



HAL
open science

Imbibition d'un contact statique texturé

Florian Bremond, Juliette Cayer-Barrioz, Denis Mazuyer

► **To cite this version:**

Florian Bremond, Juliette Cayer-Barrioz, Denis Mazuyer. Imbibition d'un contact statique texturé. CFM 2011 - 20ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2011, Besançon, France. hal-03422645

HAL Id: hal-03422645

<https://hal.science/hal-03422645>

Submitted on 9 Nov 2021

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.

Imbibition d'un contact statique texturé

Florian Brémond^{a,b}, Juliette Cayer-Barrioz^b, Denis Mazuyer^b

a. HEF Recherche et Développement, ZI Sud, rue Benoit Fourneyron, 42166 Andrézieux-Bouthéon cedex, France

b. Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes, UMR5513 CNRS – Ecole Centrale de Lyon, 36 avenue Guy de Collongue, 69134 Ecully cedex, France

Résumé :

L'effet de la rugosité sur la propagation d'un lubrifiant dans un contact statique non conforme est étudié. Deux échelles de rugosité de période nanométrique et micrométrique créées par laser femtoseconde sont superposées en surface d'une bille acier. L'avancée temporelle du front de lubrifiant et sa cinétique de propagation autour et au sein du contact bille / plan sont mesurées pour différentes viscosités et texturations de surface : la relation entre la géométrie de ce front et l'anisotropie de la texturation est discutée.

Abstract :

The effect of surface roughness on the propagation of a lubricant in a non conformal static contact is considered. Two scales of roughness – nanometer and micrometer period – created by femtosecond laser are superimposed on a steel ball surface. The lubricant propagation of the lubricant and its kinetic imbibition around and within the contact ball / disc are measured for various viscosities and surface texturing : the relation between the geometry of this front and the anisotropy of the texture is discussed.

Mots clefs : texturation ; imbibition ; capillarité

1 Introduction

Le mouillage de surfaces métalliques par des lubrifiants est un paramètre clé dans la compréhension des mécanismes de lubrification des contacts tribologiques. En statique, le mouillage d'un fluide sur une surface homogène peut se caractériser par la mesure de l'angle de contact entre une goutte de lubrifiant et un plan, grâce à la relation de Young. Dans le cas de surfaces réelles, la présence d'hétérogénéités chimiques et / ou de rugosités sur leur surface introduit des fluctuations de l'angle de contact, en particulier une hystérésis entre l'angle de contact à l'avancée et au retrait du liquide sur le plan. Johnson et Dettre [1] ont mesuré expérimentalement les angles de contact d'un fluide sur un substrat en cire en fonction de sa rugosité. Ils démontrent dans le domaine hydrophile que la rugosité du solide diminue l'angle de Young et tend donc à rendre la surface plus mouillante.

Différents auteurs comme Wu [2] et Groenendijk [3] ont créé par laser des surfaces métalliques nano-texturées et anisotropes, appelées ripples dans la littérature. Ils démontrent que les rugosités engendrées puis silanisées augmentent le caractère hydrophobe de l'interface.

Le but de cette étude est d'étudier l'envahissement d'un contact mouillant sphère / plan par un lubrifiant et d'observer l'influence de la présence éventuelle de rugosités anisotropes contrôlées sur la mouillabilité de cette interface.

2 Protocole expérimental

Un micro volume de fluide est introduit à proximité d'un contact établi entre une bille et un plan. Initialement à vitesse nulle, le fluide se propage en direction du contact par l'intervention de forces capillaires et son évolution est caractérisée en fonction de sa viscosité et de la nature des surfaces.

Le tribomètre IRIS [4] réalise un contact entre une bille en acier AISI 52100 de rayon 9,525 mm et un disque en silice rendu semi-réfléchissant. La cavité optique formée par cette interface crée sous incidence de lumière blanche des franges interférométriques observables par un système microscope optique - caméra mono CCD ou caméra rapide. Les interférogrammes obtenus permettent de mesurer la distribution des épaisseurs de film lubrifiant et leur évolution temporelle, à l'intérieur et au voisinage du contact de Hertz. La charge normale appliquée, contrôlée par un capteur à jauges de déformation, vaut 15 N dans le cadre de ce travail.

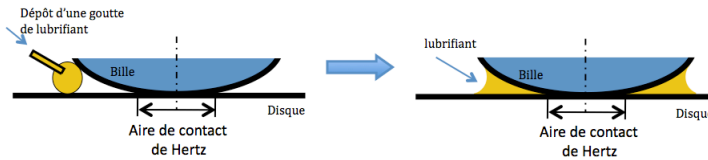


FIGURE 1 – Schéma de principe d'une expérience d'imprégnation d'un contact statique

Deux billes en acier sont utilisées dans cette étude. La première est une bille polie miroir de rugosité R_a inférieure à 5 nm. Une texturation de surface par laser femtoseconde a généré sur la seconde bille deux échelles topographiques : des rugosités nanométriques périodiques visibles sur la cartographie AFM de la figure 2 – $\lambda = 650$ nm – d'amplitude 120 nm appelées couramment ripples dans la littérature, superposées à des ondulations de période 10 μm et d'amplitude 100 nm induites par le déplacement du laser lors de la fabrication de la texturation. La direction principale des ripples forme un angle α de 15° avec celle des ondulations.

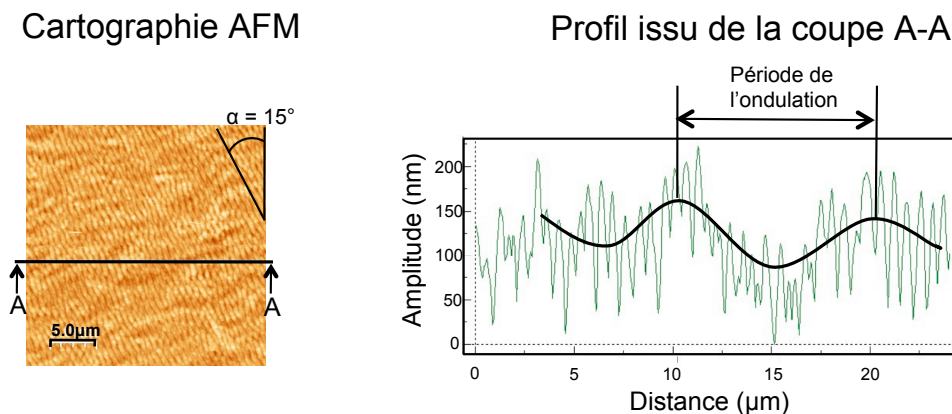


FIGURE 2 – Topographie AFM de la bille texturée - visualisation des ripples et de l'ondulation

Le plan semi-réfléchissant possède une rugosité R_a inférieure à 5 nm. Deux huiles de base minérales sont testées : une huile 330NS de viscosité dynamique 140 mPa.s (20°C) ainsi qu'une huile PAO100 de viscosité dynamique 4 Pa.s (20°C).

3 Imbibition d'un contact statique - cas d'une bille non texturée

Les interférogrammes de la figure 3 montrent l'évolution du lubrifiant dans le contact bille lisse / plan chargé sous 15N. L'huile imbibe progressivement la périphérie du contact sans pénétrer à l'intérieur. En effet, la pression générée dans le contact de Hertz, de l'ordre de 10^8 Pa, est supérieure à la pression maximale d'un capillaire et s'oppose à l'entrée du fluide dans le contact.

En périphérie, la propagation du lubrifiant peut être caractérisée en suivant l'évolution du front de lubrifiant en fonction du temps : l'origine choisie correspond au moment où le ménisque d'huile se reforme après avoir franchi le contact de Hertz.

Pour l'huile 330NS, la cinétique d'imbibition du contact X_t est décrite à la figure 4 en fonction de \sqrt{t} .

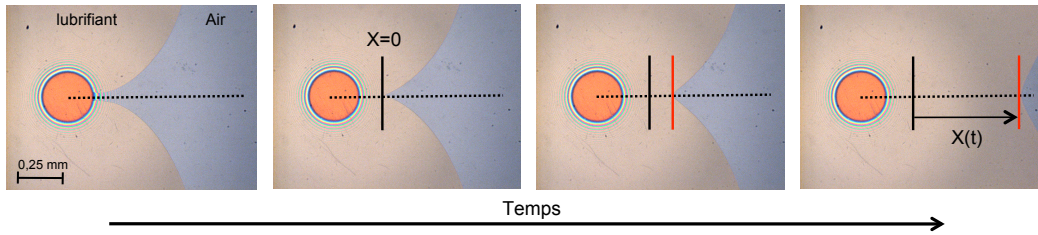


FIGURE 3 – Evolution du front d'imbibition du lubrifiant 330NS dans un contact bille lisse / plan

Aux temps longs, supérieurs à 0,1 seconde, la propagation varie en $t^{1/2}$: ce comportement est typique de la cinétique d'ascension d'un fluide dans un tube cylindrique de rayon R_c .

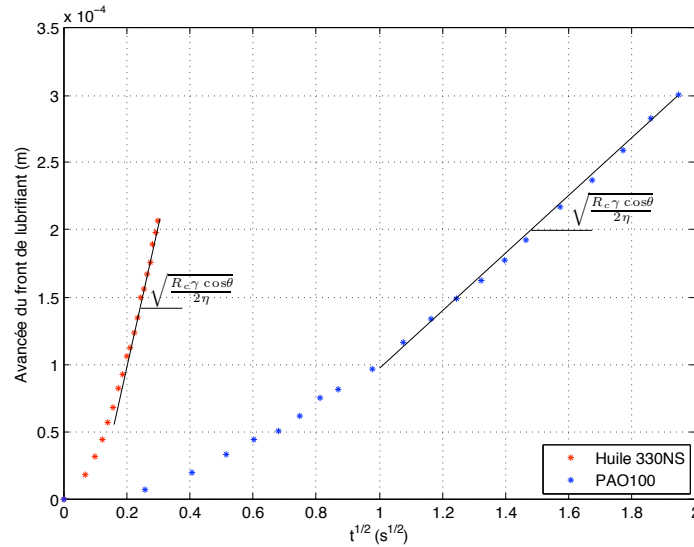


FIGURE 4 – Evolution du front d'imbibition en fonction de \sqrt{t} pour les lubrifiants 330NS et PAO100 dans un contact bille lisse / plan – $T = 28^\circ C$, $\eta_{330NS} = 0,12$ Pa.s, $\eta_{PAO100} = 2,64$ Pa.s

En effet, la cinétique du fluide dans un capillaire résulte de la compétition entre une force motrice capillaire et une force visqueuse associée à l'écoulement de Poiseuille (la longueur capillaire doit être supérieure au rayon de pore pour pouvoir négliger l'effet de la pesanteur). De cet équilibre découle la loi de Washburn [5] qui modélise la vitesse de propagation du liquide dans un capillaire de rayon R_c

$$X(t) = \sqrt{\frac{(1 - \frac{R_c}{R_{res}}) \cdot R_c \cdot \gamma \cdot \cos \theta}{2 \cdot \eta}} \cdot t^{1/2} \quad (1)$$

avec η la viscosité du fluide, γ sa tension de surface, R_{res} le rayon du réservoir de fluide disponible et $\cos \theta$ l'angle de contact du fluide à l'avancée.

Conformément aux travaux de Renondeau [6], il est possible de considérer le contact sphère / plan comme un capillaire horizontal R_c alimenté par un réservoir R_{res} . En supposant dans toute l'étude un mouillage total du lubrifiant sur les surfaces – $\cos \theta = 1$ – et le réservoir de lubrifiant infini, l'application de la loi de Washburn aux temps supérieurs à 0,1 seconde permet de calculer le rayon de pore équivalent du contact qui est égal à $6 \mu m$.

Aux temps courts – inférieurs à 0,1 seconde – la relation de Washburn n'est plus valable, du moins en considérant un rayon de pore équivalent constant.

Une évolution similaire est observée pour des expériences réalisées avec le lubrifiant PAO100, comme le montre la figure 4. La différence de viscosité entre les huiles se caractérise par les pentes des parties

linéaires. Le rayon de pore équivalent calculé pour la PAO100 vaut $6 \mu\text{m}$, ce qui souligne l'indépendance de R_c avec le lubrifiant. Le rayon de pore équivalent ne semble être piloté que par la géométrie du contact.

4 Imbibition d'un contact statique - cas d'une bille texturée

Dans le cas d'un contact bille texturée / plan, le fluide envahit la périphérie du contact mais également l'intérieur de celui-ci. L'imprégnation de l'interface peut ainsi être décomposée en deux phénomènes distincts, visibles sur les interférogammes de la figure 5.

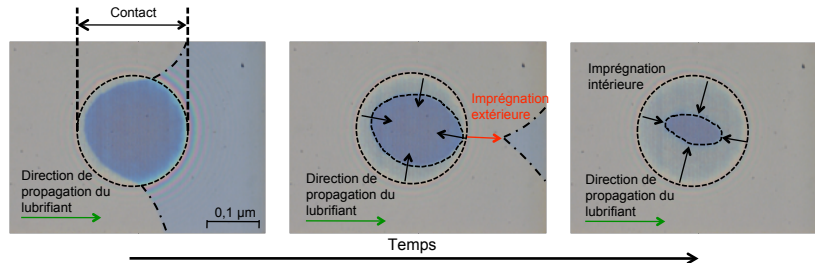


FIGURE 5 – Evolution du front d'imbibition du lubrifiant 330NS dans un contact bille texturée / plan

4.1 Imbibition extérieure

L'évolution du front de lubrifiant à l'extérieur du contact de Hertz pour les deux lubrifiants est illustrée par le graphe de la figure 6. Comme dans le cas du contact bille lisse / plan, la courbe se décompose en deux parties. Aux temps longs, on observe une linéarité de l'évolution du front d'huile en fonction de \sqrt{t} . Des expériences de mouillage réalisées sur des plans montrent que l'angle de contact entre le lubrifiant et une surface lisse diffère peu de celui mesuré avec une surface texturée. Par conséquent, il est possible de calculer pour les deux lubrifiants des rayons de pore équivalents, qui ont des valeurs très proches de celles obtenues pour les contacts lisses. Ces rayons de pore équivalents semblent donc indépendants de la topographie des surfaces en contact.

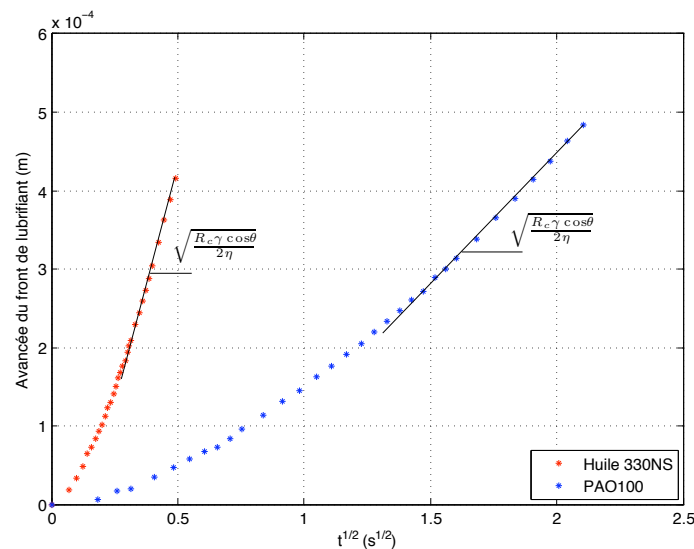


FIGURE 6 – Evolution du front d'imbibition extérieure en fonction de \sqrt{t} pour les lubrifiants 330NS et PAO100 dans un contact bille texturée / plan – $T = 28^\circ\text{C}$, $\eta_{330NS} = 0,12 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, $\eta_{PAO100} = 2,64 \text{ Pa}\cdot\text{s}$

4.2 Imbibition intérieure

La figure 5 démontre l'existence d'une cinétique d'imprégnation intérieure pour un contact texturé. Les interférogrammes de la figure 7 illustrent une progression type de lubrifiant au sein du contact texturé.

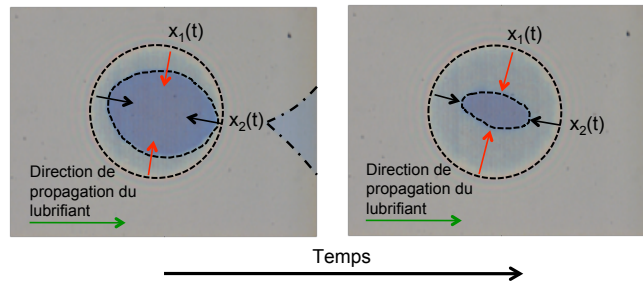


FIGURE 7 – Identification des deux directions d'imbibition du lubrifiant 330NS dans un contact bille texturée / plan

L'avancée du front de lubrifiant n'est pas isotrope et semble elliptique. L'analyse des fronts dits rapides – $x_1(t)$ – et lents – $x_2(t)$ – est synthétisée par les graphes de la figure 8.

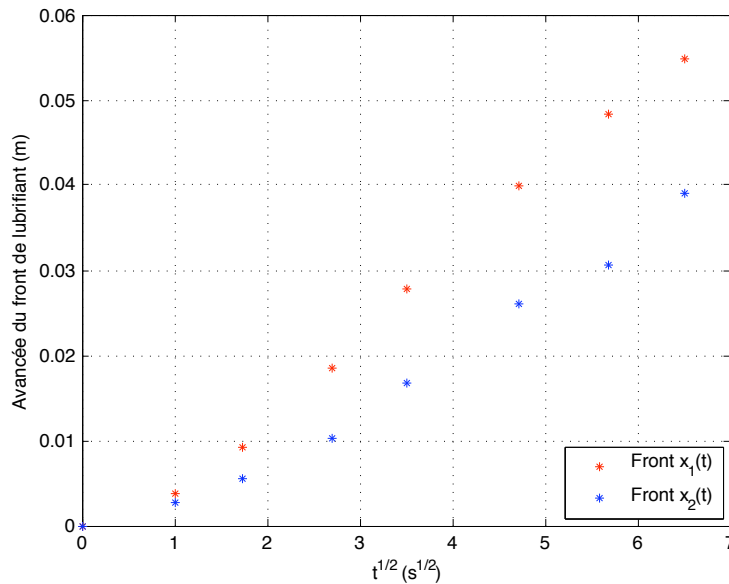


FIGURE 8 – Cinétiques d'évolution des fronts $x_1(t)$ et $x_2(t)$ en fonction de \sqrt{t} - lubrifiant PAO100, $T = 24^\circ\text{C}$, $\eta_{PAO100} = 3,47 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ - contact bille texturée / plan

La figure 8 montre que l'imbibition intérieure peut également être modélisée par la loi de Washburn. Ainsi, le front de lubrifiant suivant la direction x_1 a un rayon de pore équivalent égal à 20 nm , tandis que le lubrifiant se propage dans la direction x_2 comme un fluide dans un capillaire cylindrique de rayon 12 nm .

Le front de diffusion le plus rapide – $x_1(t)$ – est parallèle à la direction des ripples et forme avec la direction des ondulations un angle de 15° qui est retrouvé sur la cartographie AFM de la figure 2. Il semble donc que les ripples pilotent au premier ordre la cinétique de propagation du lubrifiant à l'intérieur du contact de Hertz.

5 Conclusions

L'imbibition en lubrifiant d'un contact sphère / plan peut être reliée aux temps longs à la cinétique de propagation d'un fluide dans un capillaire cylindrique. L'application de la loi de Washburn permet de calculer des rayons de pore équivalents qui sont indépendants de la viscosité des lubrifiants. L'imprégnation à l'extérieur du contact de Hertz ne varie pas avec l'introduction d'une texturation de surface. A l'opposé, le lubrifiant envahit l'intérieur du contact texturé, ce qui n'est pas le cas pour une interface lisse. Deux fronts du lubrifiants sont identifiés et la cinétique d'imbibition intérieure la plus rapide est reliée à l'orientation des ripples dans le contact. Il semble nécessaire de caractériser l'influence de la force normale sur les différentes cinétiques d'imprégnation et d'étudier l'effet d'autres texturations de surfaces sur l'imprégnation intérieure d'un contact. Le comportement de la propagation du lubrifiant aux temps courts devra être interprété.

Un modèle théorique est en cours de réalisation pour tenter de mettre en évidence le lien entre les paramètres géométriques et topographiques réels d'un contact et les rayons de pore équivalents calculés aux temps longs par la relation de Washburn.

Références

- [1] Johnson, Dettre. 1964 Contact angle, wettability and adhesion. *Advances Chemical series*. **43** 112-135
- [2] Wu, Li, Li. 2009 Superhydrophobic surfaces fabricated by microstructuring of stainless steel using a femtosecond laser. *Applied Surface Science*. **In press**
- [3] Groenendijk, M. 2008 Fabrication of Super Hydrophobic Surfaces by fs Laser Pulses. *Laser Technik Journal*. **5** 44-47
- [4] Mourier, L. 2006 Transient increase of film thickness in micro-textured EHL contacts. *Tribology International*. **39** 1745-1756
- [5] Washburn, E. 1921 The dynamics of capillary flow. *Physical Review*. **17** 272 - 283
- [6] Renondeau, H. 2004 Evolution des propriétés tribologiques et physico-chimiques d'une graisse polyurée dans un roulement à billes de roue. *Thèse, Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes*.