

Caractérisation expérimentale d'instabilités de frottement pour un contact élastomère/verre lubrifié à l'eau

J. Le Rouzic, A. Le Bot, J. Perret-Liaudet, D. Mazuyer

Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes, Ecole Centrale de Lyon, 36 Avenue Guy de Collongue, 69134 Ecully Cedex.

Résumé :

Ce papier traite du frottement élastomère/verre avec lubrification à l'eau. Sous certaines conditions de lubrification et de vitesses relatives, un bruit de crissement peut être généré. Des mesures expérimentales ont été effectuées sur un tribomètre conçu pour l'étude des phénomènes transitoires. Cela a consisté à corréler des mesures stationnaires de frottement à des mesures vibratoires permettant de comprendre l'apparition de ces instabilités.

Abstract :

This paper deals with elastomer/glass friction with water lubrication. Several relative velocities lead to induce squealing noises. Experimental measurements have been performed on a original tribometer, conceived to study dynamic phenomena. Stationary measurements of friction have been correlated to vibrational ones enabling to understand the occurrence of these instabilities.

Mots clefs : tribologie ; instabilités ; élastomères

Introduction

La plupart du temps, les instabilités de frottement génèrent des sons de crissement dans le domaine audible et constituent donc une nuisance dans beaucoup de secteurs, principalement dans celui des transports (pneus, essuie-glaces,...). Ces instabilités sont en général difficiles à contrôler et très dépendantes des conditions de lubrification et des vitesses relatives. Si on considère un oscillateur masse-ressort-amortisseur à une dimension, en contact frottant sur un tapis roulant, il apparaît que le système ne peut devenir instable que si la force de frottement décroît avec la vitesse [2]. Nous nous proposons dans ce papier d'utiliser ce critère dans le cas d'une loi de frottement suivant une loi de Stribeck et de comparer des mesures expérimentales avec des prédictions théoriques. Des mesures de frottement d'élastomères en contact lubrifié à l'eau ont été mises en oeuvre, corrélées avec des mesures vibratoires caractérisant les instabilités se produisant sous certaines vitesses.

1 Méthodes expérimentales

Les mesures présentées dans cet article ont été effectuées sur un tribomètre développé au laboratoire, nommé "LUG", conçu pour étudier les phénomènes dynamiques aux interfaces (Fig. 1). Il est possible d'imposer différents types de cinématiques (roulement, glissement, vitesse alternative,...). Pour cette étude, seules des vitesses stationnaires ont été utilisées. Le contact est établi entre l'échantillon et un disque en verre revêtu d'une couche de chrome semi-réfléchissante de 10 nm d'épaisseur et d'une couche de silice de 200 nm permettant d'observer le contact par une technique interférométrique. En effet, la lumière blanche est émise par un microscope. Une partie de cette lumière est réfléchiée par la couche de chrome. La partie transmise est réfléchiée par les spots de l'échantillon en contact. Les 2 rayons créent des franges interférométriques acquises par une caméra CCD. Cela permet d'observer l'aire

réelle de contact. Ainsi le tracé d'une courbe de frottement/vitesse peut être interprété en comparant les aires sèches et mouillées [3]. En effet, la chute du coefficient de frottement avec la vitesse peut être expliquée par une diminution de l'aire sèche en zone de régime mixte menant à un très faible coefficient de frottement en régime élasto-hydro-dynamique.

Le disque est mis en rotation par un moteur couvrant des vitesses de rotation de 0.03 tr/min à 3000 tr/min.

Un capteur de force 2-axes mesure les forces normale et tangentielle entre le disque et l'échantillon, donnant le coefficient de frottement. Afin de mettre en évidence les instabilités, les vibrations de l'échantillon sont obtenues grâce à un vibromètre OFV 505 de Polytech (longueur d'onde de 633 nm, gamme de fréquences 0.5 Hz-250 kHz). Il donne accès au déplacement et à la vitesse.

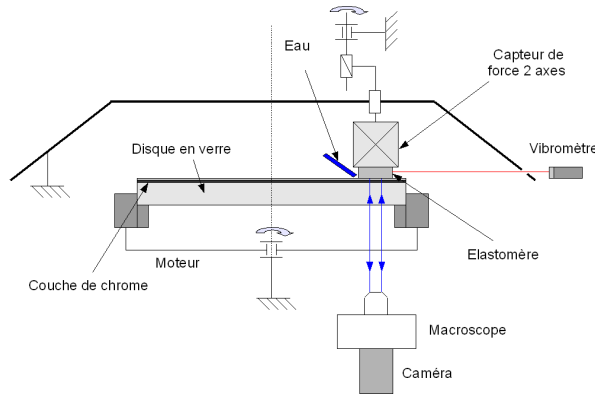


FIGURE 1 – Principe de fonctionnement du tribomètre *LUG*.

Toutes les mesures ont été réalisées à l'air et à température ambiante. Trois lames d'élastomères naturels différents ont été utilisées (aire de contact inférieure à 1 mm²). Elles ont été nettoyées avec de l'isopropanol. Le disque en silice est placé successivement dans des bains ultrasoniques d'heptane, isopropanol et acétone avant chaque expérience. L'échantillon est mis en contact avec une force statique de 0.5 N. Les mesures sont réalisées en condition mouillée (le lubrifiant est de l'eau distillée). La lubrification est garantie en injectant constamment le fluide.

La plage de vitesses relatives balayées entre le disque et l'échantillon s'étend de 10 mm/s à 1 m/s. Quand la vitesse relative atteint la valeur désirée, plusieurs mesures sont réalisées simultanément et moyennées sur 5 secondes. La composante continue de la force tangentielle est enregistrée (donnant accès au coefficient de frottement) pour tracer la courbe frottement/vitesse. Nous enregistrons également l'amplitude de vibration pour caractériser les instabilités de frottement. Les mesures ont été faites pour des vitesses croissantes.

2 Analyse théorique

2.1 Equation de mouvement

Considérons un solide de masse m et de position x fixé au bâti par un ressort de raideur k et un amortisseur d'amortissement c . Ce solide montré en figure 2 glisse sur un tapis roulant dont la vitesse absolue est V .

A l'interface entre le tapis et le solide, une force tangentielle de frottement $T(v)$, qui dépend de la vitesse relative $v = V - \dot{x}$, est exercée sur la base du solide. L'équation de mouvement gouvernant le déplacement de cet oscillateur masse-ressort-amortisseur prend la forme suivante :

$$\begin{cases} m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = T(V - \dot{x}) & \text{pour } x \neq V \\ \dot{x} = V & \text{pour } |kx| \leq T(0) \end{cases} \quad (1)$$

$$(2)$$

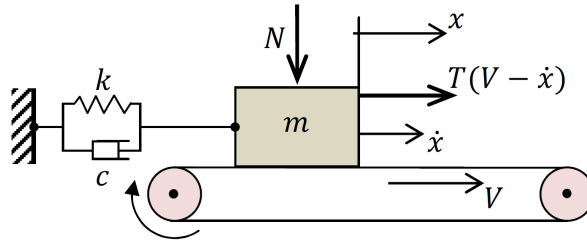


FIGURE 2 – Oscillateur masse-ressort étudié.

La première équation s'applique quand la vitesse relative est non nulle $\dot{x} \neq V$, c'est-à-dire pour la condition de glissement, tandis que la seconde équation s'applique pour la condition de collage qui est possible si la force élastique kx est plus faible que la force de frottement statique maximale admissible $T(0) = T_s$. En considérant le régime de glissement et en connaissant la force normale N , la force de frottement s'exprime :

$$T(v) = S(v)N \operatorname{sgn}(v) \quad (3)$$

avec $S(v)$ le coefficient de frottement dynamique ("S" pour courbe de Stribeck que nous introduirons en section 2.4) et $\operatorname{sgn}(v)$ le signe de la vitesse relative v .

2.2 Equation sans dimension

En considérant la fréquence circulaire naturelle $\omega^2 = k/m$, le coefficient d'amortissement équivalent $\zeta = c/2m\omega$, le temps sans dimension $\tau = \omega t$, le déplacement sans dimension $q = kx/N$ et $\tilde{v} = kv/\omega N = kV/\omega N - q'$ la vitesse relative sans dimension, les équations de mouvement sans dimension pour les deux conditions prennent donc la forme :

$$\begin{cases} q'' + 2\zeta q' + q = S(\tilde{v}) \operatorname{sgn}(\tilde{v}) & \text{pour } q' \neq \tilde{V} \\ q' = \tilde{V} & \text{pour } |q| \leq \mu_S \end{cases} \quad (4)$$

$$(5)$$

où prime représente la dérivée par rapport au temps sans dimension τ , avec μ_S le coefficient de frottement statique pour prendre en compte une éventuelle phase de collage.

2.3 Etat d'équilibre et analyse de stabilité

L'état d'équilibre peut être facilement décrit :

$$q''_E = 0; \quad q'_E = 0; \quad q_E = S(\tilde{V}) \quad (6)$$

Cette réponse statique (un point d'équilibre stable) correspond à une condition de glissement stationnaire, le tapis roulant bouge mais l'oscillateur reste immobile. Cet état d'équilibre peut être stable ou instable. Pour ce type d'oscillateur auto-excité par frottement, l'état d'équilibre peut devenir instable (bifurcation de Hopf) et mener à une solution de cycle limite, c'est-à-dire des vibrations périodiques. Ce problème de stabilité peut être analysé en perturbant l'état d'équilibre car la bifurcation est locale et non globale. Pour ce faire, on considère le problème dans l'espace des phases en introduisant la quantité de mouvement adimensionnée $p = q'$.

A partir de cette nouvelle variable p , et considérant la condition de glissement ($\tilde{v} \neq 0$), les équations différentielles du premier ordre pour le mouvement deviennent :

$$\begin{Bmatrix} q' \\ p' \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & -2\zeta \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} q \\ p \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ S(\tilde{V} - p) \end{Bmatrix} \quad (7)$$

considérant que $\text{sgn}(\tilde{V} - p) > 0$ si $|p| < \tilde{V}$.

Ensuite, autour de l'état d'équilibre $q_E = S(\tilde{V})$, $p_E = 0$, la stabilité locale peut être analysée en s'intéressant au problème des valeurs propres de la matrice jacobienne évaluée en (q_E, p_E) . La stabilité est assurée quand les valeurs propres ont leur partie réelle $\Re(\lambda) < 0$. L'unique solution pour l'état d'équilibre du système étudié pour devenir instable est de traverser l'axe imaginaire $\Re(\lambda) = 0$ par les deux valeurs propres conjuguées suivantes :

$$\lambda_{1,2} = \frac{2\zeta + \frac{\partial S}{\partial v}(\tilde{V}) \pm \sqrt{\left(2\zeta + \frac{\partial S}{\partial v}(\tilde{V})\right)^2 - 4}}{2} \quad (8)$$

menant à une bifurcation de Hopf classique.

Donc si :

$$\frac{\partial S}{\partial v}(\tilde{V}) < -2\zeta \quad (9)$$

l'état d'équilibre est instable et mène à une solution périodique, c'est-à-dire un cycle limite. Connaissant le facteur d'amortissement ζ , il est a priori possible de prédire la plage de vitesses \tilde{V} pour laquelle l'équilibre est instable, menant à une réponse en cycle limite.

2.4 Fonction de Stribeck

Dans cette étude, on suppose que la loi de frottement suit une loi de Stribeck puisqu'expérimentalement on considère les valeurs moyennes des forces normale et tangentielle. Suivant les travaux de Bongaerts et al. [1], on peut utiliser une expression analytique pour ajuster la courbe de Stribeck :

$$\mu_k(v) = \mu_E(v) + g_T(v)(\mu_B(v) - \mu_E(v)) \quad (10)$$

où $\mu_E(v)$ représente la partie correspondant au régime élasto-hydro-dynamique (EHD), $\mu_B(v)$ au régime limite et la fonction $g_T(v)$ fait la transition entre les deux régimes (c'est-à-dire le régime mixte). En effet, pour de faibles vitesses, le coefficient de frottement est élevé et varie peu avec la vitesse (régime limite). Le régime mixte caractérise la plage de vitesse durant laquelle le coefficient de frottement décroît rapidement. Enfin vient le régime EHD avec un coefficient de frottement très faible.

Comme on le constate expérimentalement, le coefficient de frottement pour les régimes limite et EHD peut être décrit par une simple loi de puissance :

$$\mu_B(v) = G.(v\eta)^l \quad (11)$$

$$\mu_E(v) = H.(v\eta)^n \quad (12)$$

Dans ces expressions, η est la viscosité du lubrifiant, G et l sont respectivement le coefficient et l'exposant de la loi de puissance du régime limite, et de même pour H et n pour la loi de puissance du régime EHD. Concernant la fonction de transition $g_T(v)$, on peut l'introduire de la manière suivante :

$$g_T(v) = \frac{1}{1 + (v\eta/U)^r} \quad (13)$$

avec U la valeur de $v\eta$ en-dessous de laquelle nous avons un frottement limite et r l'exposant caractérisant le régime mixte.

Finalement, la fonction de "Stribeck" en adimensionné $S(\tilde{v})$ prend la forme suivante :

$$S(\tilde{v}) = \left[\tilde{H}\tilde{v}^n + \left(\frac{1}{1 + (\tilde{v}/\tilde{U})^r} \right) (\tilde{G}\tilde{v}^l - \tilde{H}\tilde{v}^n) \right] \quad (14)$$

3 Résultats expérimentaux

La figure 3 rassemble l'ensemble de mesures effectuées sur le premier élastomère. La courbe expérimentale de Stribeck donne l'évolution du coefficient de frottement en fonction de la vitesse. Il est d'environ 0.5 dans le régime limite et chute progressivement jusqu'à une valeur de 0.15 pour le régime EHD. La courbe maîtresse recouvre parfaitement les valeurs expérimentales. L'expression analytique nous permet donc de tracer la pente de cette expression, à laquelle on rajoute deux fois le facteur d'amortissement ($\zeta = 0.008$) que l'on fixe pour faire correspondre la plage de vitesses pour laquelle elle est négative et le domaine où l'on observe expérimentalement les instabilités. On peut constater que les amplitudes de vibration se situent bien dans la zone où le critère est négatif, ce qui constitue un résultat important. De plus, la pente est au même niveau à l'entrée et à la sortie du domaine d'instabilité. Ces résultats valident le choix des courbes maîtresses utilisées et l'hypothèse de pente de frottement négative expliquant la présence des instabilités. On peut également constater que le maximum d'amplitude de vibration se situe vers une plus grande vitesse que le minimum de pente.

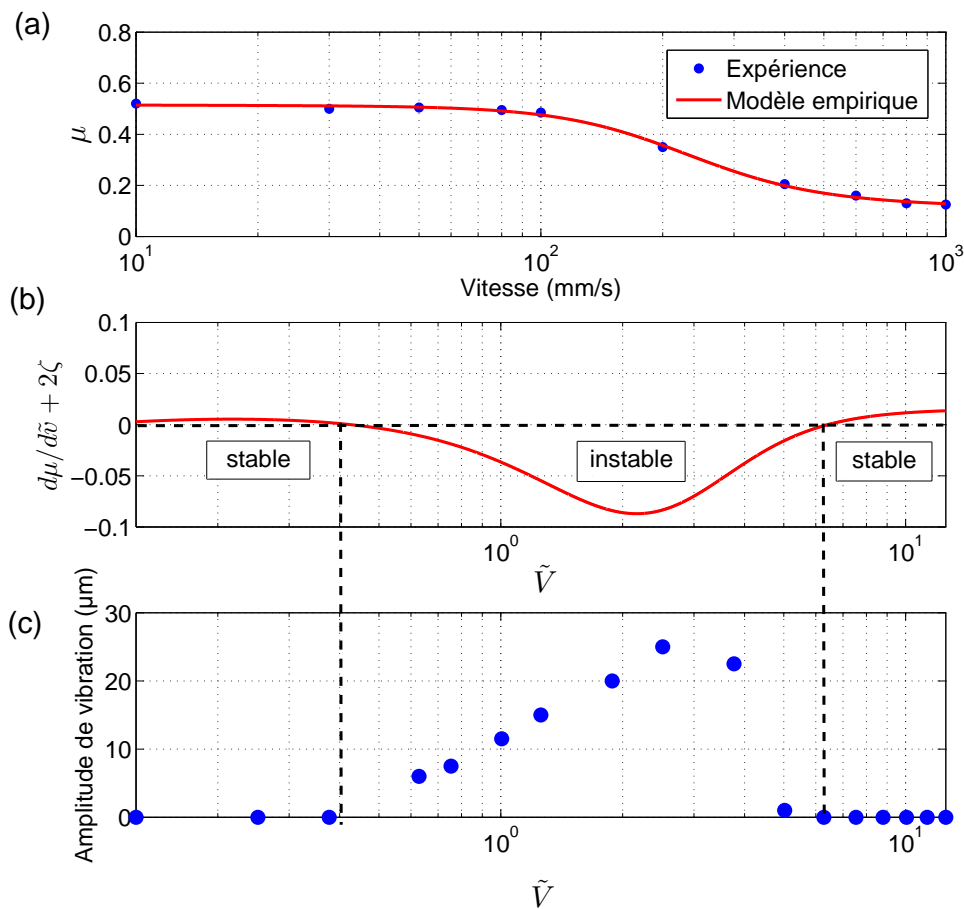


FIGURE 3 – Elastomère 1. (a) Coefficient de frottement expérimental et modèle empirique en fonction de la vitesse (mm/s). (b) Pente du Coefficient de frottement + 2 fois le facteur d'amortissement ($\zeta = 0.008$) en fonction de la vitesse adimensionnée. (c) Amplitude de vibration (μm) mesurée au vibromètre en fonction de la vitesse adimensionnée

Nous observons des résultats similaires avec les 2 autres élastomères (Fig. 4). Les facteurs d'amortissement ont été fixés à 0.006 et 0.011.

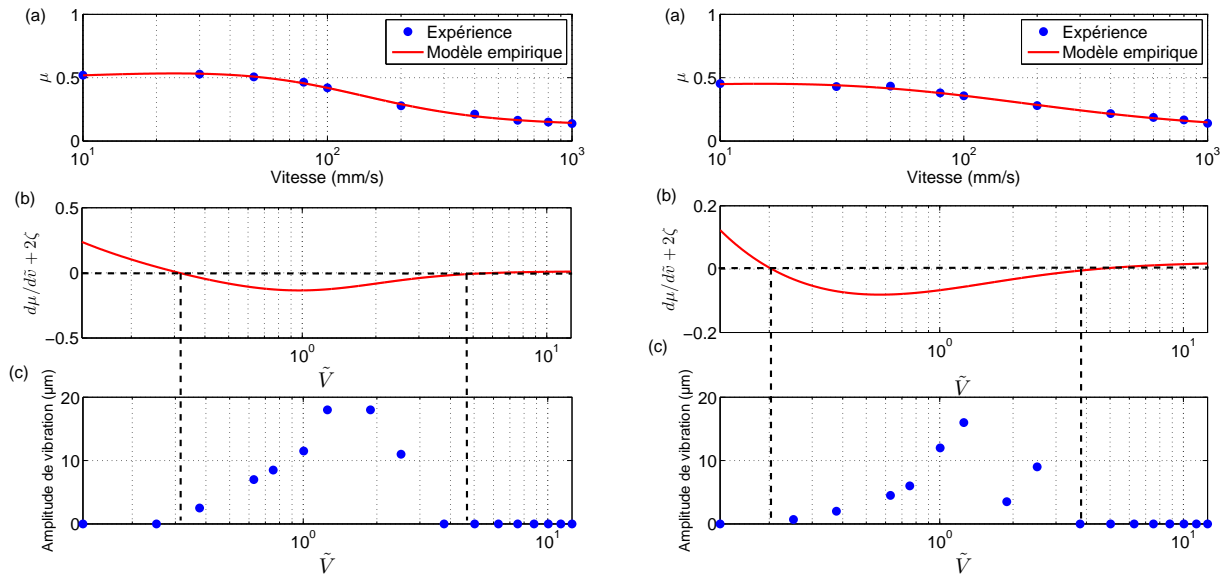


FIGURE 4 – Elastomères 2 (gauche) et 3 (droite). (a) Coefficient de frottement expérimental et modèle empirique en fonction de la vitesse (mm/s). (b) Pente du Coefficient de frottement + 2 fois le facteur d’amortissement ($\zeta_2 = 0.006$ et $\zeta_3 = 0.011$) en fonction de la vitesse adimensionnée. (c) Amplitude de vibration (μm) mesurée au vibromètre en fonction de la vitesse adimensionnée

Conclusions

Nous avons vu dans ce papier que considérer les valeurs moyennes de frottement pour expliquer la présence des instabilités de frottement est une hypothèse valable. En effet, le critère classique utilisant la dérivée du coefficient de frottement en fonction de la vitesse est pertinent pour localiser les 2 bifurcations de Hopf délimitant le domaine d’instabilité. Les mesures expérimentales le montrent pour les différents élastomères testés. Ceci est encourageant pour tenter de maîtriser ces effets en faisant varier des paramètres influençant directement l’allure de la courbe de Stribeck tels que la rugosité. Des travaux sont également en cours pour prédire les niveaux d’amplitude de vibration qui confirment les observations expérimentales d’un maximum d’amplitude de vibration situé pour de plus hautes vitesses que le minimum de pente de frottement.

Références

- [1] Bongaerts, J.H.H., Fourtouni, K., Stokes J.R. 2007 Soft-tribology : Lubrication in a compliant PDMS-PDMS contact. *Tribol. Inter.* **1** 1531-1542
- [2] Bureau, L. 2002 Elasticité et rhéologie d’une interface macroscopique : du piégeage au frottement solide. *Thèse de l’Université Paris VI*
- [3] Deleau, F., Mazuyer, D., Koenen, A. 2009 Sliding friction at elastomer/glass contact : Influence of the wetting conditions and instability analysis. *Tribol. Inter.* **42** 149-159