



Université Claude Bernard



DIPLÔME NATIONAL DE DOCTORAT

(Arrêté du 25 mai 2016)

Date de la soutenance : **28 novembre 2017**

Nom de famille et prénom de l'auteur : **BEN ALI Imed Eddine**

Titre de la thèse : « Mouillabilité, adhésion et friction des surfaces hétérochimiquement texturées »



Résumé

Depuis bien très longtemps, il est bien établi que la science des matériaux repose sur la relation entre les propriétés, la morphologie structurale et la mise en forme des matériaux qui constituent les objets (métaux, polymères, semi-conducteurs, céramiques, composites, etc.). Jusqu'au XIXe siècle l'utilisation des matériaux était essentiellement empirique. Une évolution majeure a eu lieu quand Josiah Willard Gibbs (1839-1903), physico-chimiste américain, réussit à démontrer que les propriétés thermodynamiques reliées à la structure atomique avaient un lien direct avec les propriétés physiques d'un matériau. À la suite de cela, la science des matériaux ne s'est plus limitée aux métaux ou aux céramiques et s'est considérablement diversifiée, notamment avec le développement des plastiques, des semi-conducteurs après la Seconde Guerre mondiale.

De ce fait, après un XXème siècle qui a été marqué par un essor exponentiel des avancements technologiques dans les différents domaines de l'industrie, le monde scientifique se trouve actuellement en face d'un nouveau défi. Les conditions économiques plus restrictives, dues principalement à l'augmentation du prix de l'énergie, et les nouvelles exigences environnementales font que la recherche soit souvent réorientée vers l'optimisation des systèmes existants. Cette optimisation se traduit généralement par une réduction de la consommation énergétique et une augmentation des performances. Les performances d'une machine sont directement influencées par son efficacité en termes de frottement, adhésion et mouillabilité. Par exemple, dans le cas de l'automobile, environ un tiers de l'énergie consommée est utilisée pour surmonter le frottement entre les différents éléments mécaniques.

L'état de surface a une influence très importante sur le fonctionnement d'un ensemble mécanique, pour le contact soit sec ou lubrifié. Les progrès technologiques qui ont été réalisés au cours de dernières années permettent aujourd'hui une maîtrise très précise de l'état de surface. Les textures topographiques, qui peuvent être obtenues par différentes techniques de fabrication (micro usinage, gravure chimique, laser etc.), ont émergé afin de réduire le frottement. Alors que le nombre d'études consacrées au sujet de la texturation topographique a fortement augmenté, l'étude des effets de la texturation hétéro-chimiques des surfaces sur les propriétés

tribologiques reste un sujet peu étudié.

Ainsi, nous nous sommes intéressés dans cette thèse à l'influence de textures hétérochimiques de tailles diverses sur les propriétés de mouillabilité, adhésion et frottement. Dans le premier chapitre, nous avons proposé une stratégie de micro-texturation des surfaces. La texturation de surface a été réalisée à l'aide d'une machine M μ CP (Mini Microcontact Printer) fabriqué au laboratoire IMP Lyon1 suivie par un greffage de chaînes de polymères. En outre, nous avons notamment étudié de manière approfondie la dynamique d'une goutte pendante sur différentes surfaces texturées de différents motifs et formes alternées (Hydrophile/Hydrophobe) ayant un contraste de mouillabilité (environ 70 °). Par conséquent, nous avons observé une alternance de mouvement de la ligne de contact entre un comportement de glissement (entre les motifs) et un comportement de type "pinning/depinning" sur toutes les textures. Ce comportement de type glisser-bloquer provoque alors une variation importante d'angle de contact. De ce fait, nous avons constaté que la micro texturation des surfaces avec des motifs et des entités chimiques différentes (Hydrophile/Hydrophobe) peuvent améliorer leurs propriétés de mouillabilité. Ensuite, l'adhésion a été analysée à l'aide d'un dispositif de type JKR développé au laboratoire (pour Johnson, Kendall et Roberts) et d'une machine AFM/FFM (Peak Force). Ces techniques permettent d'observer le contact entre une sphère élastique et une pointe rigide avec une surface texturée tout en contrôlant la force entre les surfaces. Pour les surfaces texturées de type (Hydrophile/Hydrophobe) et de différentes tailles, nous avons observé un comportement adhésif similaire à l'échelle macroscopique et nanométrique. Cependant, pour les surfaces texturées de type (Hydrophobe/Hydrophobe), nous avons remarqué que l'augmentation des tailles des motifs, améliorée forcément la réponse adhésive des surfaces. Cette amélioration peut être attribuée à l'adsorption de chaînes de PDMS libres sur les zones faiblement structurées des motifs (MTS) due à la faible densité de greffage des molécules de MTS lors de l'étape de microcontact printing.

Le deuxième chapitre se focalise sur l'étude de frottement. Un tribomètre développé au laboratoire LTDS et une machine FFM ont été utilisés pour mesurer la force de frottement dynamique. À l'échelle macroscopique, ces expériences ont montré que les tailles et la distribution des textures n'impactait pas les coefficients de frottement pour les différentes surfaces texturées de type (Hydrophile/Hydrophobe) et (Hydrophobe/Hydrophobe). Il a été constaté que ce comportement peut être attribué aux propriétés mécaniques des substrats et les différents paramètres expérimentaux utilisés pour ces mesures. À l'échelle nanométrique, une légère variation a été observée pour les surfaces de types (Hydrophile/Hydrophobe) due à la faible densité de greffage des molécules de MTS lors d'étape de microcontact printing. Cependant, pour les surfaces de type (Hydrophile/Hydrophobe), une variation non négligeable de ($\times 2,5$). Nous l'avons expliqué par l'arrachement des chaînes de PDMS par la pointe de la FFM au cours de l'expérience. En effet, l'élargissement de la taille des motifs accroît significativement la possibilité de l'arrachement des chaînes de PDMS par la pointe de FFM, en augmentant ainsi la réponse frictionnel des surfaces.

Contrairement à l'attendue, les résultats des expériences de frottement n'apportent pas d'information concernant l'influence des textures hétérochimiques sur le comportement frictionnel. De ce fait, nous avons choisi d'utiliser l'étude du démouillage d'un film mince de polymère sur les surfaces texturées, comme une

technique d'analyse des phénomènes de friction à l'interface des polymères.

Dans une première partie, l'étude du démouillage d'un film mince de polystyrène sur une surface texturée de type (Hydrophile/Hydrophobe) nous a permis de suivre l'évolution de l'instabilité du bourrelet à l'interface. En effet, il a été possible de relier les propriétés moléculaires et interfaciales avec des caractéristiques macroscopiquement telles que la vitesse du démouillage et la forme du bourrelet. Ainsi, nous avons montré que ce type de démouillage peut se dérouler en quatre étapes différentes (Formation du bourrelet, gonflement du bourrelet, formation du doigt et détachement de goutte). Afin de comprendre ces phénomènes, nous avons étudié dans un premier temps l'influence de la géométrie du démouillage et les mécanismes de dissipations interfaciales. Nous avons observé que la chimie et les tailles des textures imprimés l'instabilité du bourrelet est largement influencée par la chimie et les tailles de motifs imprimé sur les surfaces texturées influencent l'instabilité du bourrelet. En effet, l'utilisation de ce type de démouillage, nous donnent simplement une analyse quantitative de phénomènes de frictions aux interfaces. Par conséquent, pour avoir une analyse qualitative, nous avons étudié le démouillage des couches minces de PDMS déposées sur surfaces texturées de types (Hydrophile/Hydrophobe). Ce type de démouillage est généralement appelé démouillage autophobe. En effet, il a été possible de calculer l'angle de contact et la longueur de glissement en reliant les propriétés moléculaires et interfaciales avec des caractéristiques macroscopiquement observables tels que la vitesse du démouillage et la largeur du bourrelet. En conséquence, il a été trouvé que l'élargissement de tailles des motifs accroître significativement la possibilité de à l'adsorption de film de PDMS démouillé sur les zones faiblement structurée des motifs (MTS) due à la faible densité de greffage des molécules de MTS lors d'étape de microcontact printing.

Dans le dernier chapitre, nous analysons la friction d'un hémisphère de PDMS sur un substrat déformable (PDMS réticulé) de différentes épaisseurs. En effet, il été possible de mesurer à l'aide d'un tribomètre le coefficient de frottement, la rigidité et le module de Young des différents substrats déformables. Pour des faibles épaisseurs, nous avons trouvés que l'épaisseur de PDMS réticulé et les propriétés mécaniques des substrats influencent fortement la friction. A partir d'une certaine épaisseur de PDMS réticulé, les phénomènes de friction augmentent. Cette augmentation s'explique par la déformation du substrat et la formation d'une dépression entre le bourrelet et le substrat dissipant ainsi plus d'énergie. Plus l'épaisseur d'élastomère est important, plus les phénomènes de dissipation sont prépondérants.

Enfin, nous détaillons des résultats expérimentaux qui s'inscrivent dans l'étude du démouillage de PDMS sur un substrat déformable (PDMS réticulé). Nous étudions l'effet de l'épaisseur ainsi que le module élastique de l'élastomère sur le démouillage de films minces de PDMS. Les données observée laissent supposer l'existence de deux régimes différents. A faible épaisseurs nous pouvons supposer que la dissipation viscoélastique et la force de retour élastique sont plus faibles par rapport à la dissipation due au frottement ce qui entraîne de faibles réponse frictionnelle. Pour les fortes épaisseurs, la forte déformation du substrat et l'apparition d'une dépression explique la faible vitesse de démouillage. En effet, cette décroissance est liée à l'augmentation de la dissipation viscoélastique et la force de retour élastique lors de la déformation du substrat qui est d'autant plus grande que l'épaisseur de l'élastomère est importante.

Mots clés : Surface texturée, mouillabilité, adhésion, friction, démouillage, film mince, microcontact printing, tribologie, FFM, AFM.