

Traitement de PDMS pour reproduire les canaux micro-fluidiques semi-fermés de la surface de la peau de *Moloch Horridus*

Étude d'un procédé de traitement de surface par plasma d'oxygène radicalaire de PDMS micro-texturé ou non

FIGURES

Louis GINABAT, Sylvain CAM et Maxime GUERBOIS
Élèves de la 135^{ème} promotion de l'ESPCI Paris

1^{er} juin 2018

Table des figures

1	Traitement de surface par oxygène radicalaire afin de reproduire les canaux-semi-fermés de la peau de <i>Moloch Horridus</i> : protocole	2
2	Méthodes d'analyse des ondulations à la surface des échantillons de PDMS après traitement. Observations d'échantillons traités non texturés.	3
3	Longueurs d'onde des ondulations et superposition des ondulations avec le motif micro-fabriqués	4

Références

[1] Wade C. Sherbrooke, Andrew J. Scardino, Rocky de Nys, and Lin Schwarzkopf. Functional morphology of scale hinges used to transport water : convergent drinking adaptations in desert lizards (*Moloch horridus* and *Phrynosoma cornutum*). *Zoomorphology*, 126 :89–102, May 2007.

[2] Philip Withers. Cutaneous water acquisition by the thorny devil (*Moloch horridus* : *Agamidae*). *Journal of Herpetology*, 27(3) :270–275, September 1993.

[3] Junghwa Cha, Hyunjae Shin, , and Pilnam Kim. Crack/fold hybrid structure-based fluidic networks inspired by the epidermis of desert lizards. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 8 :28418–28423, October 2016.

[4] Manuela Nania, Omar K. Matar, and João T. Cabral. Frontal vitrification of pdms using air plasma and consequences for surface wrinkling. *Soft Matter*, 11 :3067–3075, February 2015.

[5] Patrick Görn and Sigurd Wagner. Topographies of plasma-hardened surfaces of poly(dimethylsiloxane). *J. Appl. Phys.*, 108(9) :093522, 2010.

[6] Rémy Brossard. *Spontaneous curvature of polydimethylsiloxane thin films : Mechanisms and applications : A new route for the low cost fabrication of new functionalities for microfluidics*. Theses, Université Paris-Saclay, December 2017.

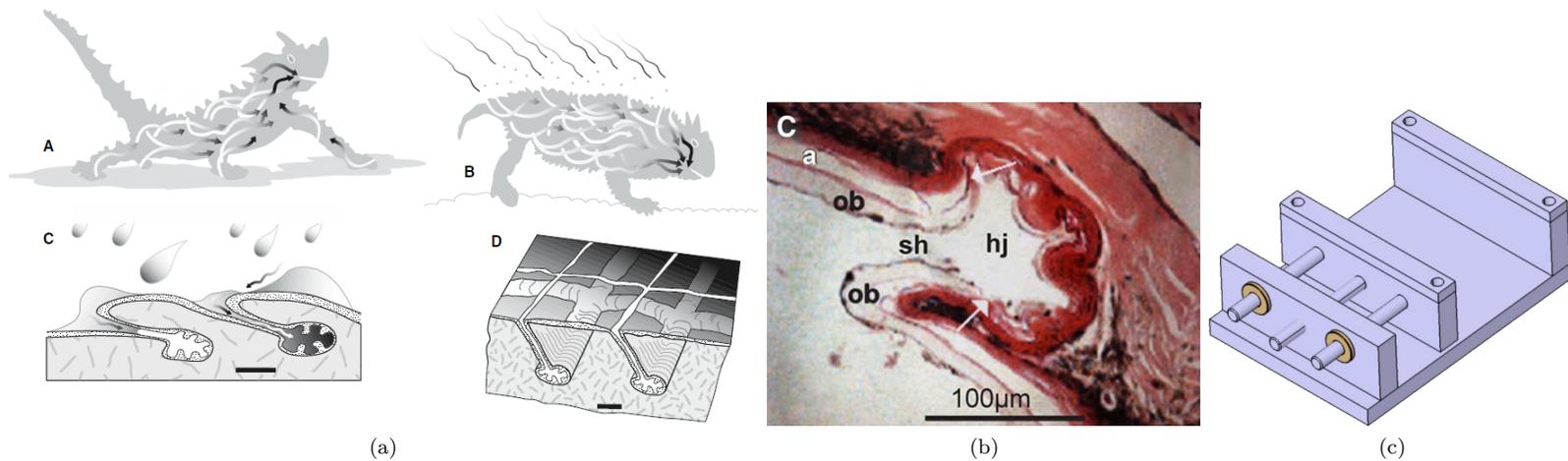


FIGURE 1: **Traitement de surface par oxygène radicalaire afin de reproduire les canaux-semi-fermés de la peau de *Moloch Horridus* : protocole**

(a) (A) Le lézard *Moloch Horridus* s'abreuve en posant ses pattes dans du sable humide, et l'eau remonte sous ses écailles jusqu'à sa bouche, par capillarité et grâce au travail exercé par des mouvements de mâchoire. (B) Le lézard peut gérer sa température interne en ouvrant les canaux semi-ouverts à la surface de sa peau et en laissant l'eau s'évaporer. (C) L'eau pénètre dans les canaux entre les écailles de la peau, réseau qui recouvre tout le corps de l'animal, et s'y déplace par capillarité. (D) Il existe un réseau à deux dimensions de canaux à la jointure des écailles. Schéma reproduit de [1]. Analyse quantitative de la montée capillaire de l'eau à la surface de *Moloch Horridus* dans [2]. (b) Vue en coupe d'un microcanal de *Moloch Horridus*. « ob » pour « Oberhautchen », surface. « sh » pour « scale hinge ». « hj » pour « hinge joint ». Image reproduite de [1]. (c) Schéma de la tireuse, appareil qui sert à étirer les échantillons de PDMS dans le four à plasma d'oxygène. (d) (1) Échantillon de PDMS non texturé, de dimensions caractéristiques $9\text{ cm} \times 2\text{ cm} \times 2\text{ mm}$. (2, 5) Étirement de $\varepsilon = 20\%$ avec la tireuse et protection de la face inférieure de l'échantillon par un film de cellophane. Exposition à un plasma d'oxygène radicalaire dont la puissance et la durée sont contrôlées. La face supérieure polymérise sous l'action du plasma sur une faible épaisseur, ce qui la rigidifie dans son état étiré. (3) Retrait du four à plasma et relâchement de la contrainte : apparition d'ondulations (*wrinkles*) dues à l'augmentation du module d'YOUNG en surface et à la pré-contrainte obtenues à l'étape précédente. (4) Échantillon de PDMS texturé, voir Fig. 3 pour le choix du motif. (6) Apparition de micro-canaux semi-fermés dans la direction orthogonale à l'étirement (aux pré-contraintes), et de craquelures (*cracks*) dans la direction de l'étirement. (7) Vue d'une craquelure. (8) Vue d'un micro-canal semi-fermé. Protocole adapté de [3].

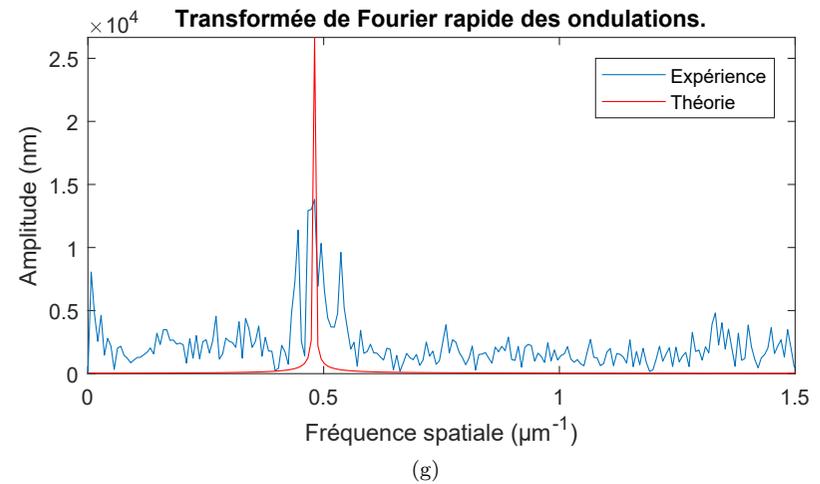
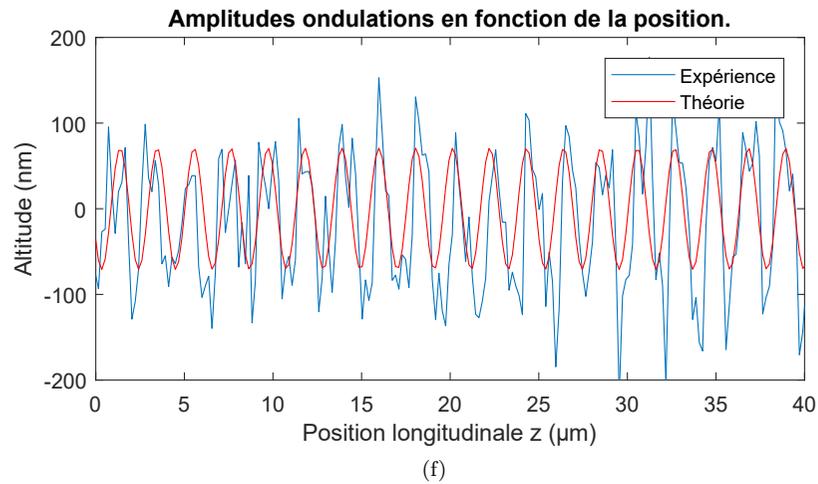
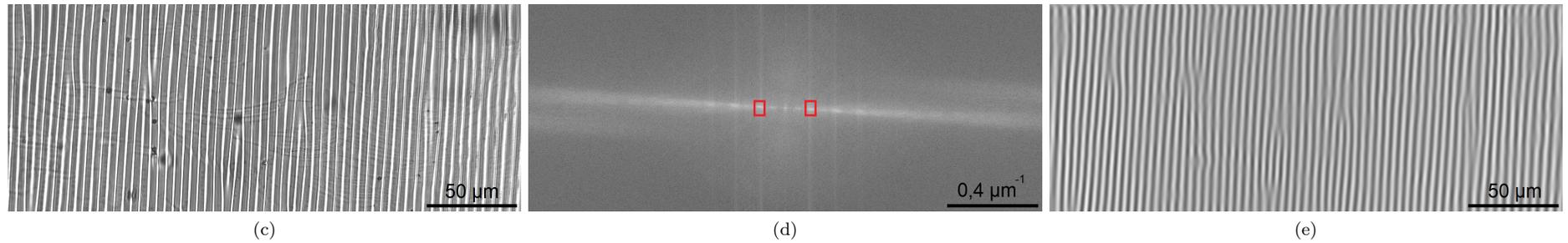
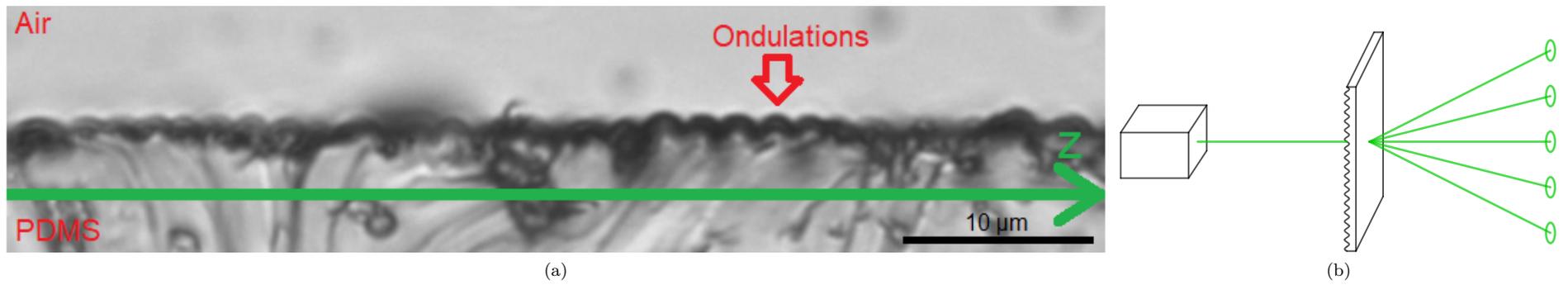


FIGURE 2: Méthodes d'analyse des ondulations à la surface des échantillons de PDMS après traitement. Observations d'échantillons traités non texturés.

(a) Vue de côté d'un échantillon de PDMS traité non texturé, au microscope. Coupe au scalpel. Paramètres pour l'échantillon : $P = 45 \text{ W}$, $t = 1860 \text{ s}$, $\varepsilon = 20 \%$. (b) Méthode de mesure de la longueur d'onde des ondulations par diffraction d'un faisceau LASER. Technique simple mais peu précise pour obtenir la longueur d'onde en différents points de l'échantillon. (c) Vue de dessus au microscope des ondulations de surface d'un échantillon traité au plasma (dose : $22,5 \text{ kJ}$). (d) Transformée de FOURIER de l'image (b). Les zones d'intérêt (encadrées en rouge), qui sont les pics avec le maximum d'intensité, sont sélectionnées pour n'observer que les ondulations et se débarrasser du bruit. (e) Image reconstruite après filtrage en fréquence qui ne contient que les ondulations. Longueur d'onde calculée : $4,5 \pm 0,2 \mu\text{m}$. Cette technique permet de visualiser l'état de surface (ondulations et craquelures) et de mesurer la longueur d'onde rapidement, mais est limitée par la résolution du microscope. (f) Ondulations de surface observées au profilomètre optique (en bleu). Sinusoïde attendue par la théorie ([4], [5] et [6]). Longueur d'onde de $2,0 \pm 0,2 \mu\text{m}$, amplitude de $70 \pm 1 \mu\text{m}$. Paramètres pour l'échantillon : $P = 45 \text{ W}$, $t = 1860 \text{ s}$, $\varepsilon = 20 \%$. La profilométrie permet d'accéder à la géométrie 3D de la surface, mais est longue à mettre en œuvre. (g) Transformée de FOURIER de l'image (f). Présence d'un pic signature d'une sinusoïde.

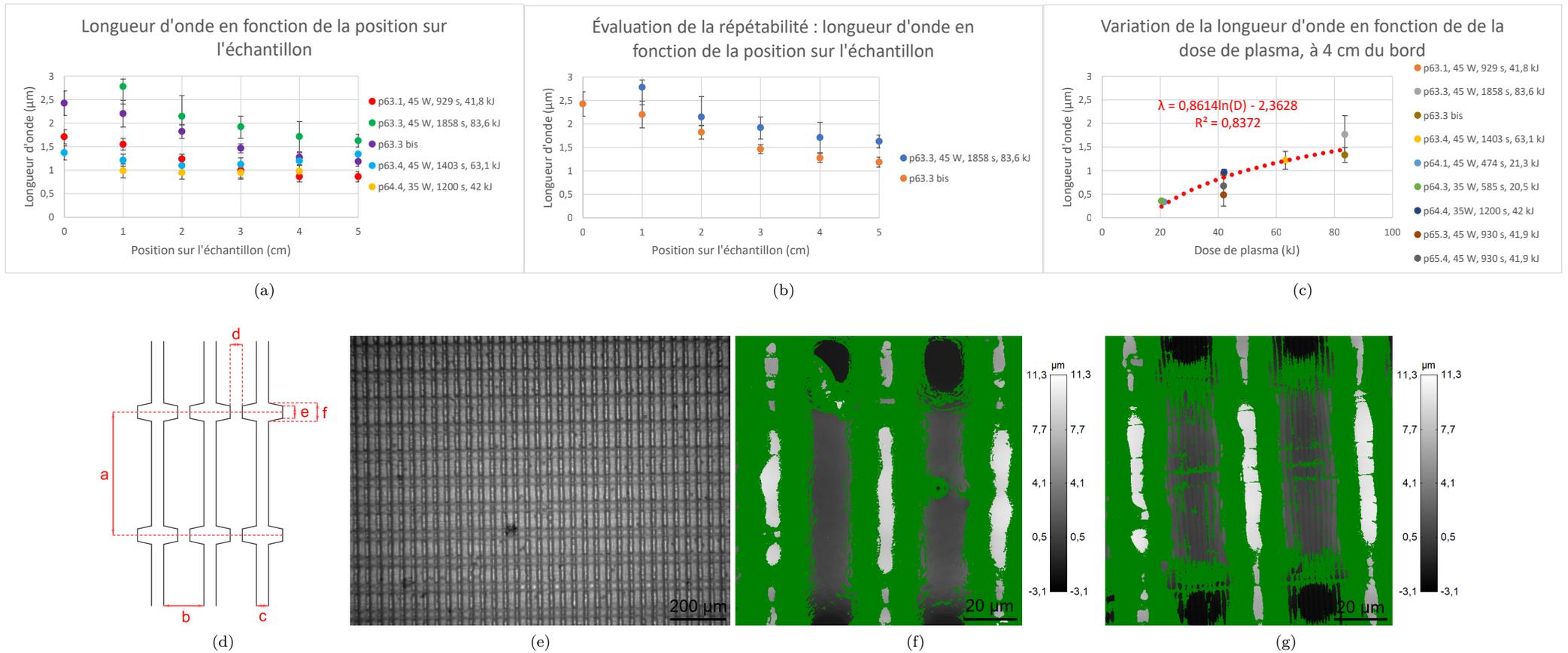


FIGURE 3: Longueurs d'onde des ondulations et superposition des ondulations avec le motif micro-fabriqu

(a) Longueur d'onde en fonction de la position le long de l'échantillon pour différents paramètres de traitement. Les causes possibles de la variation de longueur d'onde le long de l'échantillon sont une inhomogénéité des contraintes appliquées par la tireuse et/ou de la puissance du plasma dans le four. Mesures au LASER (cf. Fig. 2). **(b)** Évaluation de la répétabilité : deux échantillons traités dans les mêmes conditions ($\varepsilon = 20 \%$, $P = 45 \text{ W}$, $t = 1860 \text{ s}$). L'écart moyen entre les longueurs d'onde des deux échantillons est de $0,27 \pm 0,08 \mu\text{m}$, soit 25 % de la longueur d'onde. Les expériences sont donc peu répétables mais donnent toujours lieu au même profil d'évolution de la longueur d'onde le long d'un même échantillon. Mesures au LASER. **(c)** Évolution de la longueur d'onde en fonction de la dose (prise à 4 cm de l'extrémité de l'échantillon la plus proche du fond du four). La théorie ([6]) prévoit une courbe logarithmique : $\lambda = A \times \ln(D) + B$ où λ est la longueur d'onde en μm , D la dose de plasma en kJ , et les paramètres mesurés valent $A = 0,8 \pm 0,2 \mu\text{m}$ et $B = -2,4 \pm 0,9 \mu\text{m}$; $r^2 = 0,86$. Mesures au LASER. **(d)** Géométrie du motif obtenu à la surface par micro-fabrication. La direction verticale sur l'image, orthogonale à l'étirement, permet le repli de microcanaux semi-fermés ; les encoches permettent d'orienter les craquelures orthogonalement aux microcanaux avec un espacement contrôlé. Ce motif est issu de [3]. La résolution de notre gravure étant limitée à $10 \mu\text{m}$, et le repliement n'étant pas dépendant de l'échelle en théorie, nous avons choisi d'adapter les dimensions. La profondeur est de $10 \pm 0,2 \mu\text{m}$. Les paramètres pour l'échantillon présenté ici sont $a = 100 \mu\text{m}$, $b = 33 \mu\text{m}$, $c = 10 \mu\text{m}$, $d = 10 \mu\text{m}$, $e = 10 \mu\text{m}$, $f = 15 \mu\text{m}$. **(e)** Observation au microscope de l'échantillon texturé avant traitement. **(f)** Observation au profilomètre optique de la surface de l'échantillon texturé. Le vert indique des pentes trop abruptes pour être mesurées au profilomètre. **(g)** Même échantillon après traitement au plasma d'oxygène avec les paramètres $\varepsilon = 20 \%$, $P = 45 \text{ W}$, $t = 1860 \text{ s}$. Les ondulations se forment avec une longueur d'onde de $2 \mu\text{m}$, ce qui est un ordre de grandeur inférieur à la taille caractéristique du motif gravé. De plus l'amplitude de ces ondulations est 100 fois inférieure à la profondeur des motifs micro-fabriqués. Les deux réseaux se superposent mais ne s'influencent pas. Il n'y a donc pas de repliement de microcanaux pour ces paramètres de traitement par plasma et ces dimensions de gravure. Il faudrait donc pouvoir graver avec des dimensions plus petites (paramètres définis en (d) et profondeur) ou obtenir des ondulations plus grandes (amplitude et longueur d'onde) avec le traitement au plasma.