Détection AFM : mesure intérferométrique à double phase

Pierdomenico Paolino, Ludovic Bellon

Laboratoire de Physique, C.N.R.S. UMR5672
École Normale Supérieure de Lyon
46, allée d'Italie, 69364 Lyon Cedex 07, France

TECHNIQUE

Région de mesure

Le faisceau laser polarisé linéairement est separé via une lame de calcite (avec son axe optique à 45° avec la polarisation) en deux faisceaux parallèles avec polarisations croisées et 140 µm d'écart. Les deux faisceaux se réfléchissent l'un sur la base d'un levier rectangulaire, l'autre sur son extrémité. Lors de la réflexion la différence de chemin optique L due à la déflection se traduit par un déphasage entre les deux faisceaux $\varphi = 4\pi L/\lambda$.

Dans le trajet de retour les faisceaux se recombinent partiellement à cause de la courbure intrinsèque du levier et de sa déflection ; pour cela on diaphragme la seule partie qui contient la superposition des deux.

Région d'analyse

Dans chaque bras on mesure les intensités A et B du faisceau divisé de nouveau en deux avec une lame de calcite à 45° par rapport à la première. En outre, dans le bras horizontal on ajoute un déphasage de $\pi/2$ via une lame quart d'onde.

Les intensités A_i et B_i (avec i=1 pour le bras horizontal et i=2 pour le vertical) sont fonction du déphasage φ entre les faisceaux réfléchis sur le levier :

$$A_i = I_0(1+\cos(\varphi+\psi_i))$$

$$B_i = I_0(1-\cos(\varphi+\psi_i)) \qquad \psi_1 = \pi/2 \;;\; \psi_2 = 0$$

On definit alors pour chaque bras le **contraste** :

$$C_i = (A_i - B_i)/(A_i + B_i) = \cos(\varphi+\psi_i)$$

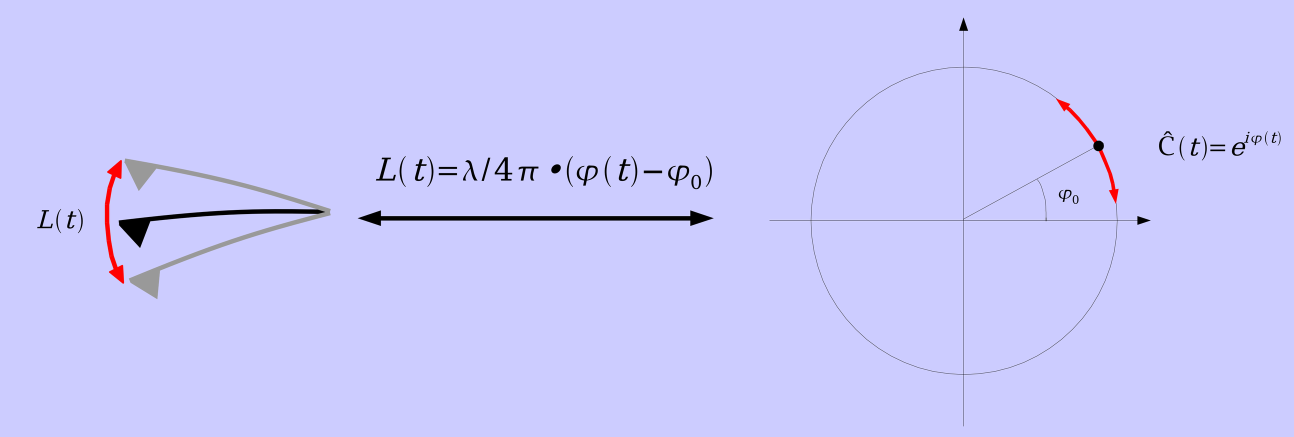
En notation unifiée on définit le **contraste complexe**[1] :

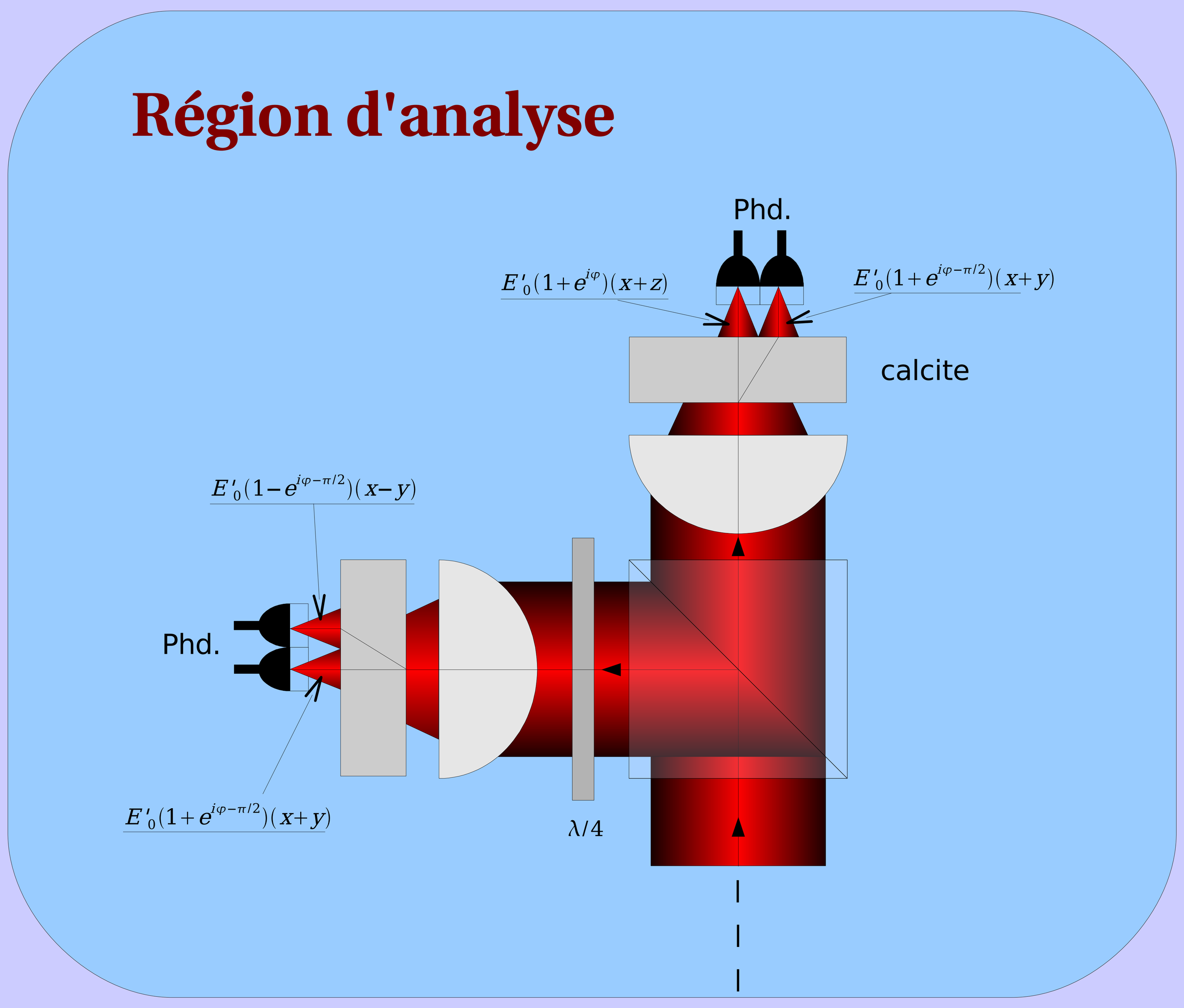
$$e^{i\varphi} = \cos(\varphi) + i\sin(\varphi) = C_1 + iC_2 = \hat{C}$$

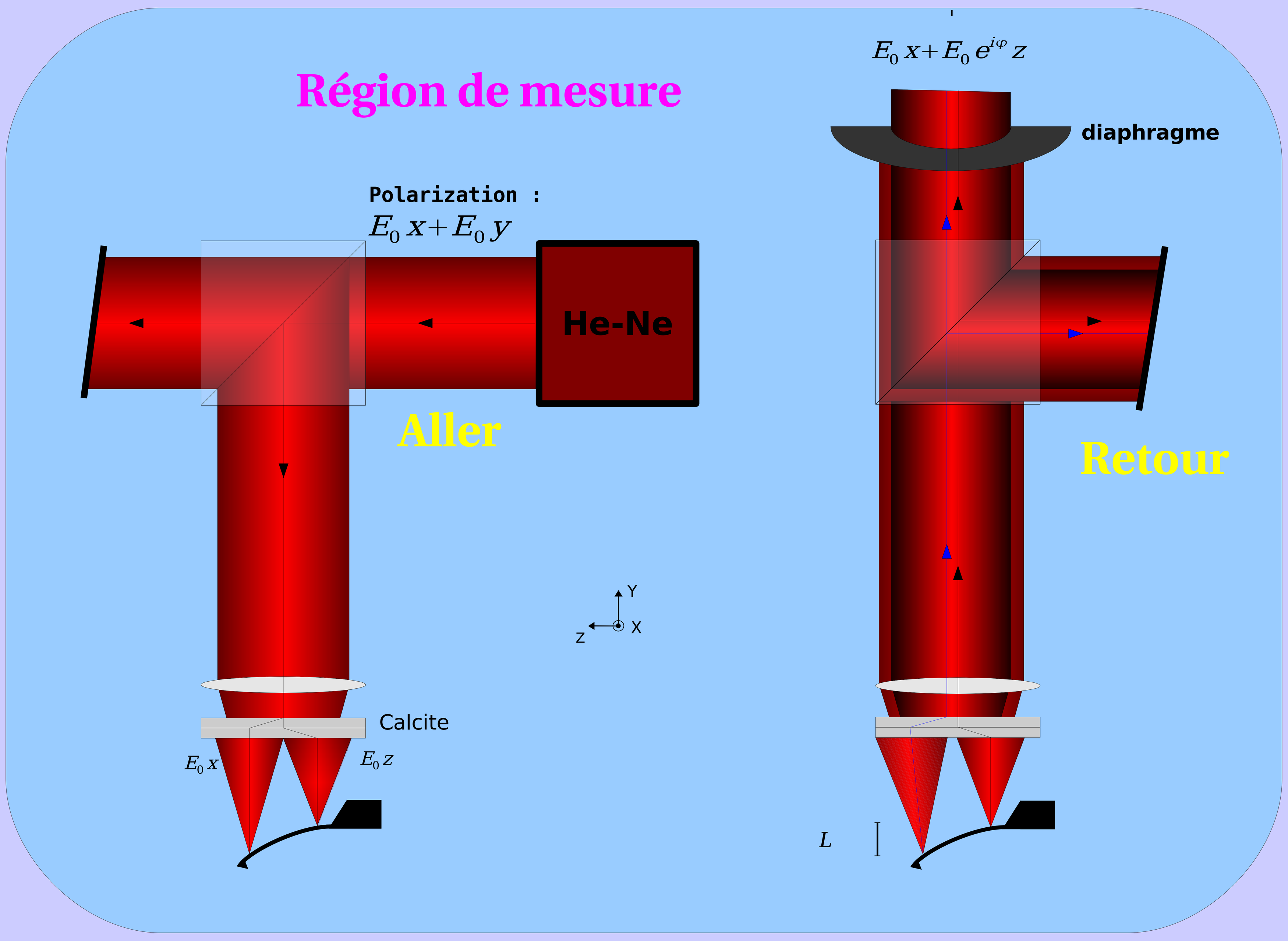
Avantages du contraste complexe:

Avec un seul bras, pour que la sensibilité soit maximale, il faut linearise le contraste, ce qui limite le champ d'action de l'appareil à la mesure de petites oscillations et nécessite un réglage fréquent du point de travail (la phase φ_0 du levier à repos) en ajoutant une phase adjustable[2].

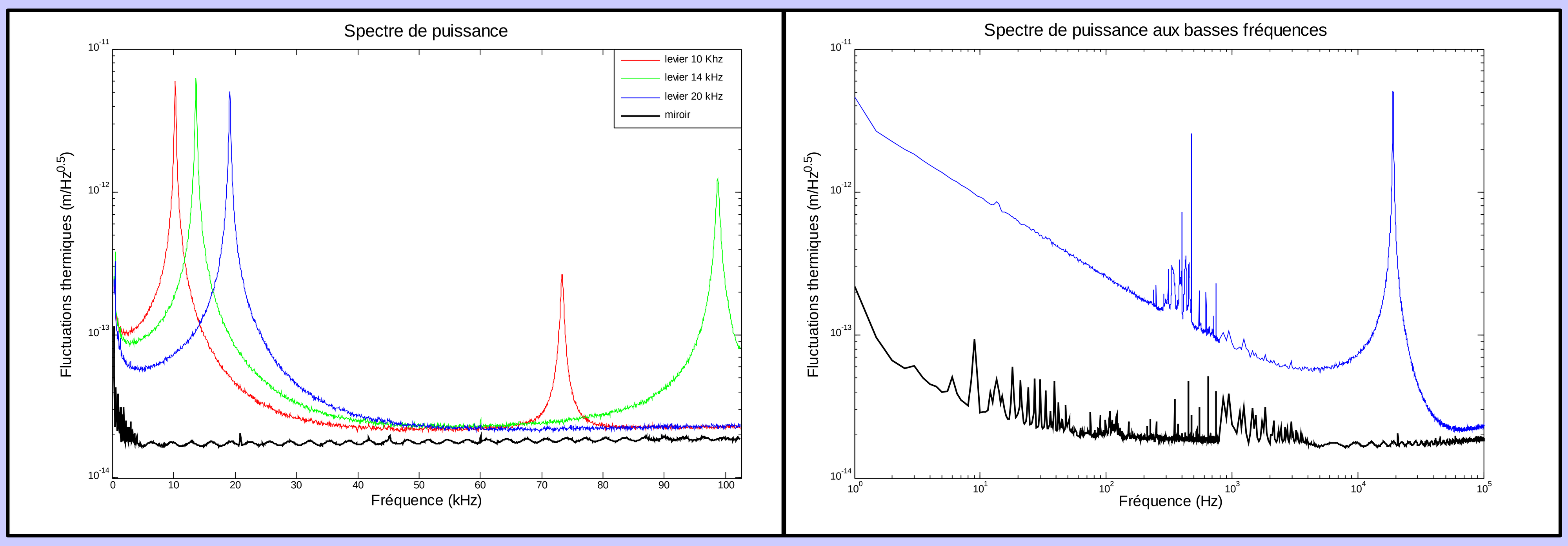
La présence du deuxième bras rend la sensibilité indépendante du point de travail, permettant donc des longues acquisitions et surtout de mesurer des grandes amplitudes d'oscillation.





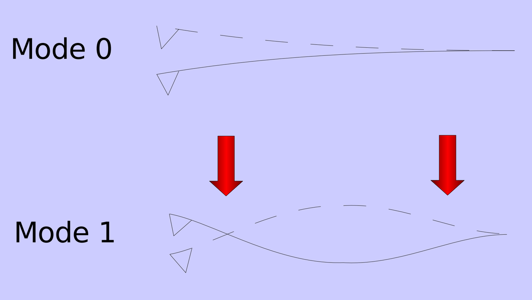


MESURES

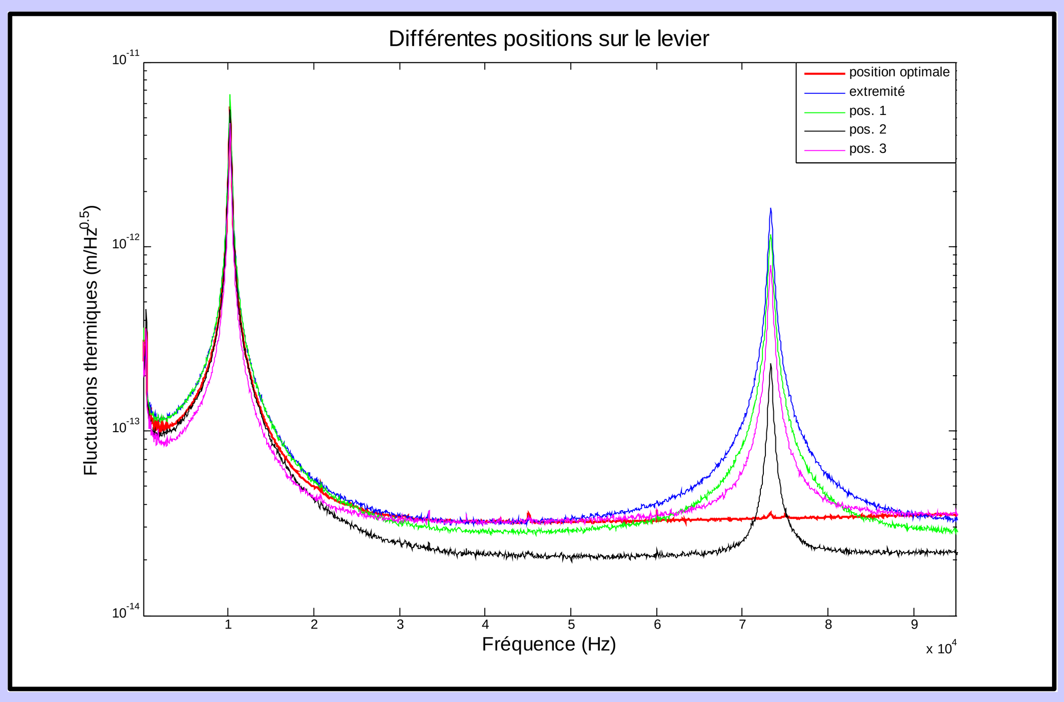


On a testé la sensibilité de l'instrument sur trois leviers (Mikromasch SCS38) avec des fréquences de résonance de 10 kHz (-), 14kHz (-) et 19kHz (-) en mesurant le spectre de puissance des fluctuations thermiques du levier entre 0 et 100 kHz.

On peut constater que la ligne de base du bruit est de l'ordre de 3.10^{-14} m/(Hz)$^{0.5}$, seuil correspondant au shot noise des photodiodes. Le bruit de l'électronique est mesuré via un miroir fixe (courbe en noir) : les fluctuations thermiques mesurées sur le levier sont largement supérieures au bruit de fond, même à basse fréquence (où l'on observe la viscoelasticité du levier).



La distance entre les deux faisceaux de mesure (140 µm) est en pratique inférieure à la longueur des leviers testés (250 µm à 350 µm), nous sommes donc sensibles aux modes de flexion d'ordre supérieur : le mode 1 est notamment visible pour les leviers à 10 et 14 kHz, mais dépend de la position des faisceaux sur le levier. Il existe une position optimale de réflexion pour laquelle le deuxième pic disparaît.



ASTUCES

- Utilisation de deux calcites d'axes perpendiculaires pour annuler L au repos. On est ainsi insensible aux fluctuations de longueur d'onde du laser.
- Utilisation d'un diaphragme pour compenser la courbure du levier.
- Mesure des oscillations en mode dynamique : on accède directement aux variations de L sans passer dans l'espace complexe grâce à la formule $2\pi/\lambda.\delta L = C_1\delta C_2 - C_2\delta C_1$:

$$e^{i\varphi} = C_1 + iC_2$$

$$i\delta\varphi\, e^{i\varphi} = \delta C_1 + i\delta C_2$$

$$i\delta\varphi = (\delta C_1 + i\delta C_2)e^{-i\varphi} = (\delta C_1 + i\delta C_2)(C_1 - iC_2)$$

$$\delta\varphi = (C_1\delta C_2 - C_2\delta C_1) - i(C_1\delta C_1 + C_2\delta C_2) \text{ et}$$

$$C_1\delta C_1 + C_2\delta C_2 = \delta(C_1^2 + C_2^2) = 0$$

[1] *"Differential interferometry with a complex contrast"*, L. Bellon, S. Ciliberto, H. Boubaker et L. Guyon, Opt. Commun. **207** (2002) 49.
[2] *"A differential interferometer for force microscopy"*, C. Schonenberger et S. F. Alvarado, Rev. Sci. Instrum. **60** (1989), 3131.