

Etude par FM-AFM de nanoménisques : nanohydrodynamique et élasticité de l'interface

Julien Dupré de Baubigny¹, Michael Benzaquen², Caroline Mortagne¹, Jean-Pierre Aimé³, Marc Legros¹, Thierry Ondarcuhu¹

¹ CEMES-CNRS, UPR 8011, 29 rue Jeanne Marvig, 31055 TOULOUSE cedex 4

² Laboratoire de Physico-Chimie Théorique, CNRS UMR 7083 Gulliver, ESPCI ParisTech, PSL Research University, 10 rue Vauquelin, 75231 PARIS cedex 5.

³ CBMN, CNRS UMR 5248, 2 rue Escarpit, 33600 PESSAC, France

L'essor récent de la nanofluidique soulève de nouvelles questions concernant l'hydrodynamique et le mouillage aux échelles nanométriques [1]. Pour aborder ces sujets, il est essentiel de développer de nouvelles méthodes permettant de sonder les propriétés mécaniques de nanoménisques et notamment de quantifier la dissipation visqueuse qui conditionne, par exemple, la dynamique de la ligne triple.

Nous montrons ici que la microscopie à force atomique (AFM) est un outil de choix dans cette perspective. Nous utilisons pour cela une géométrie modèle constituée d'un pointe terminée par un nanocylindre (de 25 à 100 nm de diamètre) partiellement immergé dans un liquide. La pointe est mise en oscillation avec une amplitude de quelques nanomètres et une fréquence variant entre 50 kHz et 400 kHz en utilisant le mode FM-AFM (frequency modulation). Contrairement au mode standard AM-AFM (amplitude modulation), le FM-AFM permet de mesurer indépendamment les composantes conservatives et dissipatives de l'interaction pointe-liquide [2]. Une analyse détaillée des courbes obtenues lors du trempage de la pointe permet d'étudier indépendamment les différentes contributions provenant de la couche visqueuse autour du cylindre, de l'interface liquide, du nanoménisque ou la ligne de contact (Figure 1a).

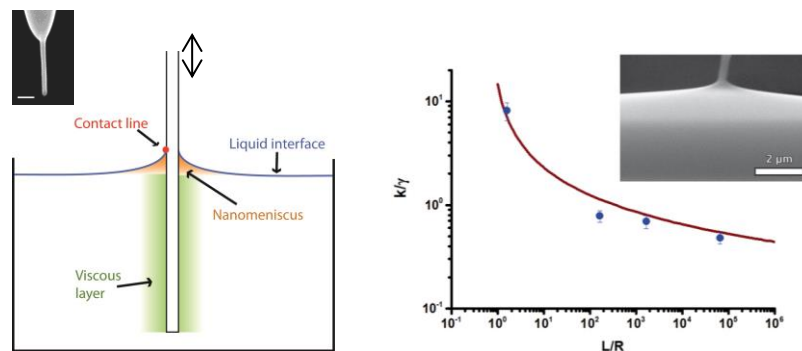


Figure 1 : (a) Représentation schématique de l'expérience ; inset : image MEB d'une pointe utilisée (barre d'échelle 200 nm). (b) Raideur du ménisque en fonction de son extension latérale ; inset : image MEB du nanoménisque formé autour de la nanofibre.

Dans un premier temps, nous présenterons des résultats concernant la couche visqueuse. Le coefficient de friction ainsi que la masse ajoutée sont déterminés pour plusieurs séries de liquides et pour les fréquences des deux premiers modes du cantilever. Nous montrons que les deux termes sont proportionnels à la viscosité η du liquide avec un coefficient de proportionnalité dépendant du rapport R/δ du rayon de la pointe à l'épaisseur

de la couche visqueuse donnée par $\delta_{2D} = \sqrt{\frac{2\eta}{\rho\omega}}$ où ρ est la masse volumique du liquide et ω la fréquence angulaire de l'oscillation [3]. Les résultats sont interprétés par un modèle prenant en compte la géométrie cylindrique ($R/\delta \ll 1$) montrant que dans ce cas l'épaisseur de la couche visqueuse est largement réduite par rapport à la valeur 2D.

Nous nous intéresserons ensuite à l'interface liquide dont la raideur effective k peut être mesurée à partir du décalage en fréquence observé à l'entrée de la pointe dans le liquide. Pour une interface libre, cette raideur est proportionnelle à la tension superficielle γ du liquide, ce qui peut être interprété par un modèle dérivant la raideur à partir de la forme d'équilibre du ménisque. Des expériences de micromanipulation sous microscope électronique à balayage (MEB) ont permis de valider les profils théoriques jusqu'à des dimensions nanométriques (Figure 1b). Par ailleurs, pour des ménisques contraints, l'influence de l'extension latérale L du ménisque sur sa raideur est étudiée sur plus de quatre ordres de grandeur. Ce durcissement du ménisque est bien décrit par la relation $k \cong \frac{2\pi\gamma}{\ln(\frac{L}{R})}$ déduite du modèle (Figure 1b).

Ces résultats démontrent que le FM-AFM utilisé avec des pointes cylindriques permet de réaliser des études quantitatives, notamment sur les phénomènes de dissipation à l'échelle nanométrique. Ceci ouvre de larges perspectives pour aborder des problèmes encore mal connus de dissipation à la ligne de contact et d'hystérésis de l'angle de contact qui conditionnent la dynamique du mouillage. Nous présenterons des résultats préliminaires sur la dissipation à la ligne de contact et sur l'influence de défauts nanométriques [4].

Remerciements : Ces travaux sont partiellement financés par l'ANR NANOFUIDYN (ANR-13-BS10-0009), le LABEX NEXT (ANR-10-LABX-0037) et le projet MIMETIS (ANR-10-EQPX-38-01)

Références :

- [1] T. Ondarçuhu and J. P. Aimé eds., *Nanoscale liquid interfaces: wetting, patterning and force microscopy at the molecular scale* (Pan Stanford Publishing, Singapore, 2013).
- [2] C. Jai, J. P. Aime, D. Mariolle, R. Boisgard, and F. Bertin, *Wetting an oscillating nanoneedle to image an air-liquid interface at the nanometer scale: Dynamical behavior of a nanomeniscus*, *Nano Lett.* **6**, 2554 (2006).
- [3] L. Landau and E. Lifshitz, *Course of theoretical physics: fluid mechanics* (Elsevier Ltd, Oxford, 1987).
- [4] M. Delmas, M. Monthieux, and T. Ondarçuhu, *Contact Angle Hysteresis at the Nanometer Scale*, *Phys. Rev. Lett.* **106**, 136102 (2011).