

CFA/VISHNO 2016

**Comportement du Coefficient de Frottement avec la
Vitesse de Glissement déduit d'Essais Dynamiques
d'Oscillations Libres**

J. Perret-Liaudet^a, F. Majdoub^b, M. Belin^c et J.-M. Martin^c

^aLTDS, UMR CNRS 5513, 36 avenue Guy de Collongue, 36 avenue Ecully Cedex,
France

^bNTN-SNR Roulements, 1 rue des usines, 74010 Annecy, France

^cEcole Centrale de Lyon, LTDS, 36 Avenue Guy de Collongue, 69134 Ecully, France
joel.perret-liaudet@ec-lyon.fr



LE MANS

Le principal objectif de cette étude est de proposer une nouvelle technique d'identification expérimentale permettant de décrire l'évolution générale avec la vitesse de glissement du coefficient de frottement cinétique. Du point de vue théorique, cette identification est basée sur l'analyse des vibrations libres amorties d'un oscillateur à un seul degré de liberté. La masse oscillante frotte au travers du contact tribologique étudié. Le modèle proposé consiste alors à exprimer le coefficient de frottement comme une évolution polynomiale de la vitesse de glissement. La décroissance de l'énergie vibratoire au cours du mouvement permet de discriminer les contributions aux différents ordres du polynôme. Du point de vue expérimental, un tribomètre dynamique développé au laboratoire permet d'accéder aux réponses vitesse et déplacement du système libre oscillant. L'ajustement de l'enveloppe décroissante de la réponse permet à partir de la méthode de la moyenne d'accéder à toutes les caractéristiques du coefficient de frottement. Nous présentons dans cette étude un exemple concret constitué d'un système tribologique acier glycérol acier à 60°C en vue d'illustrer l'efficacité de la démarche proposée.

1 Introduction

Dans une étude précédente [1], un tribomètre dynamique a été défini et mis au point afin de discriminer, pour le coefficient de frottement, la contribution linéaire en vitesse (type amortissement visqueux) de la contribution constante (type Coulomb). Leur identification est basée sur l'analyse des vibrations libres amorties d'un oscillateur à un seul degré de liberté. La masse oscillante frotte au travers du contact tribologique étudié. La procédure expérimentale consiste à mesurer simultanément le déplacement et la vitesse afin d'identifier la loi de décroissance de l'enveloppe de la réponse vibratoire. Par ajustement de cette enveloppe, il est alors possible d'extraire les contributions du coefficient de frottement de type Coulomb ainsi que celles de type visqueuse. Cette démarche s'est avérée très pertinente pour de nombreux cas [1,2]. Toutefois, dans des études plus récentes, nous avons montré qu'un modèle de frottement de ce type (linéaire) n'était plus adapté [3].

Dans ce contexte, le principal objectif de cette étude est de proposer une meilleure description du coefficient de frottement ainsi que de définir une méthode expérimentale d'identification. Plus précisément, le modèle introduit consiste à exprimer le coefficient de frottement cinétique μ comme une évolution polynomiale de la vitesse de glissement. Sur le plan de l'identification, un ajustement de l'enveloppe décroissante des oscillations libres permet à partir de la méthode de la moyenne d'accéder à toutes les caractéristiques du coefficient de frottement. Nous présentons dans cette étude un exemple concret constitué d'un système tribologique acier glycérol acier à 60°C. Les résultats obtenus permettent ainsi d'illustrer l'efficacité de la démarche proposée.

2 Le tribomètre dynamique

Le tribomètre dynamique oscillant utilisé dans cette étude a été conçu et réalisé dans le cadre d'une étude précédente. Le dispositif est décrit dans Rigaud *et al.* [1]. Il permet une mesure indirecte du coefficient de frottement cinématique entre deux surfaces en glissement relatif. Un schéma du montage expérimental est présenté Figure 1. Le système mécanique est de type masse ressort à un seul degré de liberté du fait de la présence d'un bilame. Ainsi, la masse oscille et glisse perpendiculairement à un plan fixe avec lequel elle est en contact. Dans notre étude, le contact est un contact bille/plan lubrifié, dont on maîtrise la charge normale. Les essais consistent à réaliser des mouvements d'oscillation libre en positionnant la masse hors équilibre statique via un électroaimant.

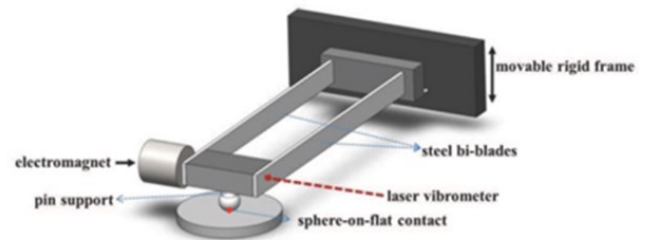


Figure 1: Le tribomètre dynamique oscillant.

Par ailleurs, un vibromètre laser permet de mesurer simultanément les réponses déplacement et vitesse de la masse. A partir de ces deux mesures, il est possible d'accéder à l'enveloppe de la réponse à partir de la définition de l'énergie vibratoire.

L'équation régissant la réponse dynamique du système s'écrit :

$$m\ddot{x} + kx = -\mu(\dot{x})N \quad (1)$$

où x , mesuré avec le vibromètre laser, constitue le déplacement de la masse m , k la raideur du bilame, N la charge normale appliquée au contact et $\mu(\dot{x})$ le coefficient de frottement cinétique, fonction de la vitesse de glissement \dot{x} , et qu'il convient d'identifier.

Pour ce faire, on choisit de modéliser le coefficient de frottement cinétique par une fonction pseudo-polynomiale de la vitesse, à savoir

$$\mu(\dot{x}) = \sum_{n=0}^n p_n \dot{x}^n \cdot \text{sgn}(\dot{x})^{n+1} \quad (2)$$

Dans cette équation, la fonction $\text{sgn}(\dot{x})$ est la fonction signe de la vitesse de glissement \dot{x} introduite afin de préserver la parité de la force de frottement. En effet, cette force est une fonction impaire qui doit respecter dans l'équation (1) :

$$\mu(-\dot{x}) = -\mu(\dot{x}) \quad (3)$$

3 La méthode d'identification

L'identification des caractéristiques de la force de frottement, modélisée par l'équation (2), est basée sur l'analyse de l'enveloppe $A(t)$ de la réponse libre oscillante, sous l'hypothèse d'une dissipation sous critique. A partir des conditions initiales (abandon de la masse sans vitesse initiale), à savoir :

$$x(0) = X_0 = A(0) \text{ et } \dot{x}(0) = 0 \quad (4)$$

et en accord avec la définition de l'enveloppe proposée par Rice [4], $A = \sqrt{x^2 + \dot{x}^2}$, il est possible d'obtenir l'évolution de l'enveloppe à partir de la méthode classique de la moyenne (voir [5], par exemple). Cette technique conduit à l'équation différentielle du premier ordre suivante :

$$\dot{A} = \sum_{n=0}^{n=N} \alpha_n A^n = G(A) \quad (5)$$

Dans cette équation les coefficients α_n dépendent directement des coefficients p_n (voir Eq. (2)). Le détail des calculs et les expressions analytiques des relations obtenues sont précisés dans [6]. La procédure d'identification peut maintenant être décrite selon les étapes suivantes :

- mesure de l'enveloppe expérimentale, $A_{exp}(t)$
- ajustement polynomial de l'enveloppe, $A_{fit}(t)$
- calcul de la dérivée temporelle $\dot{A}_{fit}(t)$
- ajustement polynomial de $\dot{A}_{fit}(t) = G(A_{fit})$
- identification des coefficients p_n

La mise en œuvre de cette technique est relativement simple et nous a permis de traiter un grand nombre de cas d'essais.

3 Résultats expérimentaux

Comme exemple de résultats expérimentaux, nous considérons ici un système tribologique constitué d'un couple bille-plan acier-acier lubrifié avec du glycérol pur à 60°C [7]. La bille en contact possède un diamètre de 6 mm. La charge normale au contact est de 0,05 N ce qui induit une pression de Hertz autour de 240 MPa. La figure 2 nous montre un exemple de trois réponses déplacement superposées sur un même graphe. Comme on peut le constater, il n'y a pas de variabilité entre les essais, ce qui illustre la bonne répétabilité du montage expérimental.

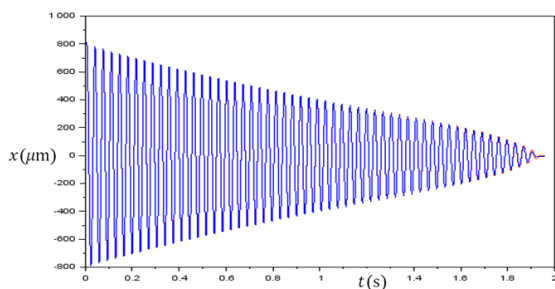


Figure 2: Exemple de trois réponses déplacement obtenues de manière successives, et superposées sur le même graphe.

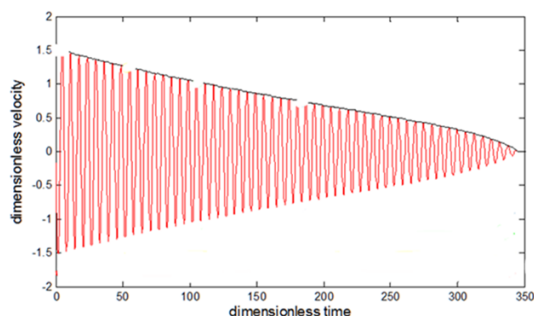


Figure 3: Exemple de réponse en vitesse et enveloppe associée.

La figure 3 présente un exemple de réponse vitesse à partir de laquelle il est possible de déterminer l'enveloppe ou la décroissance d'énergie vibratoire. On notera avec intérêt, figures 2 et 3, les caractères concave et convexe de l'enveloppe fonction de l'amplitude. Ces comportements résultent de la pente locale $\frac{d\mu}{dx}$ du coefficient de frottement cinétique fonction de la vitesse de glissement [6]. À partir de la technique d'identification proposée et en utilisant des ajustements de courbe à des polynômes du 4ème ordre, on obtient la tendance générale du coefficient de frottement en fonction de la vitesse de glissement. La courbe obtenue est présentée figure 4, avec pour abscisse la vitesse sans dimension $V = \frac{\sqrt{km}}{N} |\dot{x}|$.

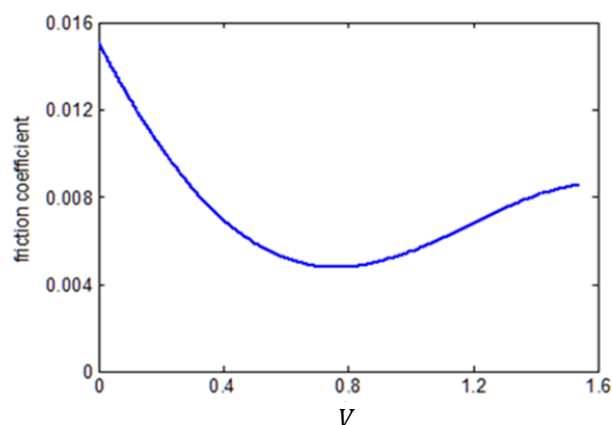


Figure 4: Coefficient de frottement cinétique fonction de la vitesse sans dimension V .

Comme on peut le constater sur cette figure, le résultat montre une caractéristique non standard, qui plus est extraite en un essai rapide et simple. Dans ce cas, cette évolution est à rapprocher d'un comportement style courbe de Stribeck, vraisemblablement induite par la variation d'épaisseur du film lubrifiant avec l'amplitude des oscillations. On peut également constater que la mesure n'est pas mise en défaut par des valeurs faibles du coefficient de frottement, typiquement de l'ordre de 0,005.

4 Conclusion

Pour conclure, l'exemple de résultats expérimentaux présenté dans ce travail démontre la capacité du tribomètre dynamique oscillant à fournir, moyennant un traitement des données adaptées, les caractéristiques générales de l'évolution du coefficient de frottement cinétique avec la vitesse de glissement. La technique proposée est d'autant plus performante que le nombre d'oscillations est élevé, et donc favorable à la détection de coefficient de frottement faible, voir ultra faible. Par ailleurs elle permet une identification très rapide par la nature même de l'essai proposé de vibration libre.

Remerciements

Cette étude a reçu en partie le soutien financier de l'Institut Carnot I@L Ingénierie@Lyon (France). Les auteurs remercient également le ministère de l'éducation nationale, de l'enseignement supérieur et de la recherche pour le support de thèse.

Références

- [1] E. Rigaud et al., An original dynamic tribotest to discriminate friction and viscous damping, *Tribology International* **43**, 320-329 (2010).
- [2] F. Majdoub et al., Exploring low friction of lubricated DLC coatings in no-wear conditions with a new relaxation tribometer, *Tribology International* **65**, 278-285 (2013).
- [3] F. Majdoub, Innovative measurement of ultra-low friction: analysis of dynamic free responses characterized by damped oscillatory motion. *Thèse de doctorat, École Centrale de Lyon*, **56**, 178 pages (2013).
- [4] S.O. Rice, Mathematical analysis of random noise. In *Selected papers on Noise and Stochastic Processes* **208**, 475-489 (1997).
- [5] A.H. Nayfeh, D.T. Mook, *Nonlinear oscillations*, Wiley Interscience, 179 p. (1979).
- [6] F. Majdoub et al., Decaying law for the free oscillating response with a pseudo-polynomial friction law: Analysis of a superlow lubricated friction test, *Journal of Sound and Vibration* **348**, 263-281 (2015).
- [7] F. Majdoub et al., Effect of temperature on lubricated steel/steel systems with or without saturated fatty acids additives with original tribometer. *Tribology Letters* **54**, 171-181 (2014).