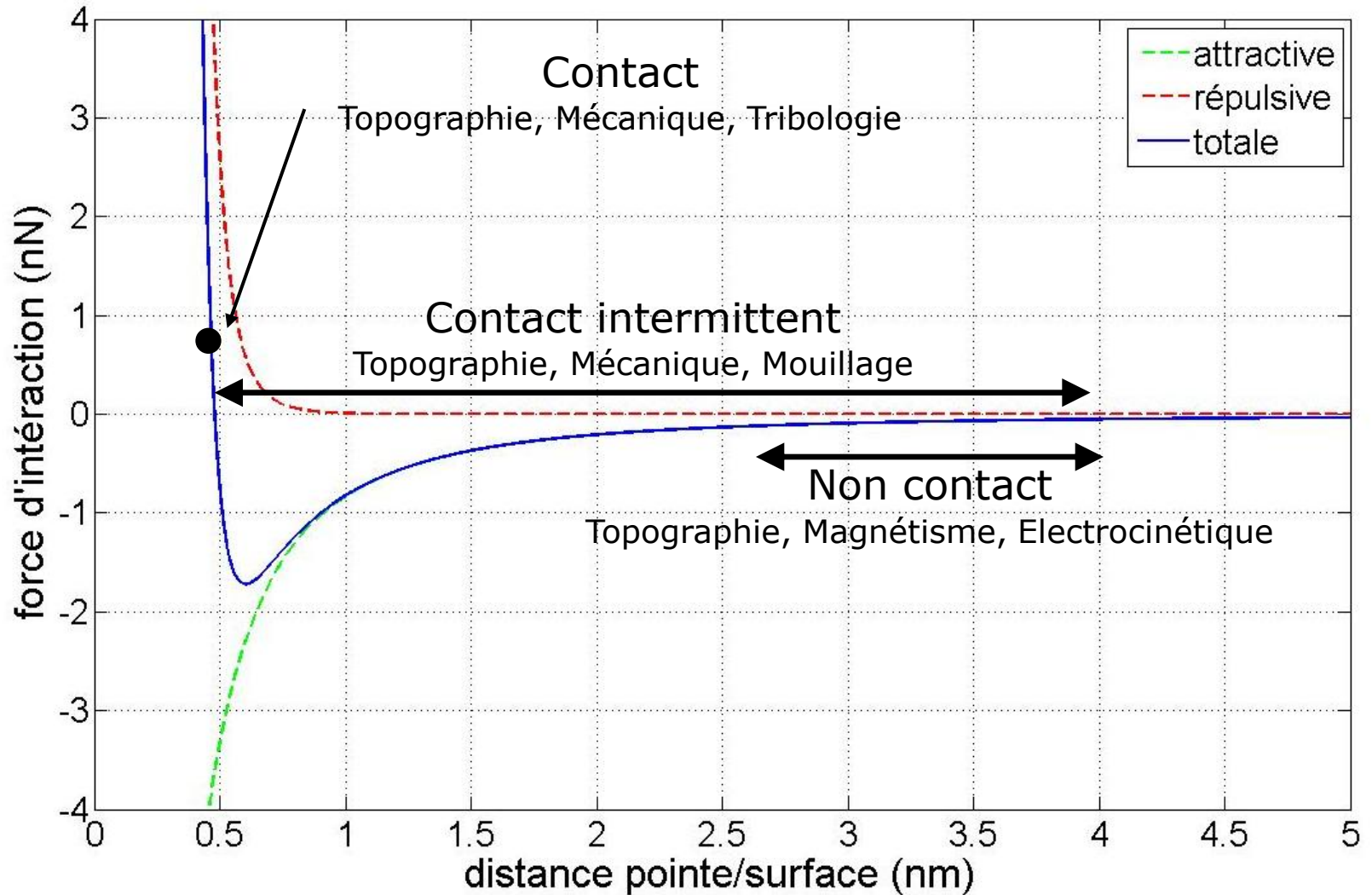
Contact Intermittent (Tapping<sup>©</sup>)

➡ la pointe ressent les forces attractives et répulsives au cours des oscillations

Non-Contact

➡ la pointe ne ressent que les forces attractives

# Modes de fonctionnement



# Interêt du mode AM-AFM



Contact intermittent :

reduction du cisaillement pointe/surface  
moins d'endommagement de la pointe et  
de la surface

Mode dynamique : plus d'informations sur  
les interactions pointe-surface (y compris  
répulsives)

Mode expérimental facile à mettre en place

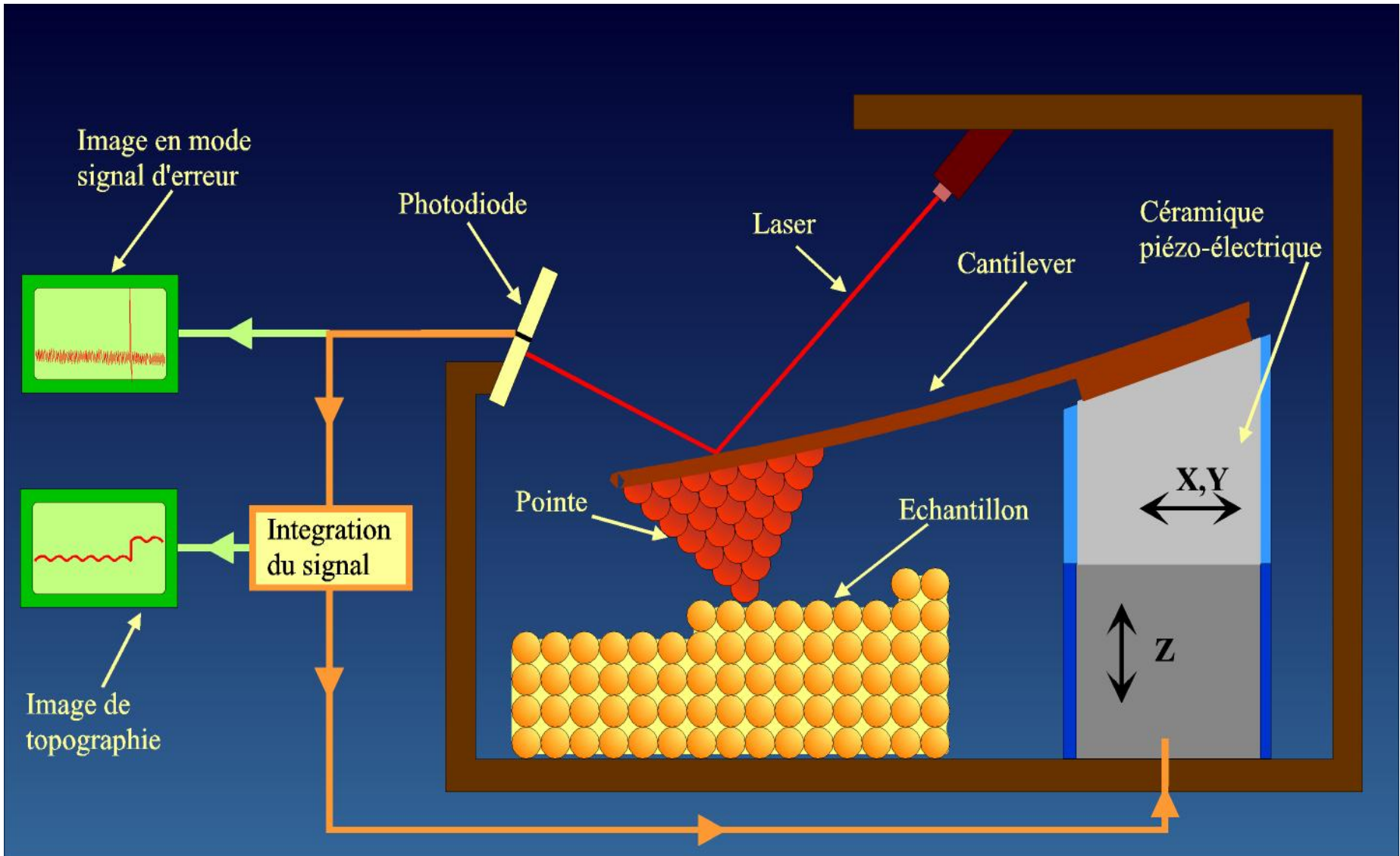


Vitesse de scan limitée : c'est lent!

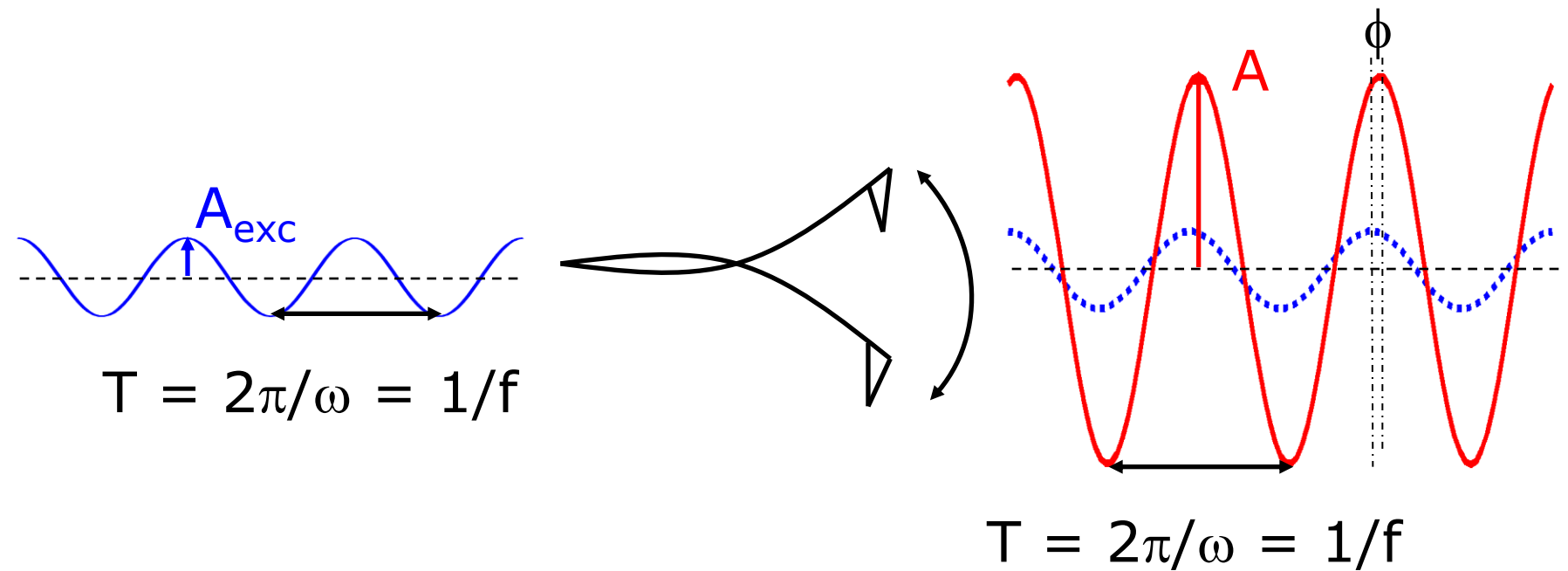
Complexité de l'analyse

Non adapté au vide → FM-AFM

# Principe de fonctionnement



# Principe de fonctionnement AM-AFM



- ✓ Excitation à une fréquence fixée  $f$  proche de la résonance ( $f \sim 300$  kHz)
- ✓ Amplitude d'excitation fixée
- ✓ Retro-action pour garder l'amplitude de réponse constante



# L'oscillateur harmonique forcé amorti

Equation du mouvement :

$$\ddot{z} + \beta\dot{z} + \omega_0^2 z = A_{exc}\omega^2 \cos(\omega t) \quad \omega_0 = \sqrt{k/m}$$

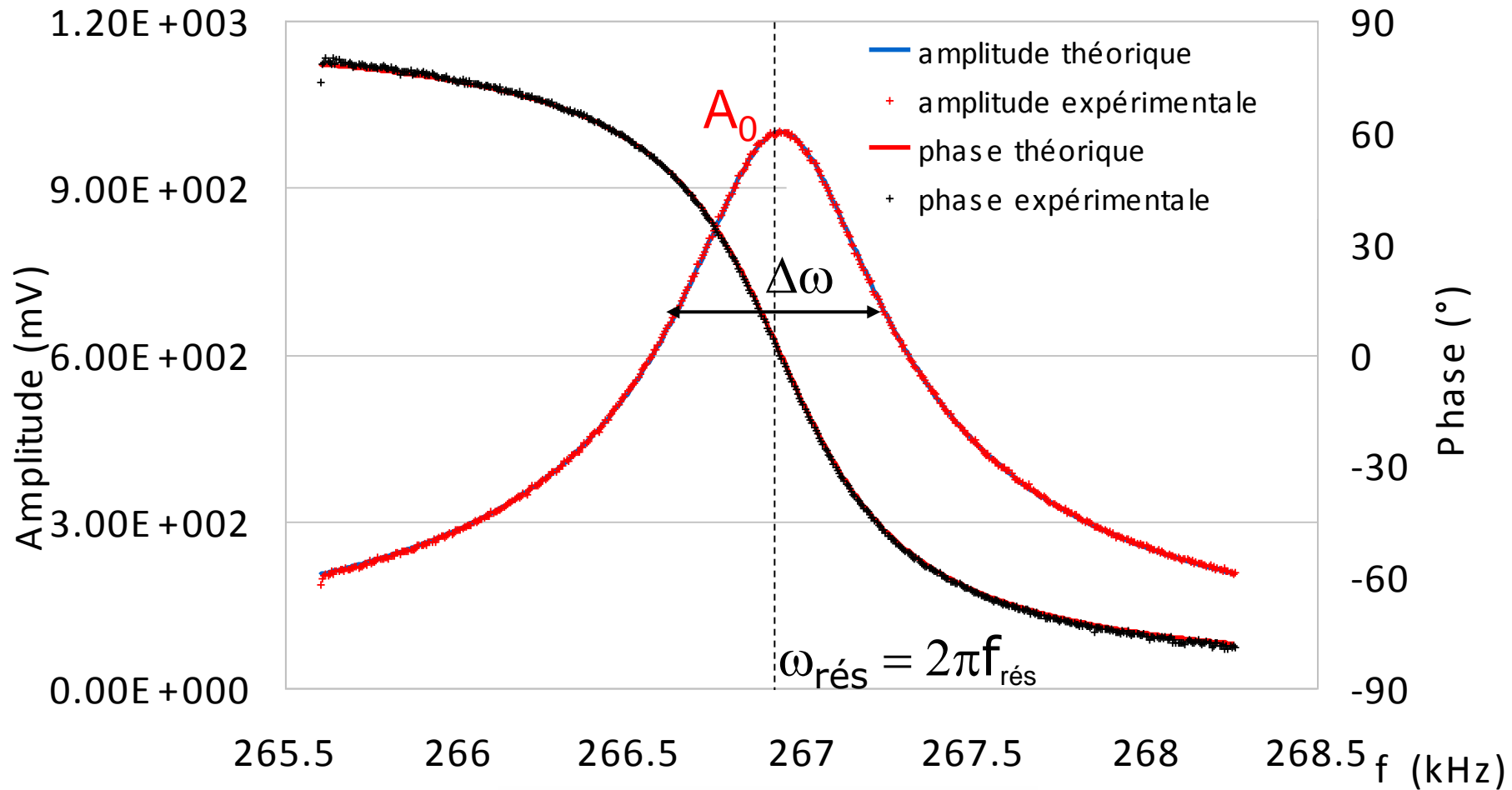
Solution :

$$z(t) = \underbrace{be^{-\beta t/2} \cos(\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2/4}t + \alpha)}_{\text{transitoire}} + \underbrace{A(\omega) \cos(\omega t + \phi)}_{\text{stationnaire}}$$

Avec, amplitude  $A(\omega) = \frac{A_{exc}\omega^2}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \beta^2\omega^2}}$

phase  $\tan(\phi) = \frac{\beta\omega}{\omega^2 - \omega_0^2}$

# Courbe de résonance



$$\omega_{rés} = \sqrt{\omega_0^2 - \frac{\beta^2}{2}}$$

# Facteur de qualité et transitoire

## Facteur de qualité

$$Q = \frac{\omega^2 + \omega_0^2}{2\beta\omega}$$

Pour  $\omega$  proche de  $\omega_0$ ,

$$Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega} \quad Q = \frac{\omega_0}{\beta} \quad \text{et} \quad A_0 = Q A_{exc}$$

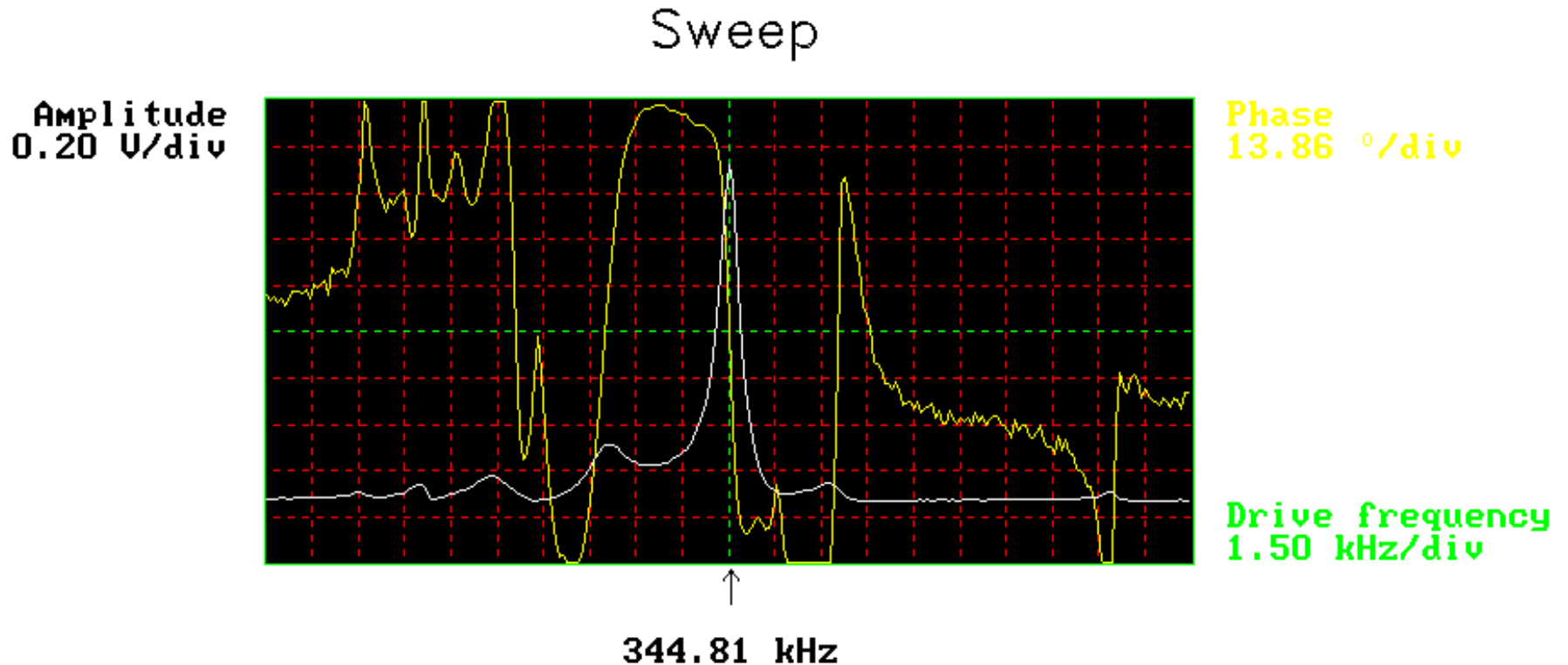
## Temps caractéristique du transitoire

$$\tau = \frac{2}{\beta} = 2 \frac{Q}{\omega_0}$$

avec  $Q = 600$  et  $f_0 = 300$  kHz,  $\tau = 0,6$  ms

→ Vitesse de scan

# Courbe de résonance

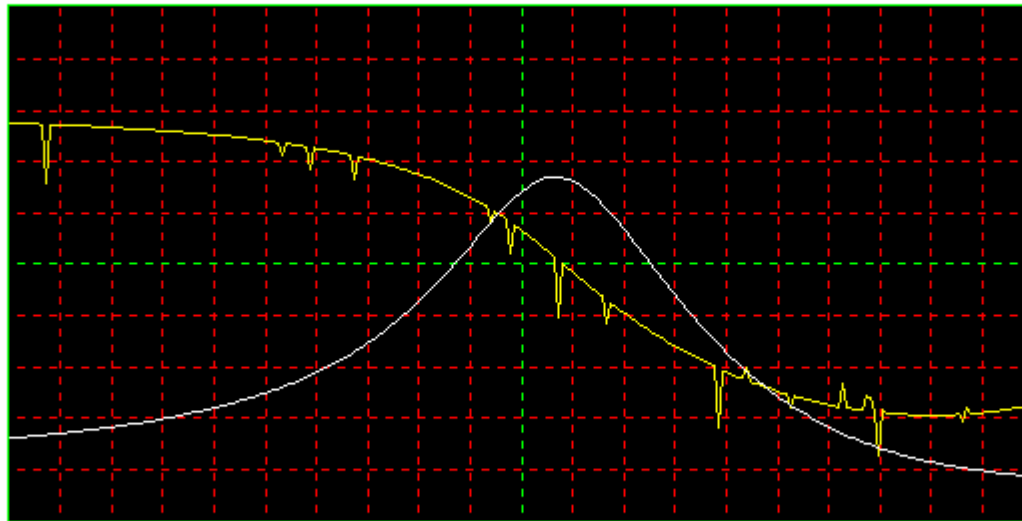


Excitation "bancale" → An-harmonicité de la réponse  
➔ Excitation améliorée : magnétique, ...  
➔ Fixer la pointe avec du collodion

# Courbe de résonance

Sweep

Amplitude  
0.20 V/div



Phase  
39.96 °/div

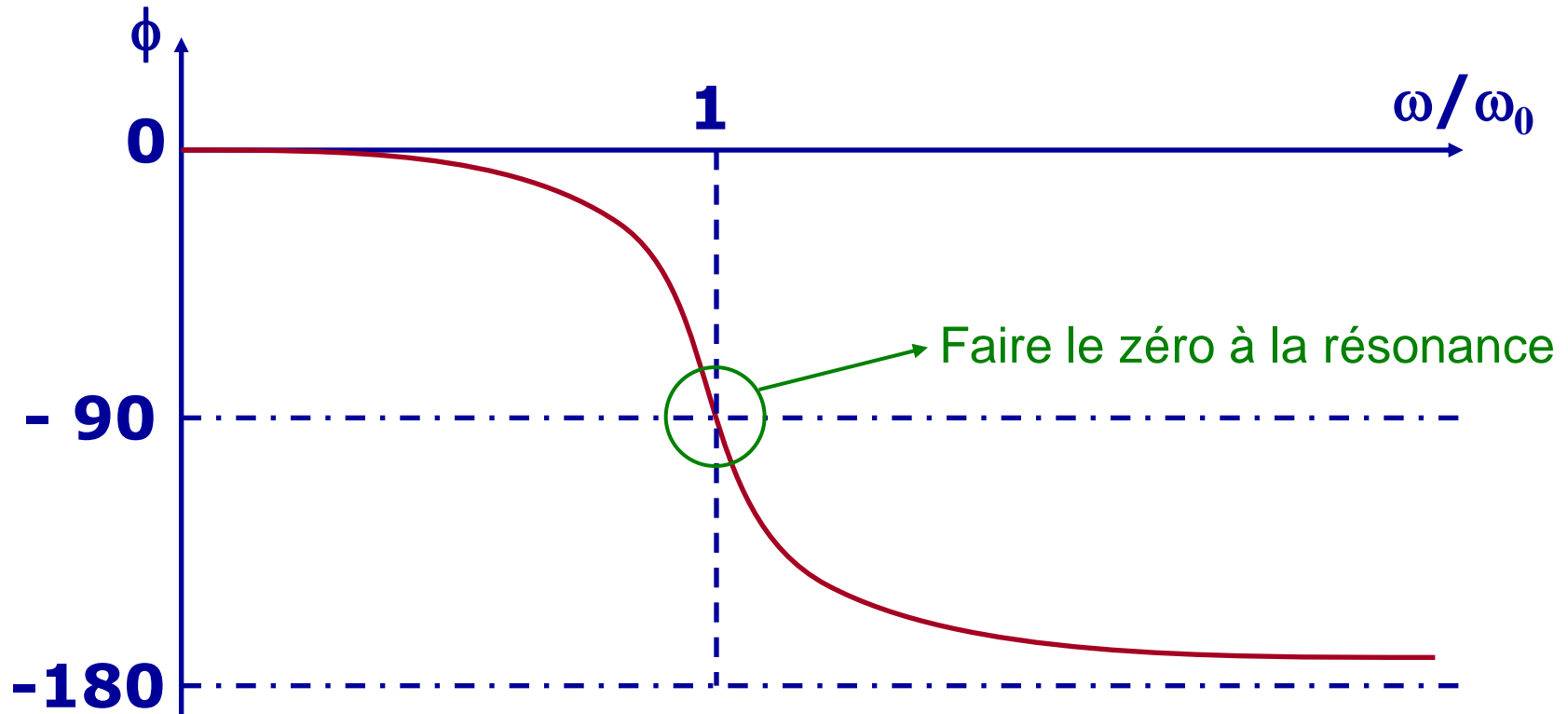
Drive frequency  
0.15 kHz/div

↑  
344.66 kHz

Excitation "bancale" → An-harmonicité de la réponse  
➔ Excitation améliorée : magnétique, ...  
➔ Fixer la pointe avec du collodion

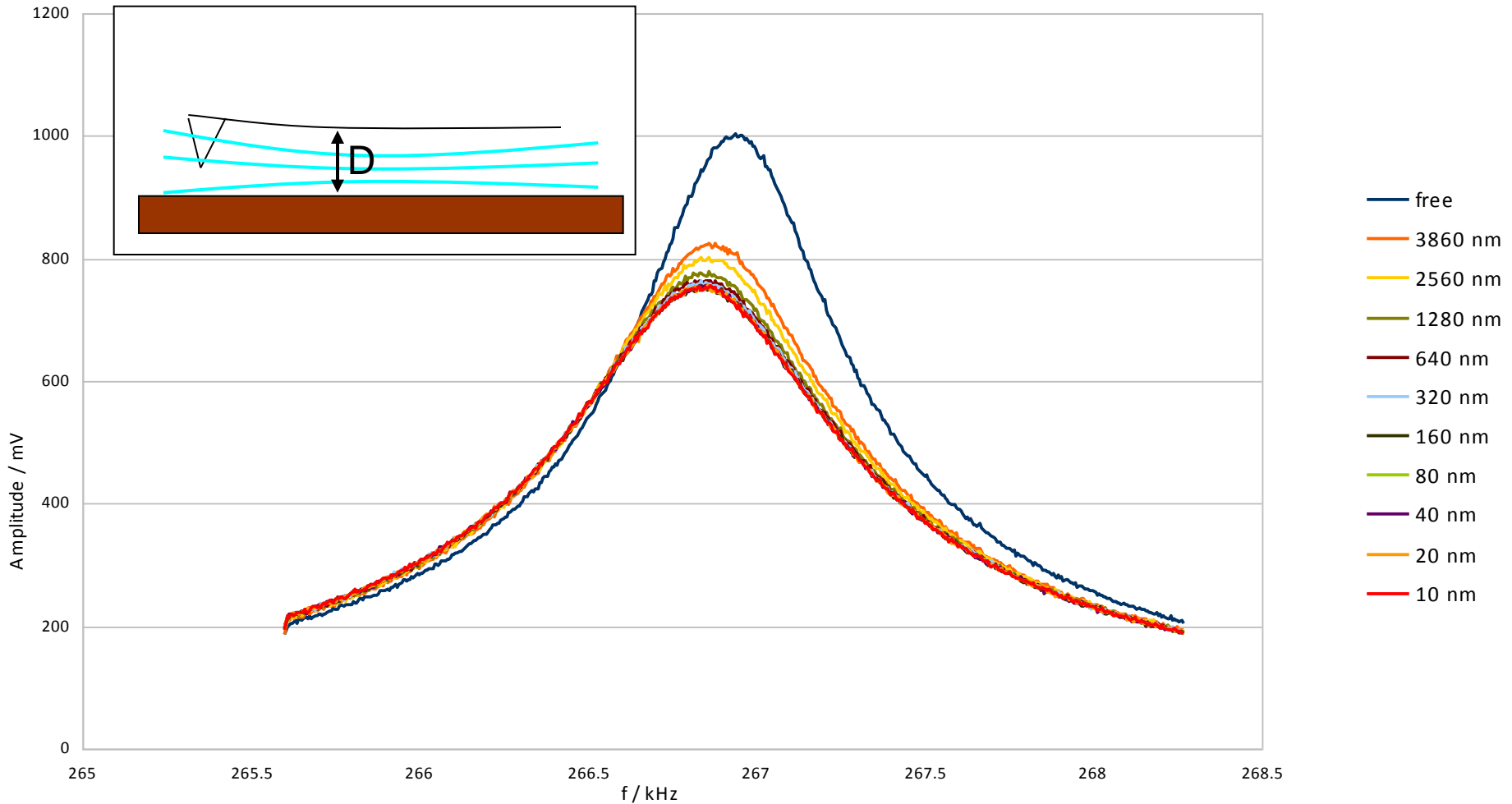
# Mesures de la phase, conventions et zéro

$$Z(\omega, t) = A(\omega) \cos(\omega t + \phi(\omega))$$



**Attention à la convention de signe !**

# Effet coussin d'air

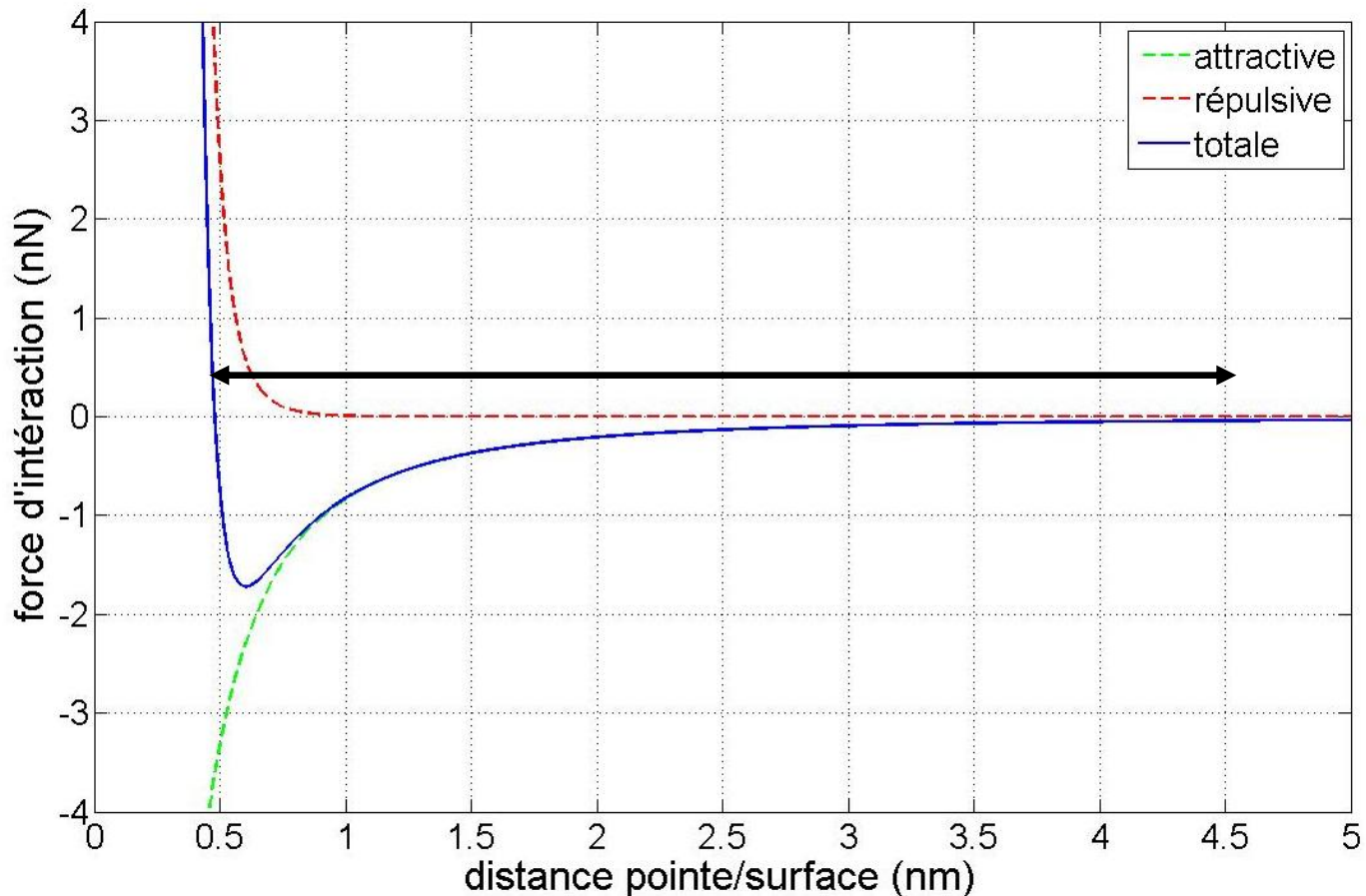


$$Q(D) = \frac{Q_0}{1 + \epsilon(D)}$$

$$\epsilon(D) = \frac{\alpha}{D_1 + D}$$

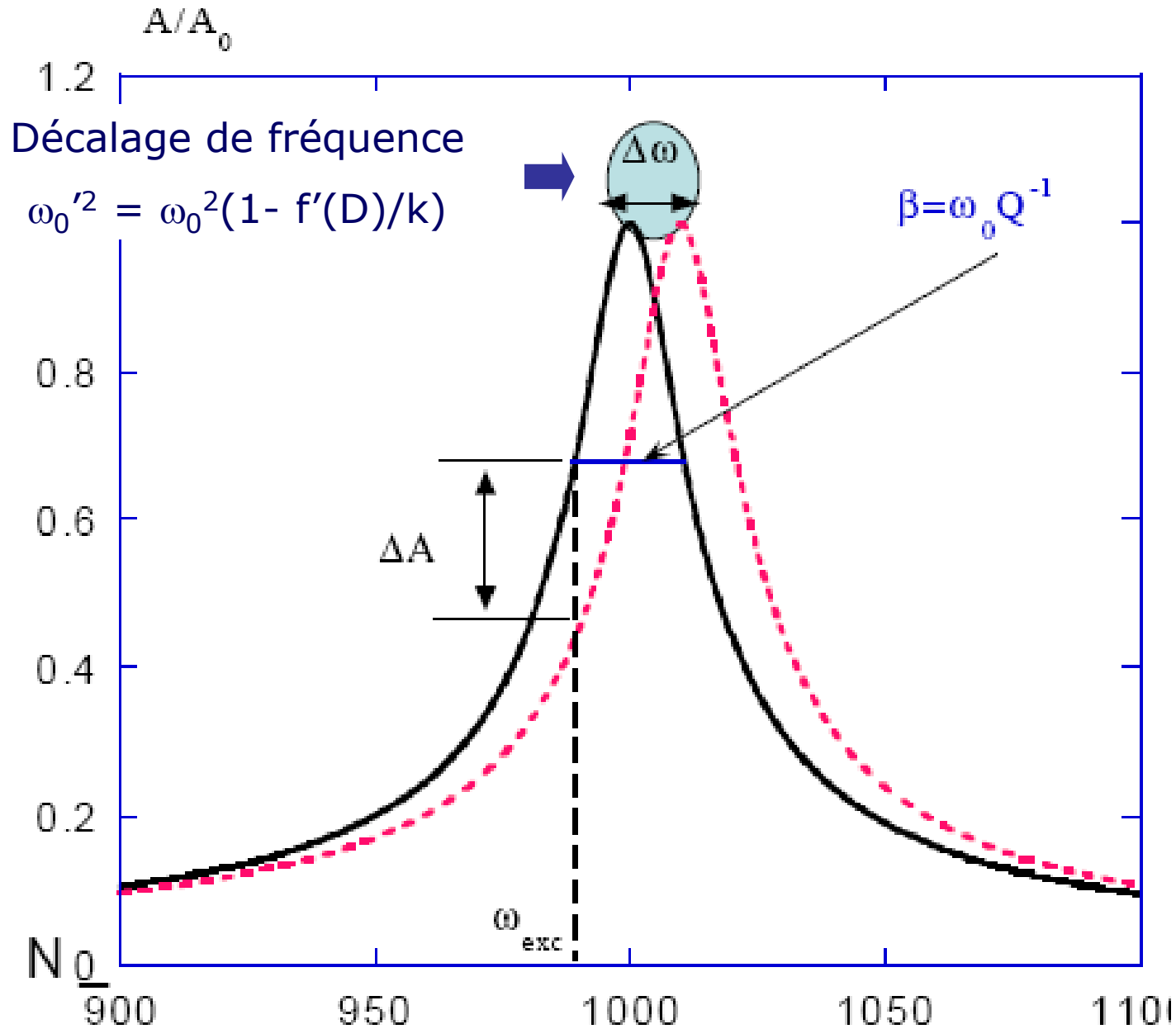
# En présence de la surface

$$\ddot{z} + \beta\dot{z} + \omega_0^2 z = A_{exc}\omega^2 \cos(\omega t) + \frac{f(D, t)}{m}$$

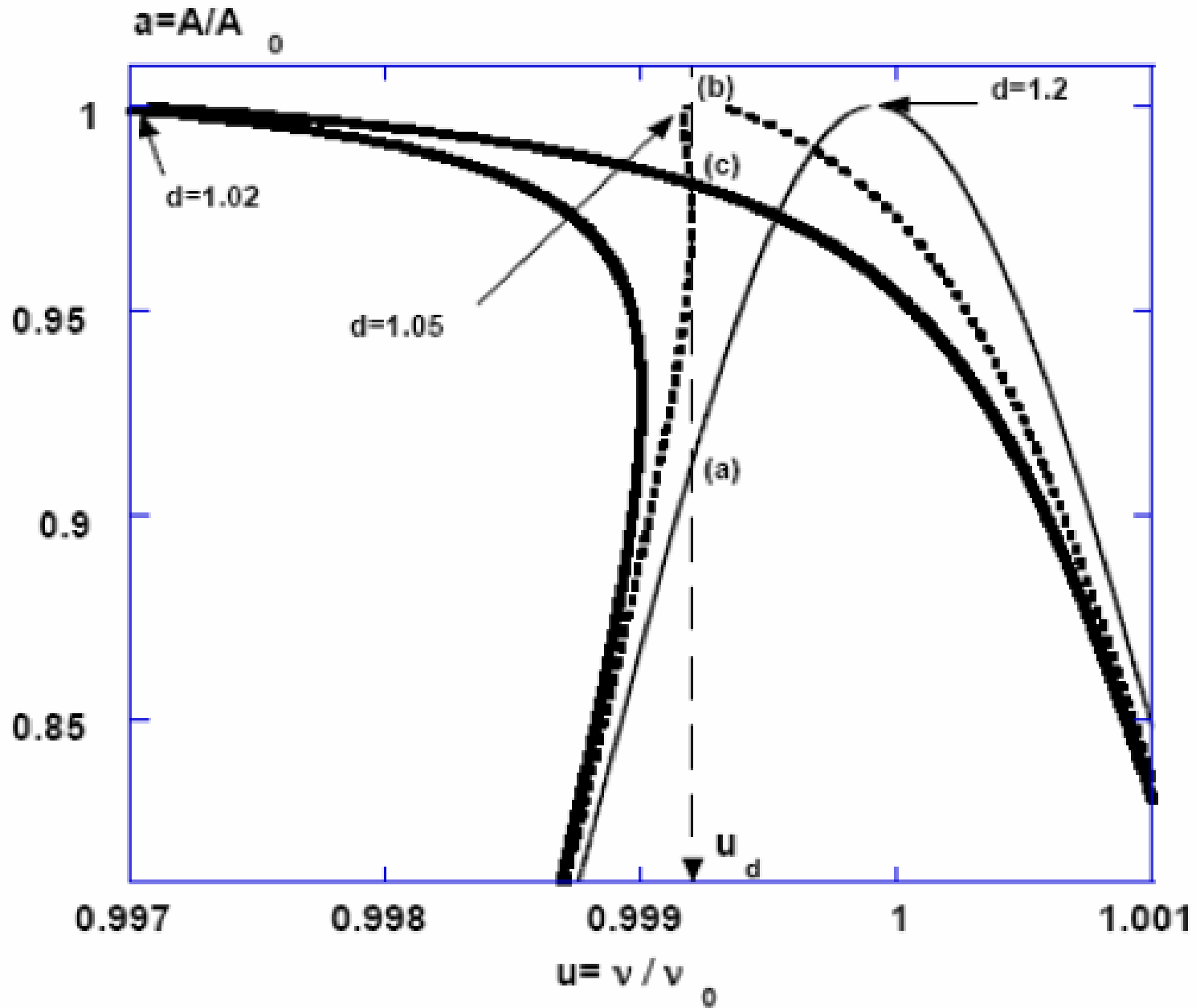




# Effet linéaire de la force d'interaction



# Effet non linéaire



# Effet non linéaire : mise en équation

✓ Principe variationnel de moindre action :

$$S = \int_{t_1}^{t_2} L(x, \dot{x}, t) dt \quad L(x, dx/dt, t) = E_c - E_{\text{pot}} - E_{\text{diss}}$$

$$\frac{\partial S}{\partial A} = 0 \quad \frac{\partial S}{\partial \phi} = 0 \quad \longrightarrow \quad 2 \text{ équations avec } A \text{ et } \phi$$

✓ 1<sup>ers</sup> termes de la série de Fourier :

$$f(D, t) = \Phi(D, a) \cos(\omega t + \phi) + \Psi(D, a) \sin(\omega t + \phi)$$

$$\Phi(D, a) + i\Psi(D, a) = \frac{\omega}{\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} f(D, t) e^{i(\omega t + \phi)} dt$$

# Effet non linéaire : mise en équation

$$f(D, t) = \Phi(D, a) \cos(\omega t + \phi) + \Psi(D, a) \sin(\omega t + \phi)$$

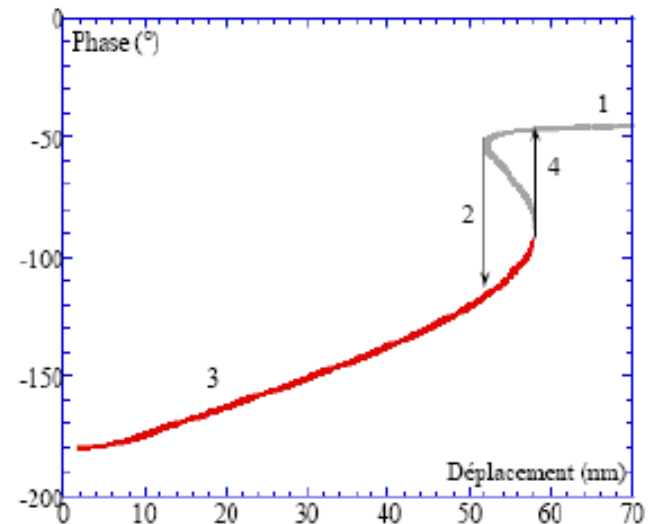
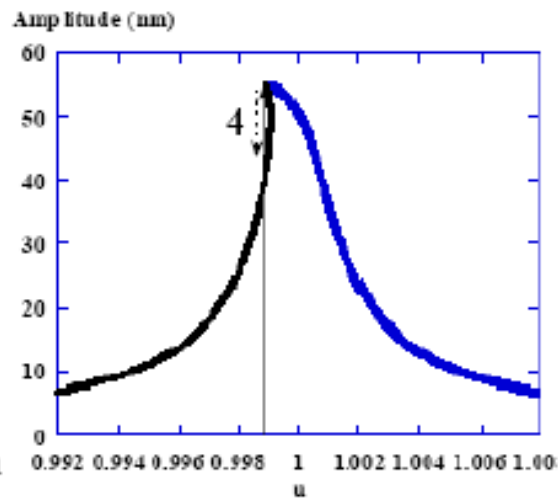
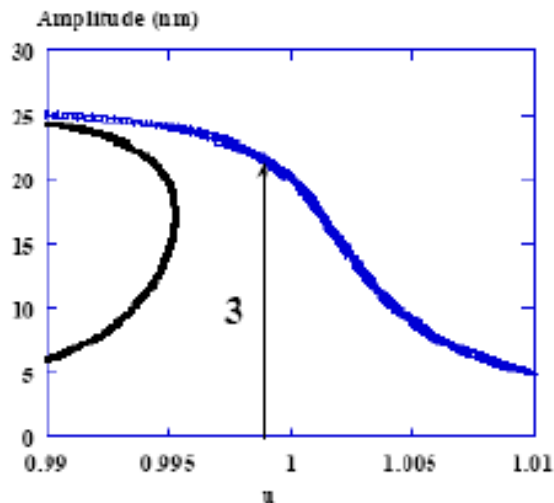
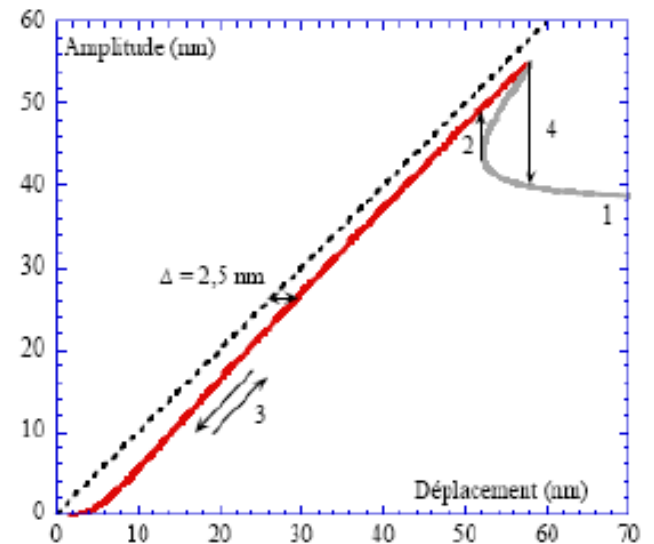
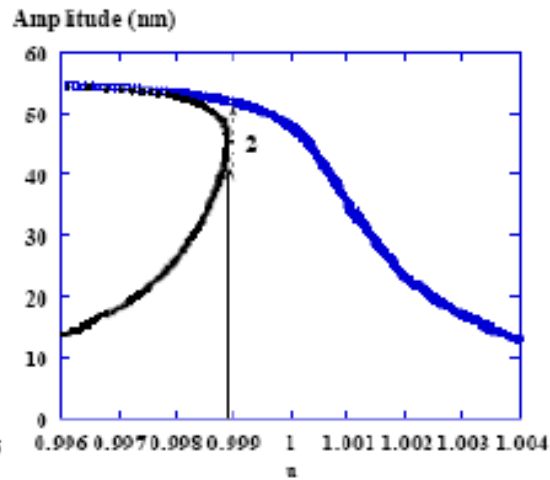
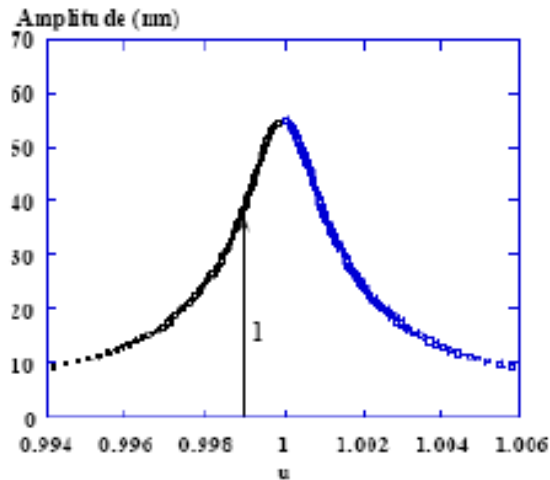
$$\ddot{z} + \beta \dot{z} + \omega_0^2 z = A_{exc} \omega^2 \cos(\omega t) + \frac{f(D, t)}{m}$$

Deux relations données par l'équation de mouvement

$$\begin{aligned} A (\omega_0^2 - \omega^2) &= A_{exc} \cos \phi + \frac{\Phi(D, a)}{m} \\ -A \beta \omega &= A_{exc} \sin \phi + \frac{\Psi(D, a)}{m} \end{aligned}$$

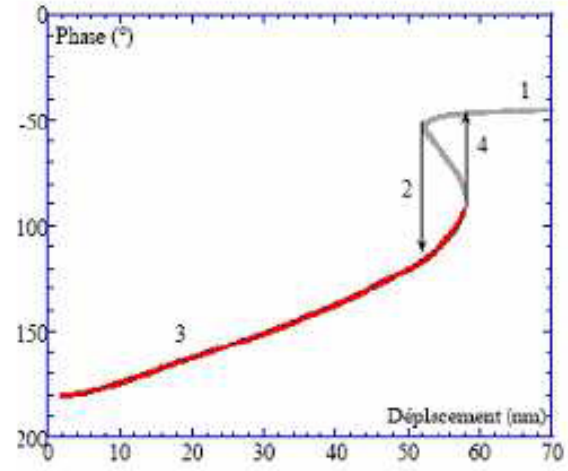
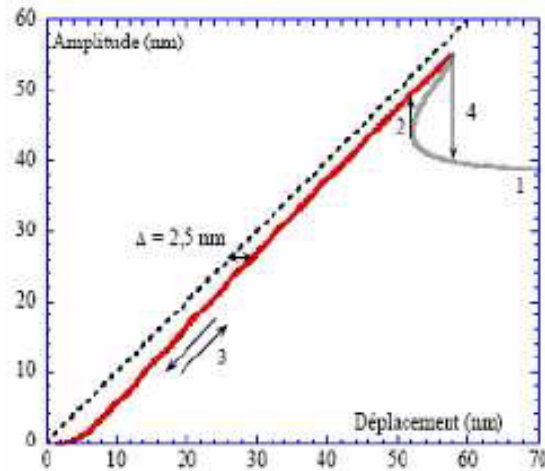
Dans les 2 cas, calcul possible pour une force d'interaction connue

# Force attractive : CAR

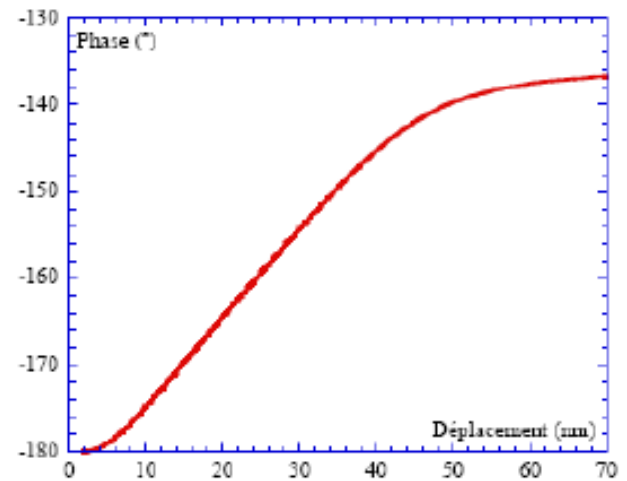
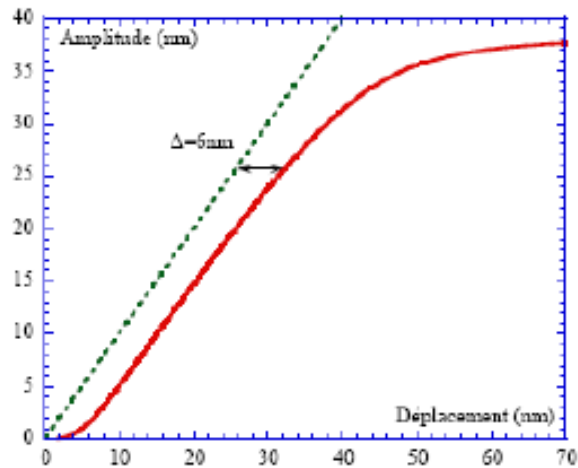


# Choix de la fréquence

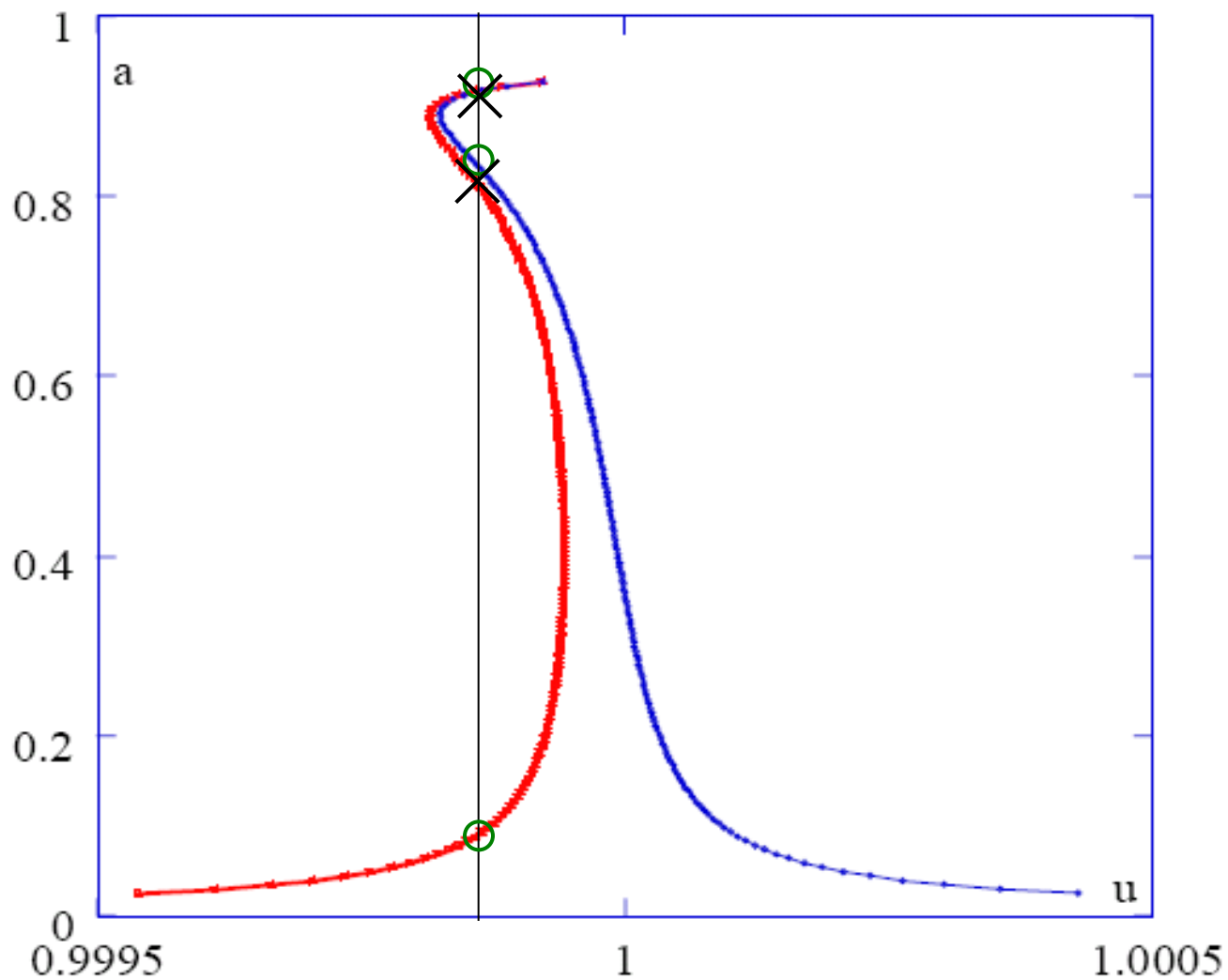
$f < f_0$



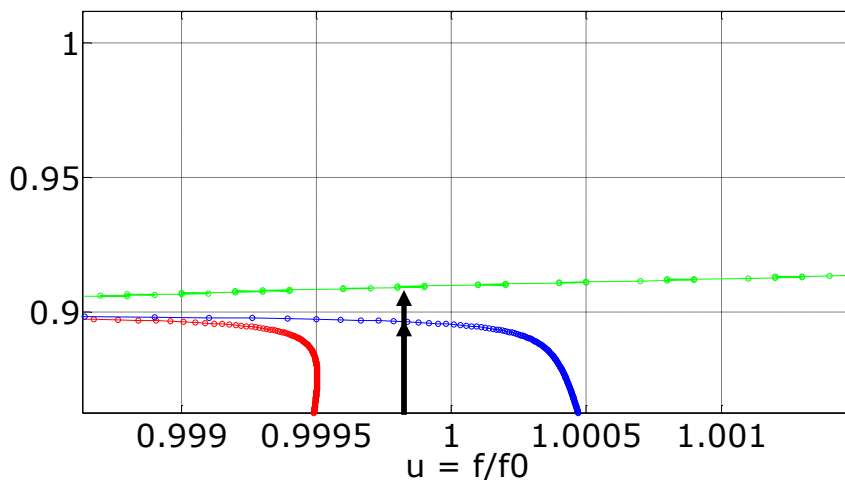
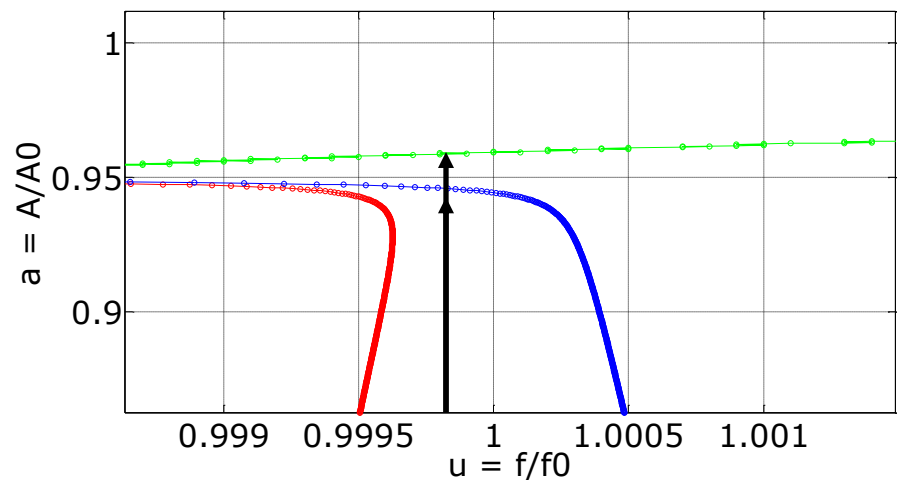
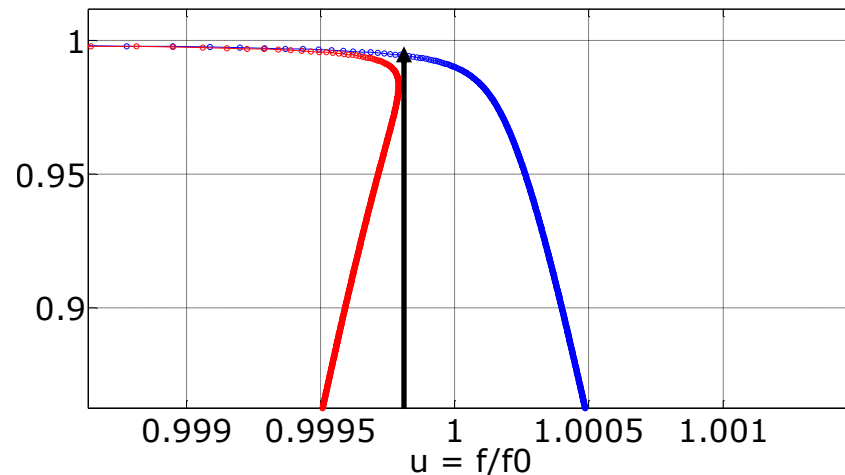
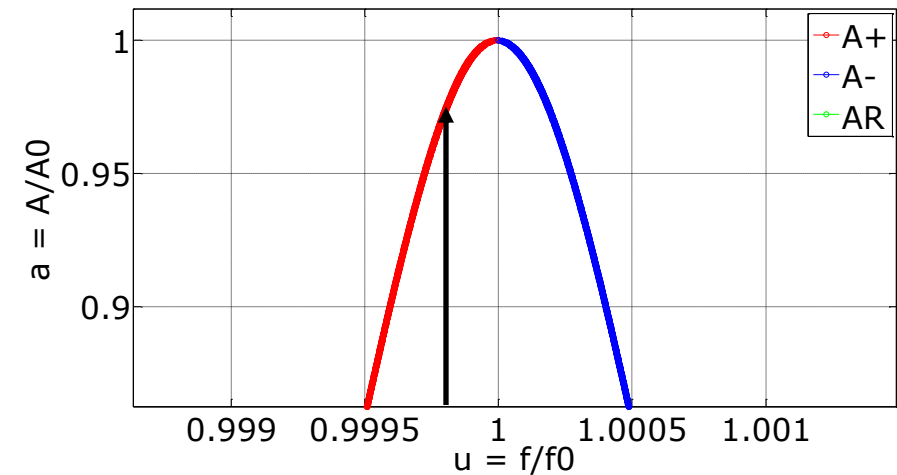
$f > f_0$



# En présence de forces répulsives



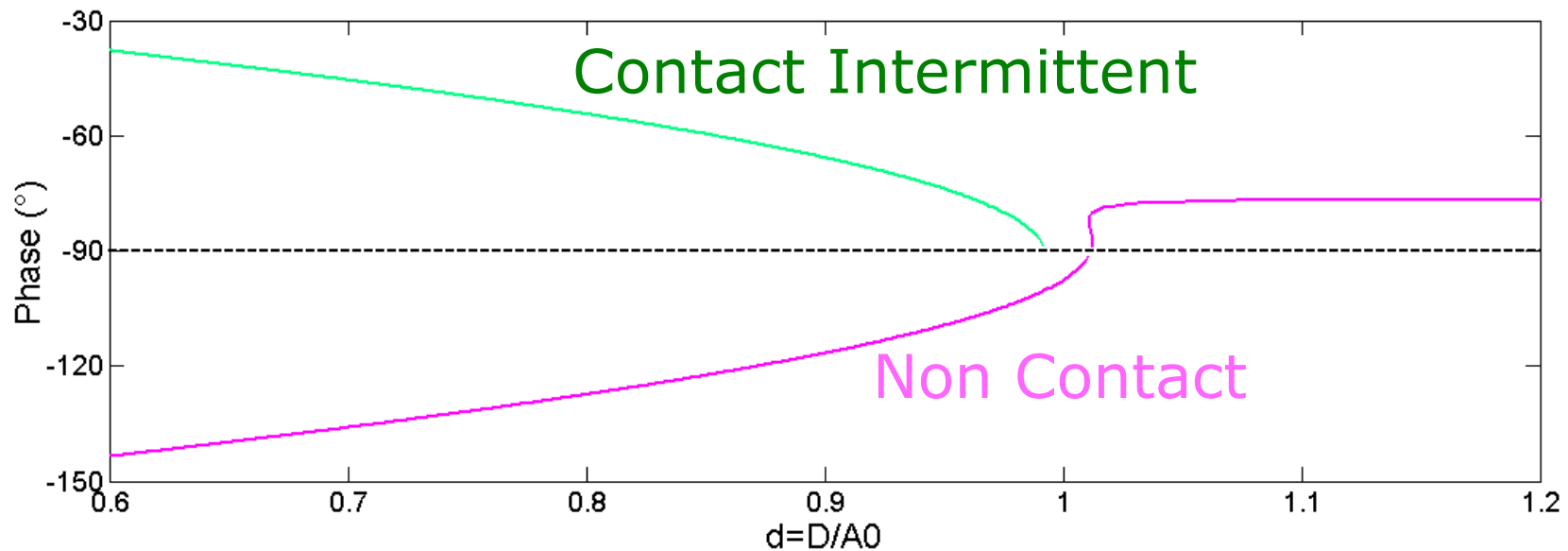
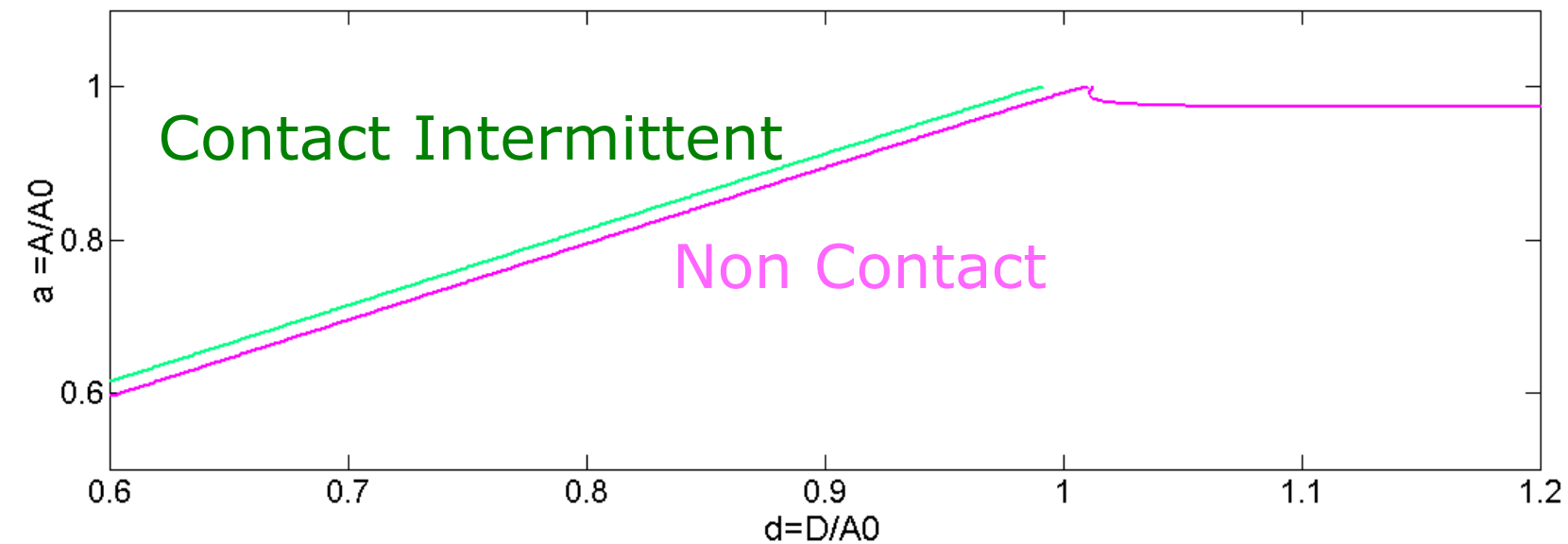
# En présence de forces répulsives



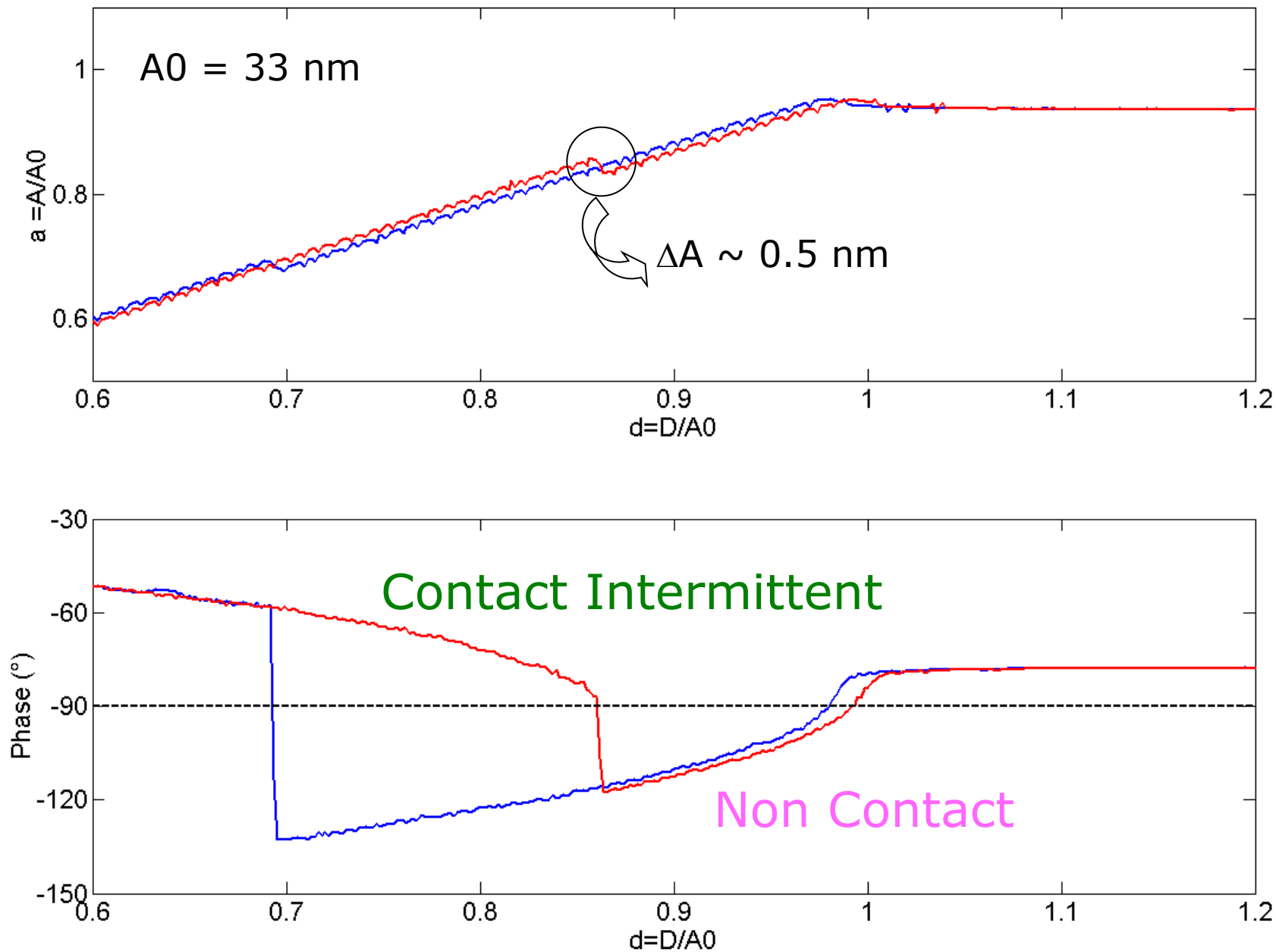
**Bi-stabilité !**



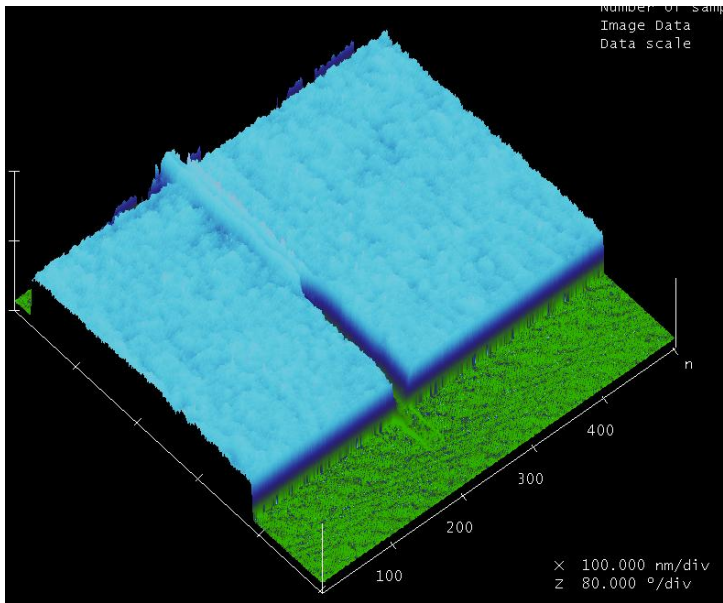
# Bi-stabilité en AM-AFM



# Bi-stabilité en AFM mode tapping



# Contact intermittent ou Non contact ?



Transition du mode IC au mode NC :

- ✓ aléatoire
- ✓ perte de résolution (image floue)
- ✓ mesure quantitative

Passage de NC à IC défavorisé lorsque  $\kappa_A = HR / (\kappa A^3_0) \rightarrow$

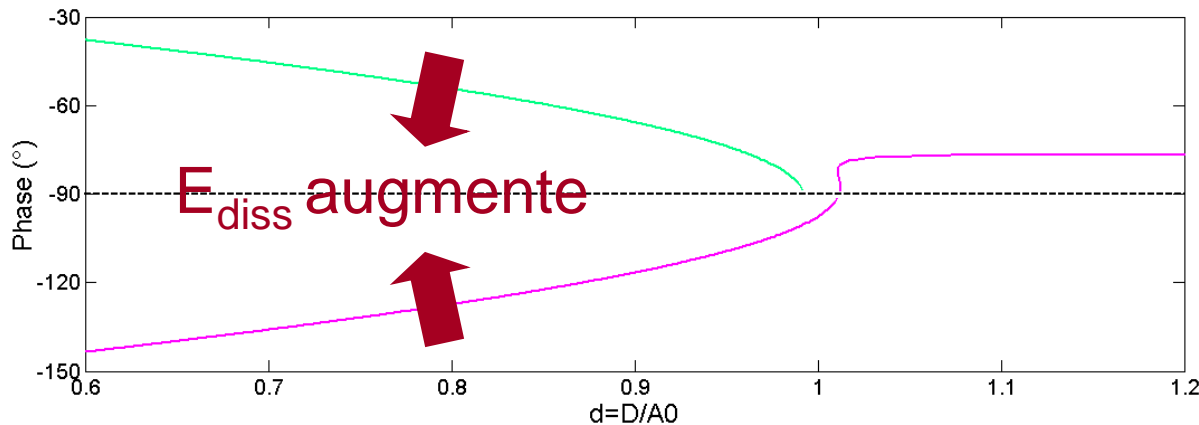
- ✓ H, constante d'Hamaker (intensité de l'adhésion)
- ✓ R, Rayon de la pointe
- ✓ A0, amplitude maximale libre des oscillations

# Phase et énergie dissipée

$$\begin{aligned}
 E_{interaction/cycle} &= \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} f(D, t) \dot{z} dt \\
 &= -\pi A \Psi(D, A) \\
 &= \pi m A_{exc} \omega^2 A \left( \frac{\beta \omega a}{A_{exc} \omega^2} + \sin \phi \right) \\
 &= \frac{\pi k A}{Q} \left( A \frac{\omega}{\omega_0} + A_0 \sin \phi \right) \quad \text{pour } \omega \text{ proche de } \omega_0
 \end{aligned}$$

Energie amortie dans l'air >0

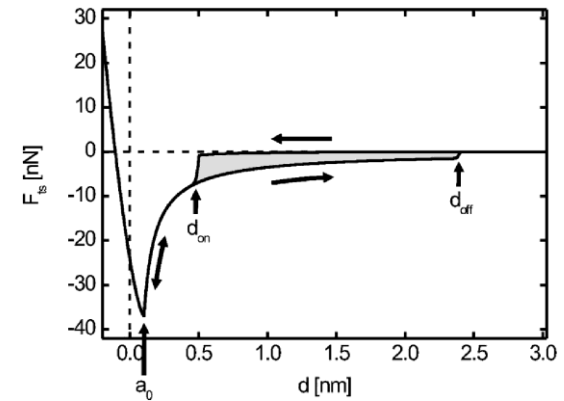
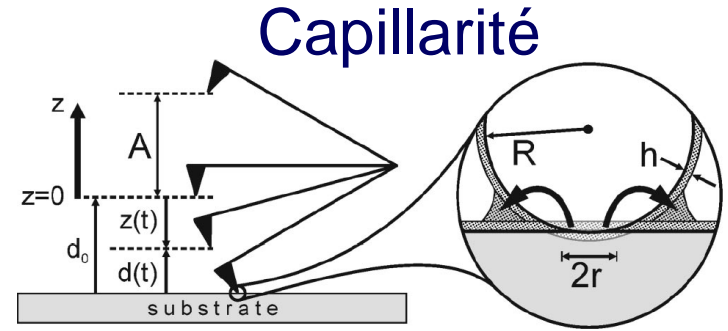
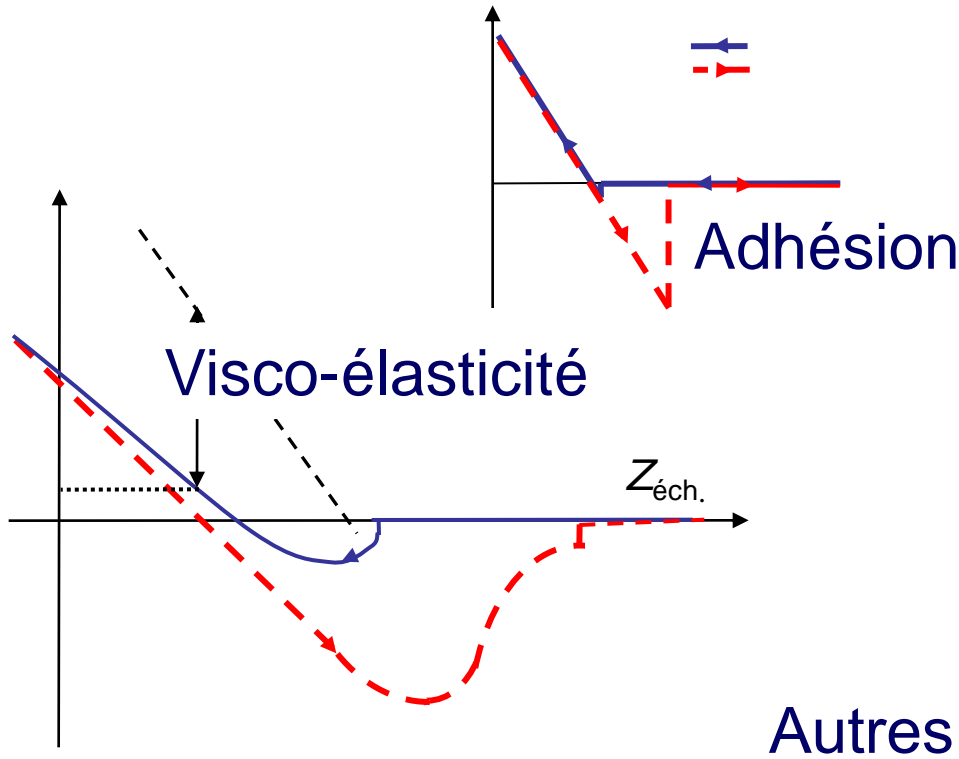
Energie fournie à l'oscillateur <0



$\phi \rightarrow -90^\circ$

$E_{diss}$  augmente

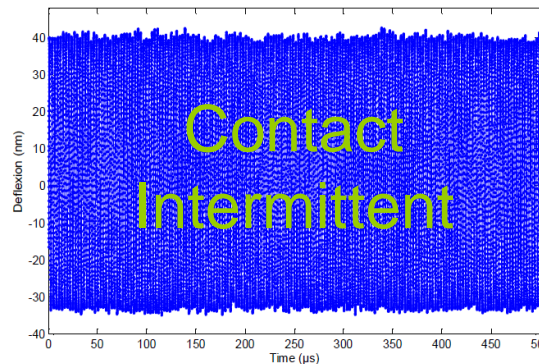
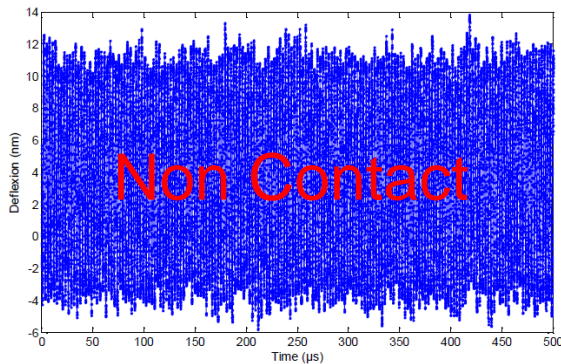
# Sources de la dissipation ?



Zitzler et al., PRB (2002)

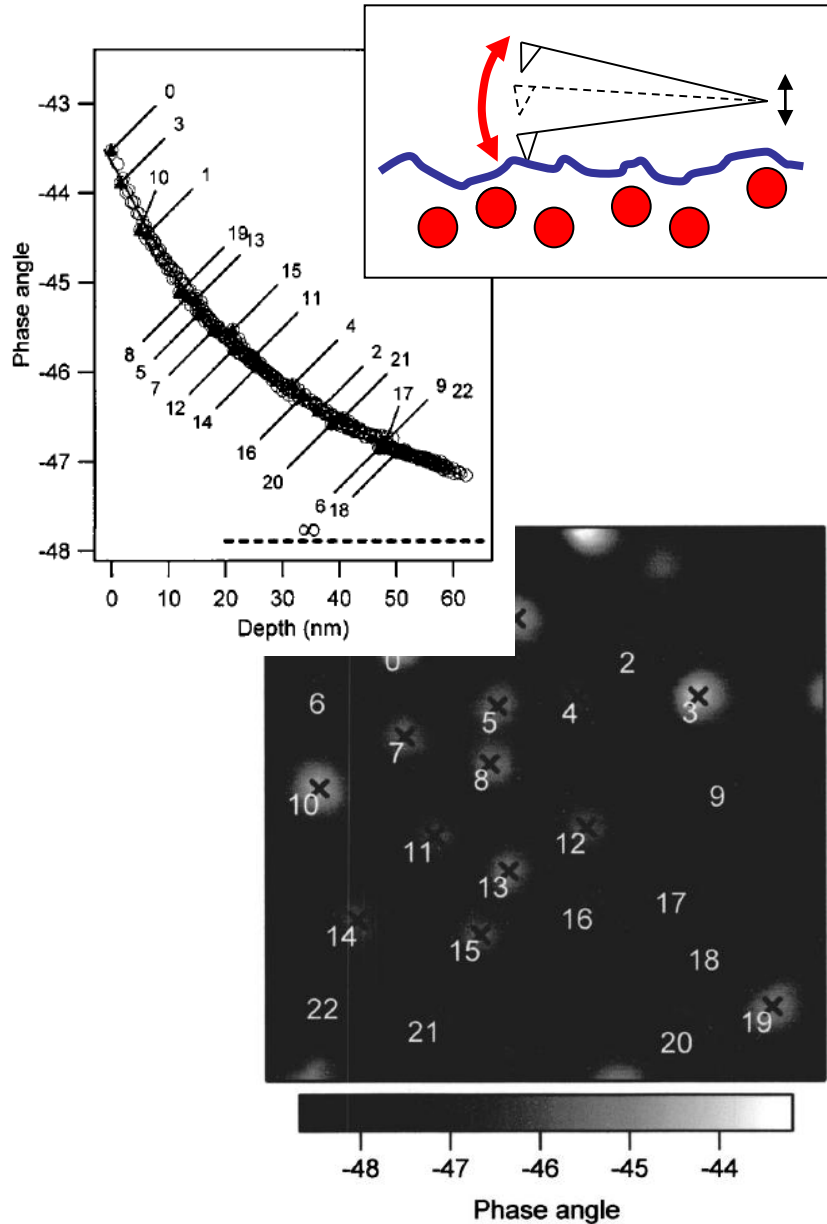
Autres...

Attention : battement...

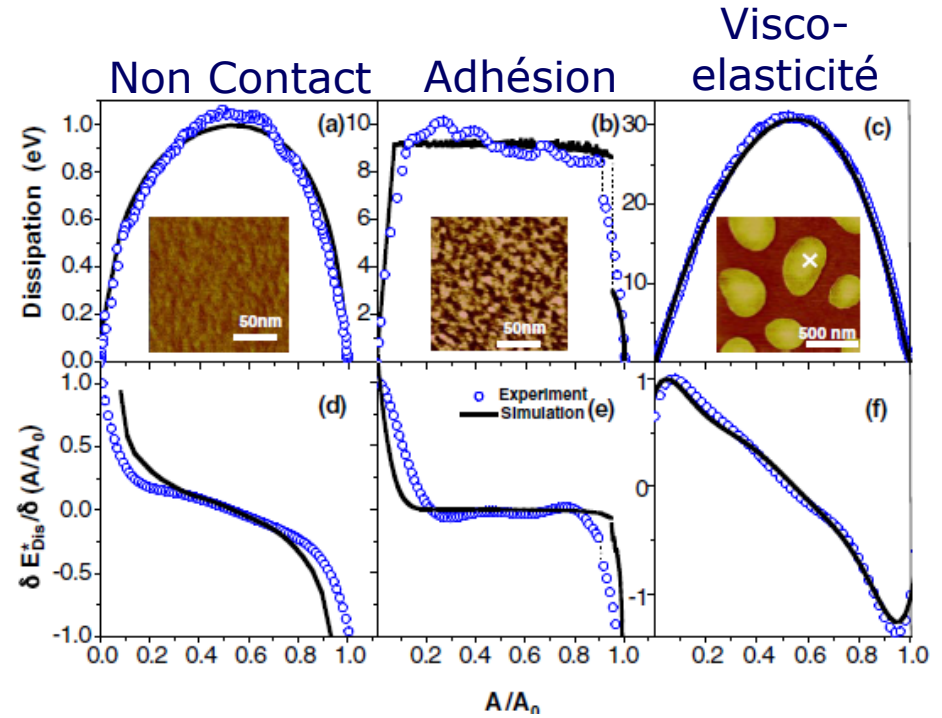


Modèle de l'OHFA  
mis à mal dans  
certains cas

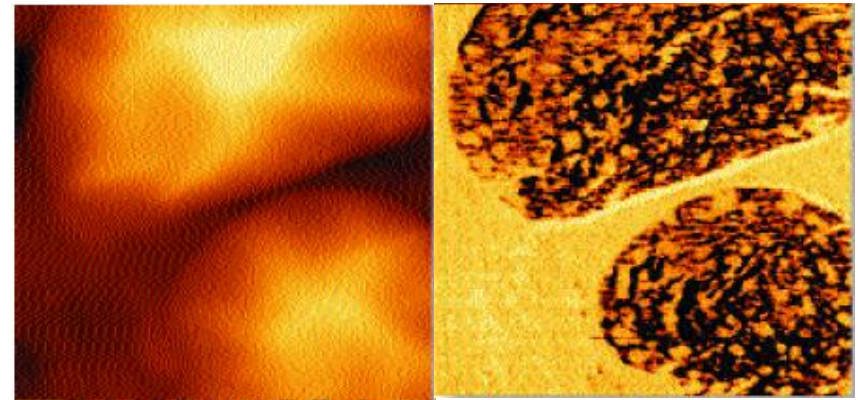
# Exemples d'application



Bodiguet et al., Rev. Sci. Instr. (2004)



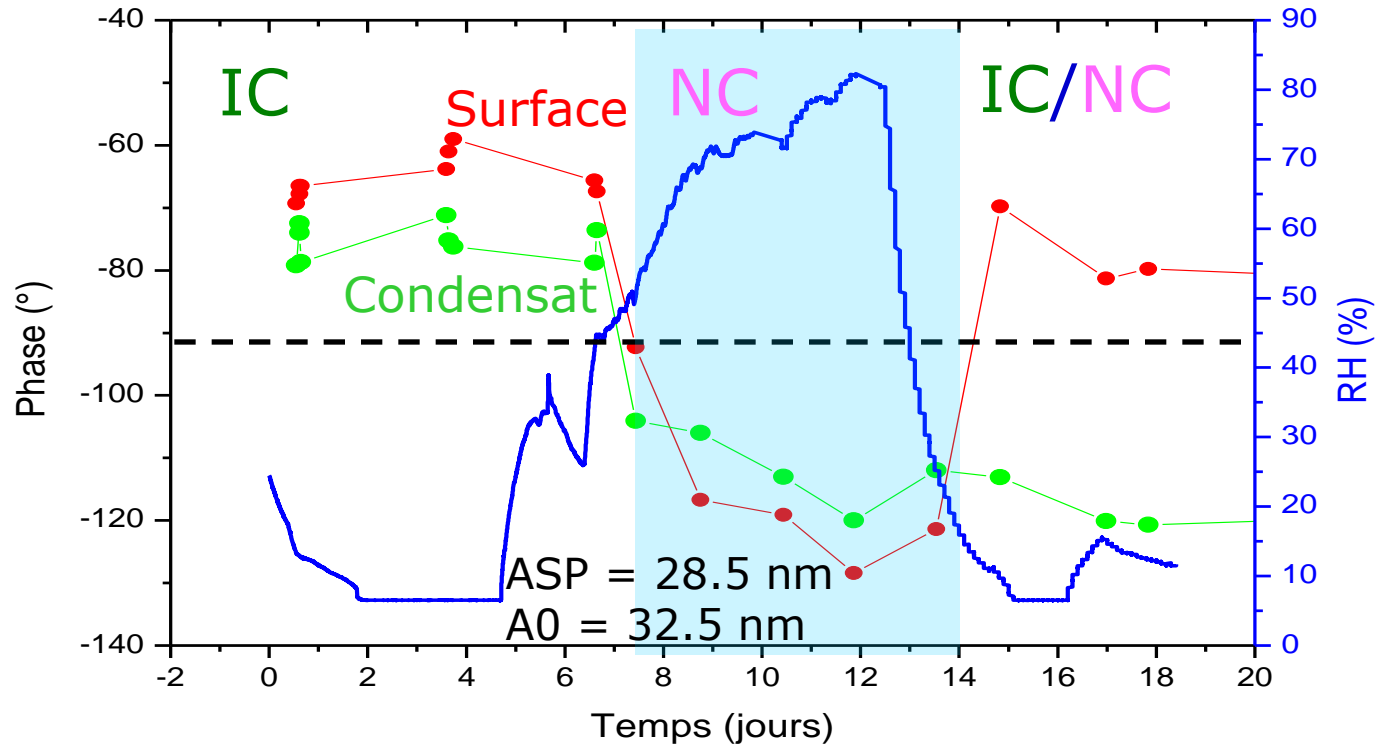
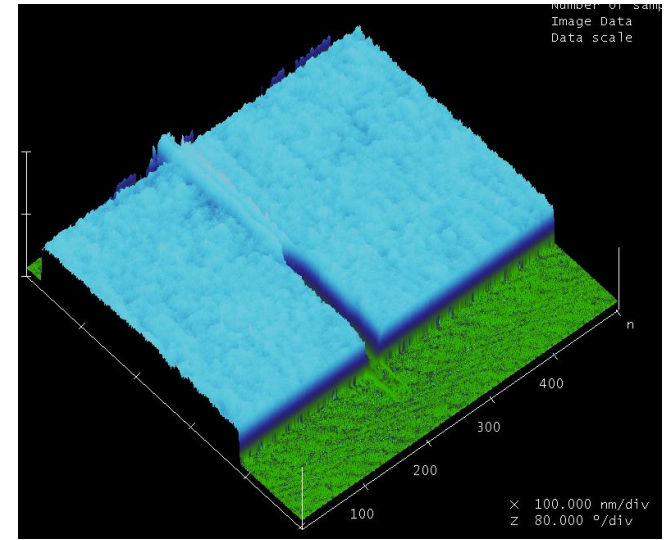
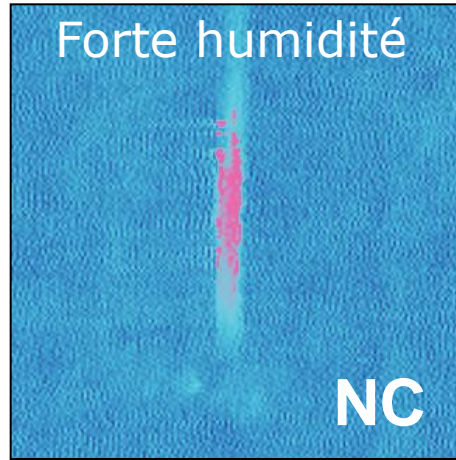
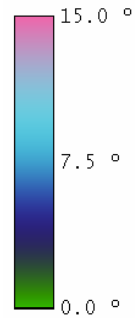
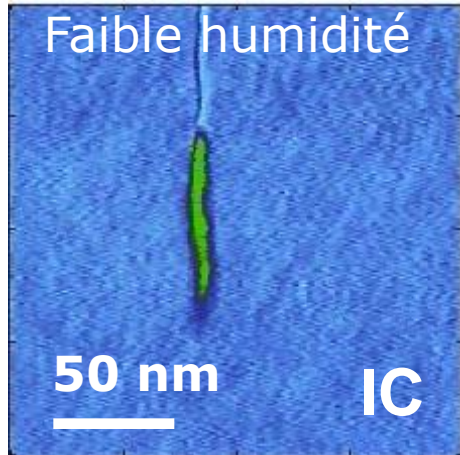
Garcia et al., PRL (2006)



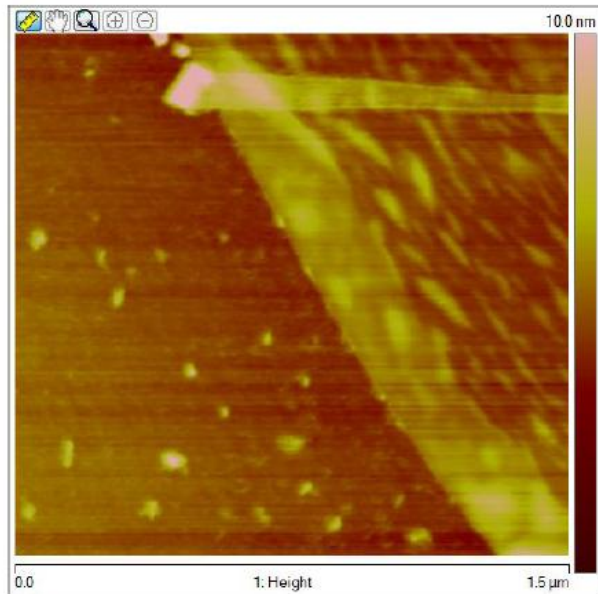
Courtesy of Raj Michael



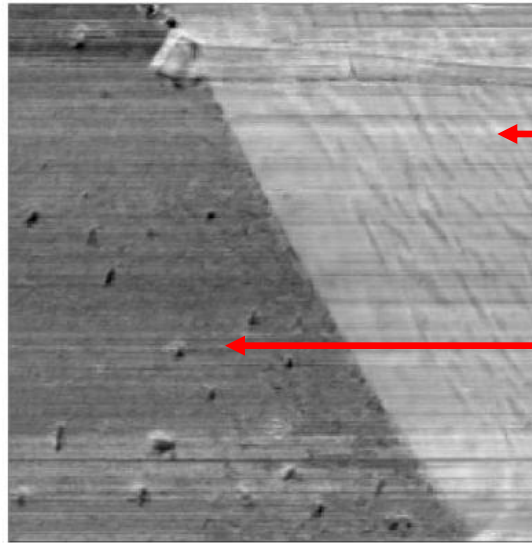
# Dissipation sur condensat liquide



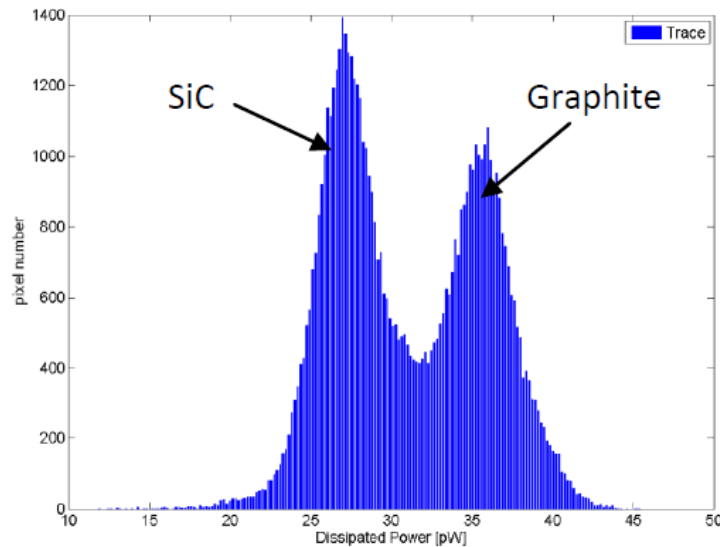
# Propriétés de mouillage sur le graphène



Topography



Dissipated power contrast



- ✓ Propriétés de surface
- ✓ Même pointe, deux surfaces
- ✓ Statistique en mode imagerie
- ✓ Travail à différentes amplitudes



# Conclusion - Perspectives

- ✓ Attention à la bi-stabilité de la réponse en oscillation
- ✓ Mesure correcte de la phase → Energie dissipée
- ✓ Quel modèle pour la dissipation mesurée ???
- ✓ Sans doute des infos à tirer des modes modernes du nouveau millénaire !!! A suivre...

