



HAL
open science

Mouillage à l'échelle nanométrique : Désorption induite par les forces à la ligne de contact

Sylvain Franiatte, Philippe Tordjeman, Thierry ONDARÇUHU

► **To cite this version:**

Sylvain Franiatte, Philippe Tordjeman, Thierry ONDARÇUHU. Mouillage à l'échelle nanométrique : Désorption induite par les forces à la ligne de contact. 25e Congrès Français de Mécanique, Aug 2022, Nantes, France. hal-04280125

HAL Id: hal-04280125

<https://hal.science/hal-04280125v1>

Submitted on 13 Nov 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Mouillage à l'échelle nanométrique : Désorption induite par les forces à la ligne de contact

Sylvain Franiatte^a, Philippe Tordjeman^b, Thierry Ondarçuhu^c

Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (IMFT)

a. sylvain.franiatte@imft.fr

b. philippe.tordjeman@imft.fr

c. thierry.ondarçuhu@imft.fr

Résumé :

La dynamique d'une ligne de contact est gouvernée par les interactions moléculaires. À l'aide d'expériences utilisant un microscope à force atomique (AFM) muni d'une sonde comportant une nano-fibre, nous avons étudié l'effet d'un passage répété de la ligne de contact sur une surface solide. Ce montage permet de découpler les effets des défauts topographiques de ceux des défauts chimiques. Cela nous permet de montrer, en utilisant 6 liquides différents et 5 sondes munies de nano-fibres différentes, que des molécules aéroportées s'adsorbent lorsque la sonde est à l'air libre et qu'elles sont désorbées par la force exercée par la ligne de contact lors des trempages successifs de cette dernière. Nos données montrent que le taux de désorption est indépendant de la vitesse de la ligne de contact et du liquide sondé.

Abstract :

The contact line dynamic is controlled by the molecular interactions. With the use of an atomic force microscope (AFM) on which there is a nanofiber, we studied the effect of the repeated contact line displacement on a solid surface. This setup allows to separate the effects of topographical and chemical defects. With the use of 6 different liquids and 5 nanofiber, we show that some airborne molecules may be adsorbed when the nanofiber is in the air and that they are desorbed by the repeated displacement of the contact line during successive dipping cycles. Our data shows that the desorption rate is independent of the contact line velocity and of the liquid probed.

Mots clés : ligne de contact, désorption, microscope à force atomique (AFM), nano-fibre

1 Introduction

Les interactions moléculaires conditionnent la mouillabilité de surfaces solides [1, 2]. Celles-ci dépendent de la chimie et la topographie des surfaces considérées [3, 4]. Des aspérités de taille nanométrique peuvent ainsi rendre une surface superhydrophobe ou superhydrophile [5, 6] alors qu'une monocouche de molécules peut modifier les propriétés de mouillage d'un substrat [7, 8, 9]. De la même

façon, une surface contaminée voit ses propriétés de mouillage modifiée [10, 11]. La ligne de contact est donc très sensible aux défauts topographiques et aux défauts chimiques, ce qui donne naissance à phénomènes encore mal compris tels que l'hystérésis de l'angle de contact [12, 13, 14, 15]. D'un autre côté, l'énergie capillaire est du même ordre de grandeur que les énergies d'adsorption des molécules. D'où la possibilité d'une action de la ligne de contact sur ces molécules adsorbées. Plusieurs expériences ont montré la capacité de la ligne de contact à déformer des solides mous [16] ou à aligner des molécules d'ADN [17] mais aucune n'a traité le problème à l'échelle moléculaire.

La précision de la microscopie à force atomique (AFM) permet d'étudier la dynamique d'un nanomérisque à l'échelle du nanomètre en mesurant la force capillaire exercée sur des nano-fibres trempées dans un liquide [18], l'ancrage sur des défauts [19, 20] ou la friction au niveau de la ligne de contact [21]. Nous avons récemment réalisé de nouvelles expériences utilisant un AFM et consistant à tremper une nano-fibre dans un liquide tout en mesurant la force capillaire. Les trempages répétés de la nano-fibre (fixée sur le levier d'une sonde AFM) ont mis en évidence une évolution de la force capillaire en fonction du nombre de trempages. Ce travail a permis de montrer que le déplacement de la ligne de contact est responsable de cette évolution en changeant les propriétés de mouillage du solide via une désorption de molécules physiquement adsorbées à la surface de la nano-fibre. Une expérience spécifique consistant à comparer les propriétés d'une surface avant et après de nombreux balayages par la ligne de contact a permis de montrer sans ambiguïté le mécanisme de cette désorption. Enfin, il est intéressant de noter que ce phénomène de désorption est caractérisé par un nombre caractéristique de trempages N^* indépendant des liquides et de la vitesse de la ligne de contact.

Dans cet article, nous revenons sur les principaux résultats que nous avons publiés sur le sujet. Ainsi, nous présenterons notre montage expérimental puis nous montrerons les évolutions caractéristiques observées de la force en fonction du nombre de trempages et des liquides utilisés.

2 Montage expérimental

L'expérience est schématisée par la figure 1. Une pointe AFM comportant une nano-aiguille est plongée puis retirée d'une goutte de liquide à une vitesse V constante. La déflexion δ est ensuite mesurée par le microscope AFM, ce qui nous permet de remonter à la force en connaissant la raideur du levier de la sonde AFM. Cette mesure de la force capillaire est dépendante de l'angle de contact θ du liquide sur la surface de la pointe par la relation $F = 2\pi R\gamma \cos \theta$ où R est le rayon de la pointe et γ la tension de surface du liquide.

Comme le montre le tableau 1 nous avons utilisé 6 liquides différents qui nous permettent de balayer de grandes plages de tension de surface (un facteur 2.6 entre celle de l'eau et de l'hexadécane), de viscosité (3 ordres de grandeur) et de pression de vapeur saturante (5 ordres de grandeur). Les gouttes des liquides sont sessiles sauf pour l'eau en raison de son évaporation et qui se trouve donc au bout d'un capillaire alimenté par un micro-injecteur qui contrôle la pression.

Le microscope AFM JPK Nanowizard 3 est utilisé en mode contact pour réaliser les courbes de force avec une vitesse comprise entre 3 et 200 $\mu\text{m/s}$. La raideur du levier ($k \sim 2 \text{ N/m}$) caractérisée par mesure du bruit thermique est au minimum 40 fois plus importante que la raideur de l'interface de l'ordre de $\gamma/2$. La fréquence d'acquisition du microscope AFM (200 kHz) nous permet de conserver un échantillonnage de 1 point par nanomètre pour toutes les vitesses. Les données sont ensuite traitées grâce à plusieurs scripts Python.

Deux types de pointes ont été utilisés : une pointe commerciale NaugaNeedle faite en alliage Ag_2Ga et 4 pointes en silicium sculptée à partir de pointes AFM standard (OLTESPA, Bruker) à l'aide d'un FIB (Focused Ion Beam) [20]. Les caractéristiques des pointes et d'autres détails sur le montage sont donnés dans la référence [22].

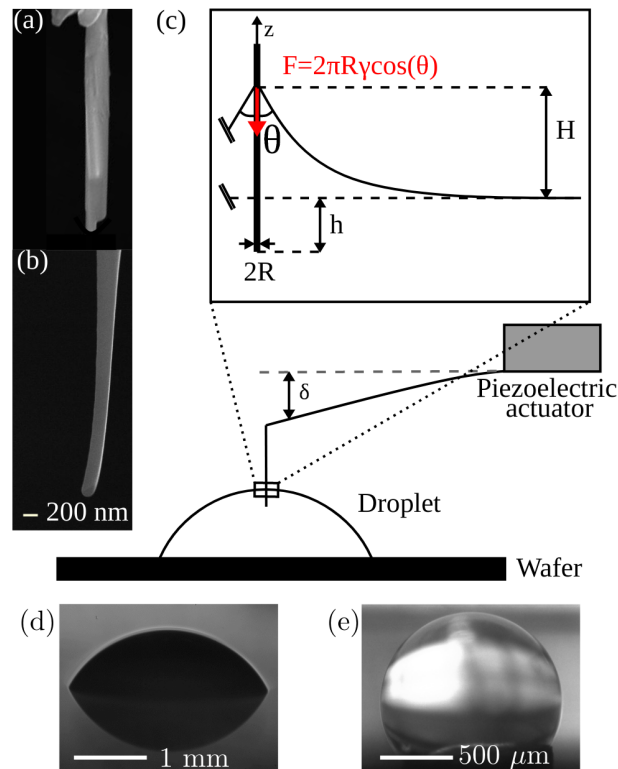


FIGURE 1 – (a)-(b) Images prises au microscope électronique à balayage d'une pointe NaugaNeedle et d'une pointe en silicium respectivement; (c) schéma du montage avec un zoom au niveau du nanomérisque; (d) photo d'une goutte sessile de glycérol; (e) photo d'une goutte d'eau à l'extrémité d'un capillaire relié à un micro-injecteur. D'après [22].

Liquides	ρ (kg/m ³)	μ (mPa.s)	γ (mN/m)	P_{sat} (bar)
Glycérol (Gly)	1260	910	63	0.025
Tétra-éthylène glycol (4EG)	1120	50	46	7
Éthylène glycol (1EG)	1110	30	50	13
Undécanol (Und)	832	13.8	29	0.4
Hexadécane (Hx)	770	3	27	0.22
Eau (W)	997	1	72	3170

TABLE 1 – Propriétés des liquides utilisés : masse volumique ρ , viscosité μ , tension de surface γ and pression de vapeur saturante à 25 °C P_{sat} .

3 Les résultats expérimentaux

Nous avons réalisé une première série de 100 trempages consécutifs avec une vitesse constante V et une pointe laissée plus d'une heure à l'air libre. Le temps entre deux trempages est très court (de ~ 15 ms à

200 $\mu\text{m/s}$ à 1 s à 3 $\mu\text{m/s}$), ce qui limite la contamination atmosphérique entre deux trempages. La figure 2 montre une superposition des courbes de force réalisée lors de ces trempages successifs en allant du bleu au rouge. La courbe de force représente la force capillaire mesurée en fonction de la profondeur h définie par la figure 1. La force mesurée reste nulle jusqu'à ce que le ménisque se forme à $h = 0 \mu\text{m}$. La force fluctue ensuite autour de $F \sim 70 \text{ nN}$ en raison de la présence de défauts. À environ $h = 3 \mu\text{m}$, la pointe est retirée et la force capillaire augmente à environ 110 nN puis retombe à 0 nN lorsque le ménisque se rompt. L'écart entre l'avancée et la reculée est dû à l'hystérésis de l'angle de contact qui est estimé à $\sim 60^\circ$ à l'avancée et à $\sim 35^\circ$ à la reculée. Des simulations ont montré que l'hystérésis de l'angle de contact est due à la présence de défauts topographiques de taille nanométrique [12, 19, 18, 20, 22].

La figure 2 montre le type de résultats obtenus lors de la réalisation d'une série de 100 trempages avec une pointe NaugeNeedle sur du tétra-éthylène glycol à $V = 50 \mu\text{m/s}$. La couleur varie du bleu au rouge en suivant l'augmentation du nombre de trempages effectués N (de 0 à 100). Au cours de cette série de trempage, la force mesurée augmente de manière homogène (avec un angle de contact passant de 60° à 55° à l'avancée et de 35° à 25° à la reculée) tout en conservant les fluctuations dues aux défauts topographiques. Cela signifie donc que les propriétés chimiques de la surface changent alors que la topographie de celle-ci n'évolue pas. L'insert de la figure 2 montre l'évolution de la force au niveau d'un pic à l'avancée. La force augmente avec N en passant d'une valeur initiale $F = F_0$ à une valeur stationnaire $F = F_\infty$. D'autres résultats similaires sont obtenus pour les autres liquides à l'exception de l'hexadécane [23, 22].

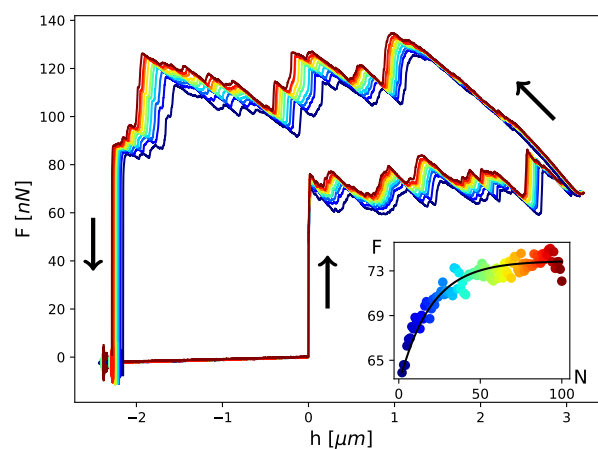


FIGURE 2 – Superposition de courbes de forces obtenues lors de trempages successifs (du bleu foncé au rouge) d'une pointe NaugeNeedle ($R \sim 430 \text{ nm}$) dans du tétra-éthylène glycol à $V = 50 \mu\text{m/s}$. Insert : évolution de la force mesurée sur un défaut topographique à l'avancée en fonction du nombre de trempages N . D'après [23].

Afin d'étudier l'influence du temps de contamination atmosphérique, nous avons donc réalisé 10 séries de 100 trempages avec un temps de pause t_p entre chaque. Durant ce temps de pause, la pointe reste à l'air libre et la contamination est possible. La force au niveau d'un pic de force à l'avancée en fonction du nombre de trempages N est reporté figure 3. Le temps de pause entre chaque série augmente progressivement de 1 seconde à 30 secondes. Chacune des série présente la même évolution avec une même force F_∞ avec une amplitude d'évolution dépendante du temps de pause t_p . Cette dépendance est montrée dans l'insert de la figure 3, pour l'avancée et la reculée, en définissant l'amplitude d'évolution

relative $\epsilon = (F_\infty - F_0)/F_\infty$ et en l'affichant en fonction du temps de pause t_p . Cette évolution montre que la pointe est contaminée par des molécules aéroportées avec un temps caractéristique τ de l'ordre de la dizaine de seconde. Des résultats similaires ont été obtenus avec toutes nos pointes et tous nos liquides à l'exception de l'hexadécane [23, 22]. La littérature montre qu'une surface a tendance à devenir plus hydrophobe après une exposition à l'air libre. Les molécules dispersées dans l'air sont principalement des hydrocarbures à chaîne courte à chaîne courte comme le propane ou le butane. Ceux-ci pourraient donc être les molécules responsables de la contamination atmosphérique même si la cinétique semble être plus lente [24, 25, 11].

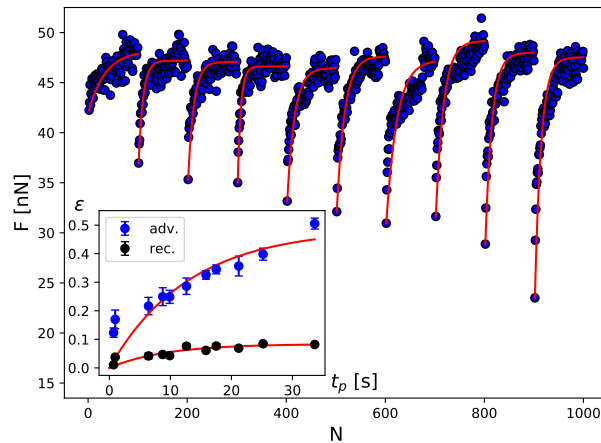


FIGURE 3 – Évolution de la force au niveau d'un défaut topographique en fonction du nombre de trempages obtenue avec une pointe NugaNeedle ($R \sim 430 \text{ nm}$) dans du tétra-éthylène glycol à $V = 100 \mu\text{m/s}$. Le temps de pause t_p entre deux séries varie progressivement de 1 à 30 secondes. Insert : amplitude d'évolution relative de la force ϵ en fonction du temps de pause t_p à l'avancée (en bleu) et à la reculée (en noir). Les barres d'erreur correspondent à un intervalle de confiance à 95 %.

Dans le but de déterminer précisément le mécanisme de cette désorption, nous avons réalisé un autre type d'expérience. Cette désorption pourrait venir de la contrainte de cisaillement pariétal [26] ou de la force exercée par la ligne de contact [27, 28]. Le but est de comparer les propriétés d'une surface qui n'a pas été balayée par une ligne de contact avec celles d'une même surface balayée un grand nombre de fois par une ligne de contact. Pour ce faire, une première courbe de force est réalisée sur l'ensemble de la nano-fibre puis celle-ci est partiellement trempée un millier de fois à l'extrémité de la pointe ou la fibre est immergée et oscille un millier de fois autour d'une position moyenne afin de générer un balayage par la ligne de contact d'une partie de la surface de la nano-fibre. Les mesures ont été réalisées sur du glycérol qui a été choisi en raison des fortes évolutions observées et de la simplicité du montage expérimental. La figure 4 montre le résultat de cette expérience. Que ce soit dans le cas du balayage à l'extrémité de la pointe (a) ou dans celui du balayage au milieu de la pointe (b), le même type de différence s'observe entre la courbe "avant" en vert et la courbe "après" en rouge : les courbes de forces obtenues diffèrent uniquement là où la ligne de contact a balayé la surface un grand nombre de fois. Ces résultats montrent que la désorption est due au passage de la ligne de contact. En effet, même la zone immergée dans le glycérol (et soumise aux contraintes visqueuses lors des balayages) mais épargnée par les passages répétés de la ligne de contact n'ont pas vu leurs propriétés de mouillabilité changer (figure 4).

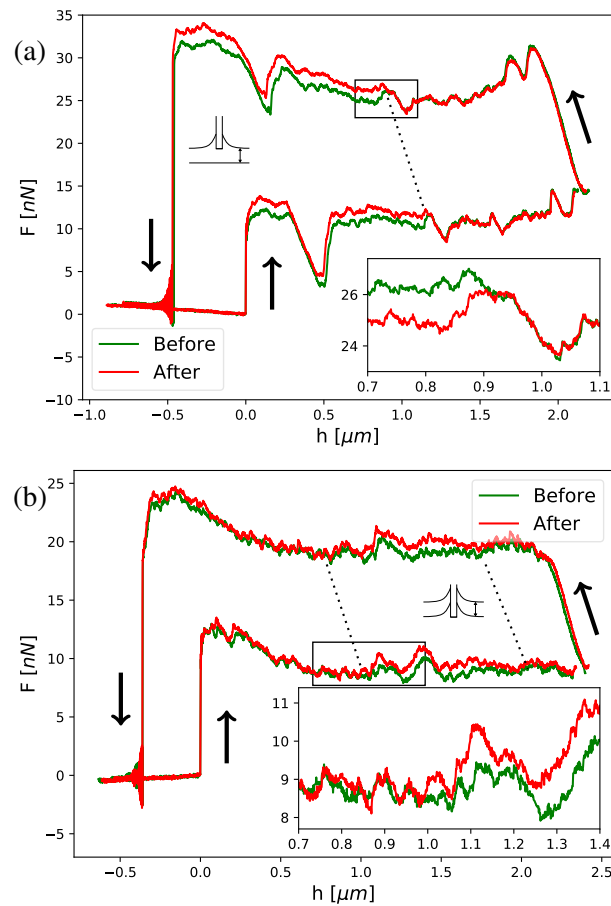


FIGURE 4 – Courbes de forces obtenues avant et après 1000 trempages partiels avec deux pointes différentes en silicium ($R \sim 60 \text{ nm}$) et à $V = 50 \mu\text{m/s}$ dans du glycérol. (a) seul le bout de la pointe est trempé dans le liquide ; (b) seule une zone intermédiaire entre $h \sim 1 \mu\text{m}$ and $h \sim 2 \mu\text{m}$ est balayée par la ligne de contact. Les lignes en pointillés délimitent cette zone.

Il est remarquable de constater que le nombre caractéristique de trempages N^* est indépendant de la vitesse de déplacement de la pointe lorsque celle-ci est supérieure à $10 \mu\text{m/s}$ comme le montre la figure 5. Cela confirme que la contrainte visqueuse n'est pas responsable de la désorption et rejoint d'autres résultats obtenus avec des particules solides [27, 28]. La diminution de N^* pour les petites vitesses s'explique par une contamination de la pointe entre deux trempages [22]. Lorsque celle-ci est prise en compte, l'expression de N^* en fonction de la vitesse est alors :

$$\frac{1}{N^*} = \frac{1}{N^\infty} + \frac{L_a}{V\tau}. \quad (1)$$

Avec $L_a \sim 1 - 6 \mu\text{m}$ la longueur d'un aller ou d'un retour. La courbe rouge de la figure 5 est obtenue en choisissant $\tau = 7 \text{ s}$, $N^\infty = 16$, et $L_a = 3 \mu\text{m}$ et est en accord avec l'évolution constatée. En faisant abstraction de cette évolution aux faibles vitesses, N^* est constant en fonction de la vitesse.

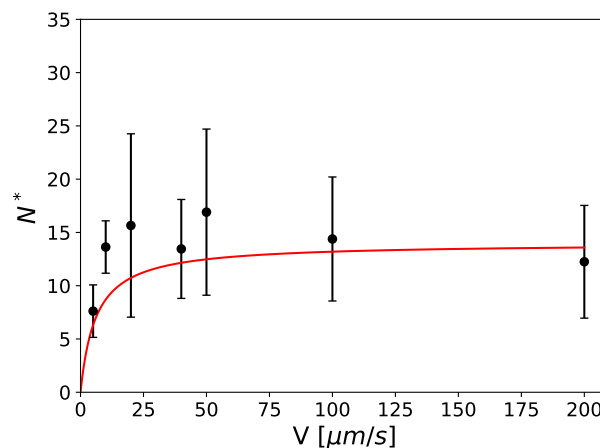


FIGURE 5 – N^* en fonction de V mesuré expérimentalement. Les barres d'erreur montrent les écarts-types de chaque mesure. La courbe rouge est obtenue à partir de l'équation 1 qui prend en compte la recontamination entre deux trempages. D'après [22].

En considérant que les molécules physiquement adsorbées sont bien des hydrocarbures à chaîne courte, leur énergie d'adsorption sur une surface de silice peut être estimée à $E_{ads} \sim 10kT$ [29, 30]. Cette barrière d'énergie qui empêche la désorption par l'agitation thermique est ensuite abaissée par l'énergie capillaire. D'après [12], la distorsion de la ligne de contact due à des défauts (chimiques ici) génère une variation d'énergie capillaire donnée par $E_{cap} = \gamma\xi^2 \left(\frac{\cos\theta_d - \cos\theta_0}{2\theta_0} \right)^2 \times \ln\left(\frac{L}{\xi}\right)$ où $\xi \sim 1$ nm est la distance entre deux molécules déduite de nos résultats expérimentaux [23, 22], L le périmètre de la pointe et, θ_0 et θ_d les angles de contact sur la pointe sans défauts et au niveau des défauts chimiques. E_{cap} est d'environ $7kT$ pour tous les liquides [23] et est comparable à l'énergie d'adsorption des molécules considérées, permettant ainsi possiblement leur désorption. Cette énergie capillaire est cependant bien trop faible pour permettre la désorption de molécules chimiquement adsorbées dont les énergies d'adsorption peuvent atteindre les $100kT$.

4 Conclusion et perspectives

Nous avons mis au point un montage expérimental précis nous permettant d'étudier l'effet des défauts sur les propriétés de mouillage d'une nano-fibre à l'échelle nanométrique avec une bonne reproductibilité. Cela nous a permis d'avoir des résultats robustes basés sur des dizaines de milliers de trempages par pointe. Les mesures de forces à l'avancée et à la reculée permettent de distinguer l'effet des défauts topographiques de ceux des défauts chimiques. Nous avons montré qu'une ligne de contact en mouvement est capable de désorber des molécules physiquement adsorbées. Le mécanisme de désorption est caractérisé par un nombre de trempages caractéristique N^* indépendant de la vitesse de trempage et du liquide utilisé. Nos résultats montrent aussi que la surface est systématiquement contaminée par des molécules atmosphériques dès qu'elle reste à l'air libre avec un temps caractéristique $\tau = 7 \pm 4$ s bien plus court que ce qui a été observé dans la littérature.

Notre travail ouvre donc la voie à une meilleure compréhension du comportement de la ligne de contact à travers les interactions entre celle-ci et les molécules physiquement adsorbées. Il peut notamment expliquer en partie la dispersion systématique des mesures d'angles de contact. Nos expériences peuvent aussi inspirer de nouvelles idées pour contrôler les propriétés de surface à l'échelle du nanomètre. En-

fin, elles étendent la notion de nettoyage capillaire, établie pour des particules solides [27, 31], jusqu'à l'échelle moléculaire. Ce qui montre une nouvelle possibilité pour obtenir une surface ultrapropre.

Références

- [1] Pierre-Gilles De Gennes. Wetting : statics and dynamics. *Rev. Mod. Phys.*, 57(3) :827, 1985.
- [2] Daniel Bonn, Jens Eggers, Joseph Indekeu, Jacques Meunier, and Etienne Rolley. Wetting and spreading. *Rev. Mod. Phys.*, 81(2) :739, 2009.
- [3] David Quéré. Wetting and roughness. *Annu. Rev. Mater. Res.*, 38 :71–99, 2008.
- [4] Daniel Y Kwok and August W Neumann. Contact angle measurement and contact angle interpretation. *Adv. Colloid Interf. Sci.*, 81(3) :167–249, 1999.
- [5] Antonio Checco, Atikur Rahman, and Charles T Black. Robust superhydrophobicity in large-area nanostructured surfaces defined by block-copolymer self assembly. *Adv. Mat.*, 26(6) :886–891, 2014.
- [6] Jikang Yuan, Xiaogang Liu, Ozge Akbulut, Junqing Hu, Steven L Suib, Jing Kong, and Francesco Stellacci. Superwetting nanowire membranes for selective absorption. *Nature Nanotechnology*, 3(6) :332–336, 2008.
- [7] P Silberzan, L Leger, D Ausserre, and JJ Benattar. Silanation of silica surfaces. a new method of constructing pure or mixed monolayers. *Langmuir*, 7(8) :1647–1651, 1991.
- [8] Sang Chul Lim, Seong Hyun Kim, Jung Hun Lee, Mi Kyung Kim, Taehyoung Zyung, et al. Surface-treatment effects on organic thin-film transistors. *Synthetic Metals*, 148(1) :75–79, 2005.
- [9] Thierry Ondarçuhu, Vincent Thomas, Marc Nunez, Erik Dujardin, Atikur Rahman, Charles T. Black, and Antonio Checco. Wettability of partially suspended graphene. *Sci. Rep.*, 6 :24237, APR 13 2016.
- [10] Harald F Okorn-Schmidt, Frank Holsteyns, Alexander Lippert, David Mui, Mark Kawaguchi, Christiane Lechner, Philipp E Frommhold, Till Nowak, Fabian Reuter, Miquel Banchs Piqué, et al. Particle cleaning technologies to meet advanced semiconductor device process requirements. *ECS J. S. State Sci. Technol.*, 3(1) :N3069, 2013.
- [11] Zhiting Li, Yongjin Wang, Andrew Kozbial, Ganesh Shenoy, Feng Zhou, Rebecca McGinley, Patrick Ireland, Brittni Morganstein, Alyssa Kunkel, Sumedh P Surwade, et al. Effect of airborne contaminants on the wettability of supported graphene and graphite. *Nature Mat.*, 12(10) :925–931, 2013.
- [12] J. F. Joanny and P. G. de Gennes. A model for contact angle hysteresis. *J. Chem. Phys.*, 81(1) :552–562, 1984.
- [13] SMM Ramos, E Charlaix, and A Benyagoub. Contact angle hysteresis on nano-structured surfaces. *Surf. Sci.*, 540(2-3) :355–362, 2003.
- [14] Melanie Ramiasa, John Ralston, Renate Fetzer, and Rossen Sedev. The influence of topography on dynamic wetting. *Adv. Colloid Interf. Sci.*, 206 :275–293, 2014.
- [15] Hugo Perrin, Romain Lhermerout, Kristina Davitt, Etienne Rolley, and Bruno Andreotti. Defects at the nanoscale impact contact line motion at all scales. *Phys. Rev. Lett.*, 116(18) :184502, 2016.
- [16] A. Pandey, B. Andreotti, S. Karpitschka, G. J. van Zwieten, E. H. van Brummelen, and J. H. Snoeijer. Singular Nature of the Elastocapillary Ridge. *Phys. Rev. X*, 10(3) :031067, SEP 25 2020.

- [17] D. Bensimon, A. J. Simon, V. Croquette, and A. Bensimon. Stretching dna with a receding meniscus : Experiments and models. *Phys. Rev. Lett.*, 74 :4754–4757, Jun 1995.
- [18] Mehdi M Yazdanpanah, Mahdi Hosseini, Santosh Pabba, Scott M Berry, Vladimir V Dobrokhotov, Abdelilah Safir, Robert S Keynton, and Robert W Cohn. Micro-wilhelmy and related liquid property measurements using constant-diameter nanoneedle-tipped atomic force microscope probes. *Langmuir*, 24(23) :13753–13764, 2008.
- [19] Mathieu Delmas, Marc Monthieux, and Thierry Ondarçuhu. Contact angle hysteresis at the nanometer scale. *Phys. Rev. Lett.*, 106(13) :136102, 2011.
- [20] Caroline Mortagne, Kevin Lippera, Philippe Tordjeman, Michael Benzaquen, and Thierry Ondarçuhu. Dynamics of anchored oscillating nanomenisci. *Phys. Rev. Fluid*, 2(10) :102201, 2017.
- [21] Shuo Guo, Min Gao, Xiaomin Xiong, Yong Jian Wang, Xiaoping Wang, Ping Sheng, and Penger Tong. Direct measurement of friction of a fluctuating contact line. *Phys. Rev. Lett.*, 111(2) :026101, 2013.
- [22] Sylvain Franiatte, Philippe Tordjeman, and Thierry Ondarçuhu. Wetting at the nanoscale : Molecular mobility induced by contact line forces. *Langmuir*, 38(8) :2614–2625, 2022.
- [23] Sylvain Franiatte, Philippe Tordjeman, and Thierry Ondarçuhu. Molecular desorption by a moving contact line. *Physical Review Letters*, 127(6) :065501, 2021.
- [24] Dylan B Millet, Neil M Donahue, Spyros N Pandis, Andrea Polidori, Charles O Stanier, Barbara J Turpin, and Allen H Goldstein. Atmospheric volatile organic compound measurements during the pittsburgh air quality study : Results, interpretation, and quantification of primary and secondary contributions. *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 110(D7) :D07S07, 2005.
- [25] Akira Kurokawa, Kenji Odaka, Yasushi Azuma, Toshiyuki Fujimoto, and Isao Kojima. Diagnosis and cleaning of carbon contamination on sio₂ thin film. *J. Surf. Anal.*, 15(3) :337–340, 2009.
- [26] Julien Dupré de Baubigny, Michael Benzaquen, Caroline Mortagne, Clémence Devailly, Sébastien Kosgodagan Acharige, Justine Laurent, Audrey Steinberger, Jean-Paul Salvetat, Jean-Pierre Aimé, and Thierry Ondarçuhu. Afm study of hydrodynamics in boundary layers around micro- and nanofibers. *Phys. Rev. Fluid*, 1(4) :044104, 2016.
- [27] Prabhakar Sharma, Markus Flury, and Jun Zhou. Detachment of colloids from a solid surface by a moving air–water interface. *J. Colloid Interf. Sci.*, 326(1) :143–150, 2008.
- [28] Abhinav Naga, Anke Kaltbeitzel, William SY Wong, Lukas Hauer, Hans-Jürgen Butt, and Doris Vollmer. How a water drop removes a particle from a hydrophobic surface. *Soft Matt.*, 17(7) :1746–1755, 2021.
- [29] S. Funk, J. Goering, and U. Burghaus. Adsorption kinetics and dynamics of small organic molecules on a silica wafer : Butane, pentane, nonane, thiophene, and methanol adsorption on sio₂/si(111). *Appl. Surf. Sci.*, 254(16) :5271 – 5275, 2008.
- [30] Yi Zhao, Yanmei Shen, Lu Bai, and Shiqing Ni. Carbon dioxide adsorption on polyacrylamide-impregnated silica gel and breakthrough modeling. *Appl. Surf. Sci.*, 261 :708–716, 2012.
- [31] Surachet Aramrak, Markus Flury, and James B Harsh. Detachment of deposited colloids by advancing and receding air–water interfaces. *Langmuir*, 27(16) :9985–9993, 2011.