
Conception d'un dynamomètre destiné à mesurer le coefficient de frottement sec dans des conditions dynamiques

L. Faure(*), **S. Philippon(**)**, **A. Lodygowski(***)**, **G. Voyiadjis(***)**,
A. Rusinek()**, **P. Chevrier(**)** and **E. Dossou(*)**

(*) *Université de Metz (U.P.V.M.), Laboratoire de Physique et Mécanique des Matériaux (L.P.M.M.), Île du Saulcy, 57045 Metz, France*

(**) *Ecole Nationale d'Ingénieurs de Metz (E.N.I.M.), Laboratoire de mécanique, Biomécanique, Polymères et Structures (L.A.B.P.S.), Île du Saulcy, 57045 Metz, France*

(***) *Louisiana State University (L.S.U.), Department of Civil and Environmental Engineering, 3224 Patrick F. Taylor Hall, Baton Rouge, LA 70803, USA*

laurent.faure@univ-metz.fr ; philippon@enim.fr

Sections de rattachement : 60
Secteur : Secondaire

RÉSUMÉ. Nous présentons un dispositif expérimental au moyen duquel le coefficient de frottement entre deux matériaux peut être déterminé. Deux échantillons identiques A, de forme parallélépipédique et d'un matériau M_A sont symétriquement fixés à l'intérieur d'un anneau dynamométrique. Une éprouvette B, d'un matériau M_B , de forme parallélépipédique également, est placée entre ces deux échantillons A. Une force de compression est exercée par l'anneau dynamométrique sur l'éprouvette B en jouant sur sa déformation élastique. L'anneau dynamométrique est fixé sur un capteur d'effort équipé de jauges de déformation. Ce capteur permet de mesurer localement la déformation provoquée par le chargement de l'éprouvette B au cours des essais. Les vitesses de glissement étudiées se situent entre de 0,3 et 3 m/s. L'influence de paramètres tels que la pression normale apparente et la variation de la vitesse de glissement sur les valeurs du coefficient de frottement est examinée.

MOTS-CLÉS : frottement, dispositif expérimental, dynamique.

1. Introduction

De nombreux dispositifs ont été conçus afin de mesurer le coefficient de frottement dans des conditions dynamiques. Leur fonctionnement diffère selon les gammes de

pression normale p et de vitesse de glissement V considérées, mais aussi en fonction de la durée du processus de frottement. Divers dispositifs permettant l'étude du frottement dans des conditions de frottement variables sont montrés dans la Figure 1. Le plus généralement employé est le dispositif 'Pin-on-Disk', qui permet la mesure du coefficient de frottement au contact d'un pion et d'un disque en rotation [5]. Généralement, les gammes de pression normale p et de vitesse de glissement V sont basses; $p < 30$ MPa et $V < 60$ m/s respectivement. Le but principal avec ce type de dispositif est d'examiner le rapport entre le taux d'usure et le frottement à l'interface. La longueur de glissement est environ dix mètres, mais peut excéder plusieurs centaines de mètres pour des applications spécifiques.

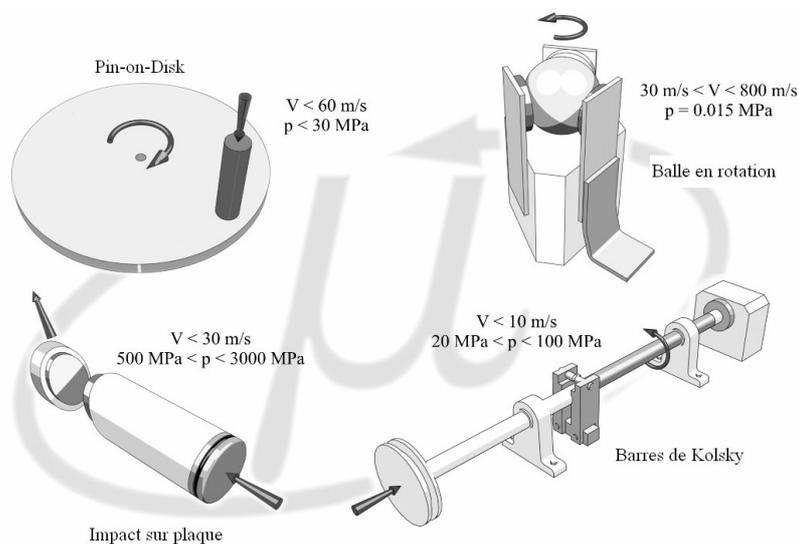


Figure 1. Vue d'ensemble des dispositifs permettant de mesurer le coefficient de frottement dans des conditions dynamiques

Pour des pressions normales p plus élevées, des applications avec des barres de Kolsky modifiées [8] et des impacts sur plaque [7] ont été employées avec succès. La durée de ces expériences est relativement courte, de quelques millisecondes à quelques microsecondes respectivement. Finalement, les vitesses les plus grandes sont atteintes au moyen d'une expérience utilisant une balle en rotation entre trois échantillons [1]. Cependant la pression normale p est très faible et n'excède pas 0,015 MPa.

Le but de ce travail est de présenter un dispositif expérimental (tribomètre) capable d'évaluer quantitativement le coefficient de frottement sec entre divers matériaux. Cet appareil a préalablement été présenté par Philippon et al. [6]. L'aspect intéressant de ce tribomètre est qu'il peut être employé pour une large gamme de vitesses de glissement (de 0,01 jusqu'à 100 m/s) et pour des pressions normales p variant entre 5 MPa et

200 MPa. Ce dispositif peut être adapté sur une machine de traction conventionnelle ou hydraulique pour les basses vitesses de glissement (0,01 à 4 m/s), mais aussi sur un canon à gaz pour les plus hautes vitesses ($V > 13$ m/s).

2. Description du dispositif expérimental

Le nouveau dispositif, présenté à la Figure 2, est conçu pour étudier le frottement sec entre deux matériaux M_A et M_B . Il est principalement composé de deux parties distinctes. Un anneau dynamométrique permet d'appliquer une force normale connue N sur la surface de contact entre les deux matériaux M_A et M_B . Cet anneau est rigidement fixé sur un capteur de charge. Ce dernier permet de mesurer l'effort tangentiel T généré au cours du processus de friction.

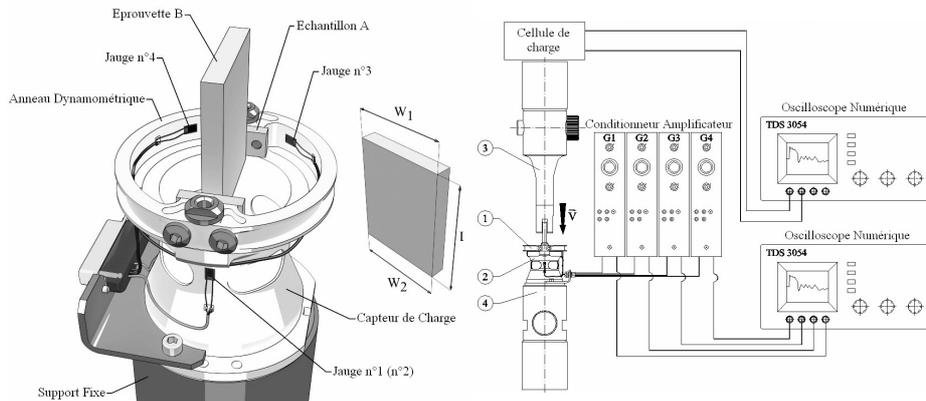


Figure 2. Dispositif expérimental et système d'acquisition des données

L'éprouvette B, d'un matériau M_B est disposée entre deux échantillons A, d'un matériau M_A , symétriquement fixés à l'intérieur de l'anneau dynamométrique. Dans cette nouvelle configuration, la forme d'anneau a été modifiée afin d'augmenter sa rigidité et par conséquent la force normale N appliquée sur les éprouvettes. De plus, deux jauges d'extensométrie (n°3 et n°4, Figure 2) ont été collées sur la partie interne de cet anneau afin de contrôler en continu, la valeur de la force normale apparente N pendant le frottement.

La valeur de la force normale apparente N exercée par l'anneau peut être calibrée en ajustant précisément la largeur W de l'éprouvette B. Le capteur de charge est également équipé de deux jauges d'extensométrie (n°1 et n°2, Figure 2) collées sur les parois minces du capteur. Des simulations numériques ont permis d'optimiser la géométrie de cette zone afin de définir précisément la mesure de la déformation pour une gamme de charge variant de 100 à 8000 newtons.

Chacune des jauges d'extensométrie placées sur le tribomètre est employée dans une configuration en quart de pont associée à un système conditionneur amplificateur de signal. Les variations de tension de ces quatre jauges sont enregistrées par un jeu de deux oscilloscopes numériques, Figure 2. Les signaux donnés par les jauges du capteur de charge sont proportionnels à l'effort de frottement T . De plus, la cellule de charge de la machine d'essai hydraulique permet d'obtenir la valeur de la force axiale totale F produite par le processus de frottement. Il faut noter que la force axiale F mesurée par la cellule de charge est égale à $2T$, en raison de la présence de deux surfaces de contact sur le capteur. Le déplacement du vérin hydraulique est aussi enregistré pendant l'essai de frottement afin de contrôler l'évolution de la vitesse de glissement V .

3. RESULTATS

3.1. Calibration des pièces principales

Un paramètre prépondérant pour la détermination du coefficient de frottement sec est la pression apparente normale p appliquée sur la surface de glissement des éprouvettes. Afin de choisir la dimension (la largeur W) de l'éprouvette B pour une pression proche de 8 MPa, un calibrage de l'anneau de dynamométrie a été effectué. Ce calibrage a été exécuté sur une machine de traction-compression dans des conditions quasi-statiques. Le déplacement entre les deux faces parallèles de l'anneau est mesuré au moyen d'un extensomètre. On montre la configuration de l'installation sur la Figure 3. De plus, pour s'assurer du comportement élastique de l'anneau, des simulations numériques ont été exécutées avec le logiciel ABAQUS ®. Les résultats obtenus ont permis de déterminer l'emplacement précis des jauges de déformation n°3 et n°4.

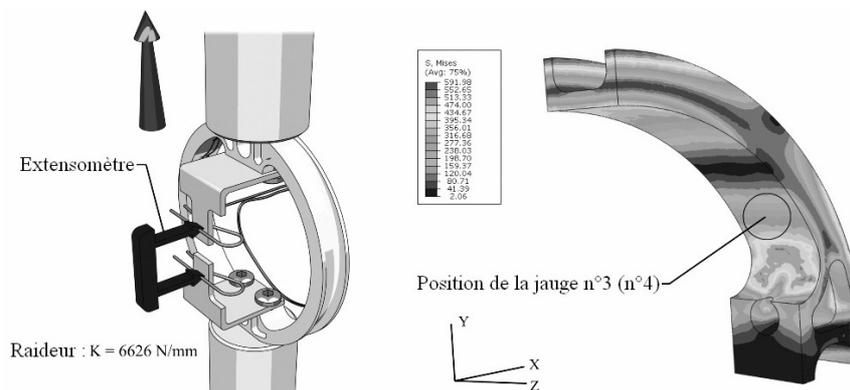


Figure 3. Calibration de l'anneau dynamométrique

Afin de relier la réponse des jauges de déformation (n°1 et n°2) du capteur de charge avec la force de glissement F , un calibrage statique de ce capteur de charge a été réalisé sur une machine de traction-compression. Au cours de ce calibrage, l'anneau est mis en place sur le capteur de charge ainsi que les échantillons A, afin que les conditions de calibration soient aussi proches que possible de la configuration expérimentale, voir Figure 4. Le capteur de charge a été conçu pour travailler dans le domaine élastique pour une gamme de charge variant de 100 à 8000 newtons. De la même manière que l'anneau dynamométrique, les résultats expérimentaux sont en bon accord avec les simulations numériques.

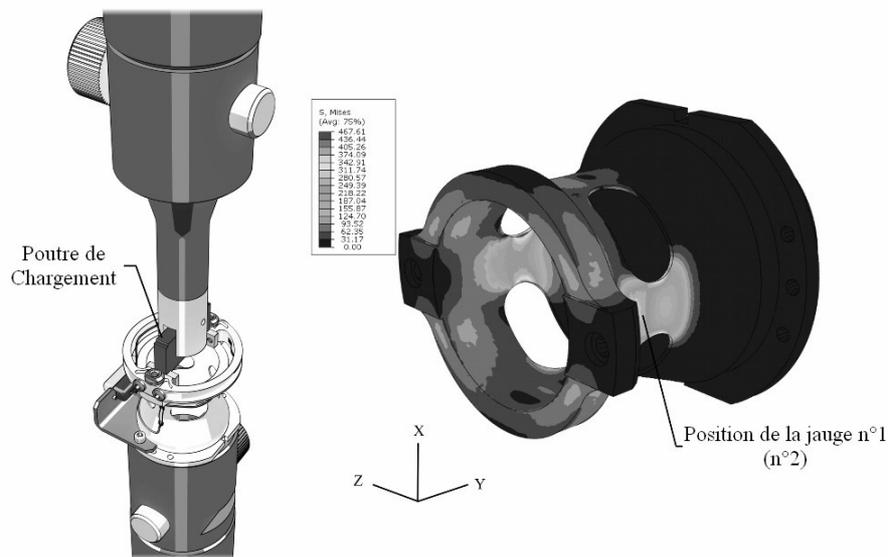


Figure 4. Calibration du capteur de charge

3.2. Résultats expérimentaux

Tous les essais ont été réalisés sur une machine hydraulique à grande vitesse. Cette machine peut délivrer une force maximale de 100 kN avec un déplacement maximal du vérin de 150 mm, pour une vitesse maximale de 5 m/s. Dans cette étude, les essais ont été effectués pour une gamme de vitesses de glissement V de 0,3 à 3 m/s et pour un déplacement de 100 mm. Les échantillons A et les éprouvettes B sont en acier 1080 et VascoMax 300 (Etats-Unis) respectivement [2]. Avant essai, l'éprouvette B est serrée par l'anneau entre les échantillons A. Il faut noter que l'usinage des éprouvettes B peut générer un parallélépipède non parfait. En effet, une variation de la largeur W le long de la direction de glissement est parfois observée. La valeur de W , qui agit sur la pression apparente normale p , est obtenue par la différence entre W_1 et W_2 , voir la Figure 2.

La figure 5 représente un enregistrement de la cellule de charge de la machine hydraulique correspondant à un essai à 3 m/s. Nous pouvons observer des oscillations de grande amplitude produites par le comportement dynamique de cette cellule. La valeur de la fréquence principale d'oscillation est obtenue par la Transformation de Fourier Rapide (FFT) du signal. Un filtre est alors appliqué au signal brut, nous permettant de déterminer plus précisément la valeur moyenne la force de frottement F .

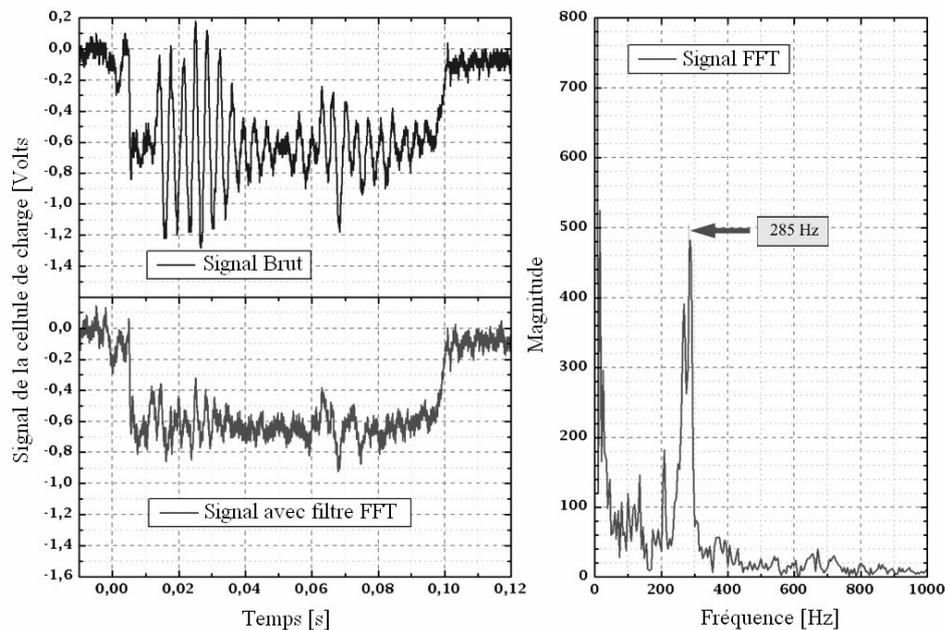


Figure 5. Enregistrements bruts et filtrés de la cellule de charge machine

Deux oscillogrammes typiques obtenus à partir des jauges de déformation du capteur de charge (n°1) et de l'anneau de dynamométrique (n°3) sont présentés à la Figure 6. Ces enregistrements correspondent à une vitesse de glissement de $V = 2.16$ m/s et à une pression apparente normale de 8.8 MPa. Notons que seulement une partie du processus de glissement s'effectue à vitesse constante V , en raison de la technologie hydraulique de la machine d'essai. La force de frottement T est enregistrée par la jauge n°1 (ainsi que par la jauge n°2). L'enregistrement montre un pic au début du processus de frottement. Celui-ci est une conséquence du contact entre le vérin en déplacement et l'éprouvette B. Après ce premier pic, un niveau d'effort quasi constant est observé. Concernant le signal de la jauge n°3 (ou n°4) de l'anneau dynamométrique, le signal enregistré montre la force apparente normale. Dans cet essai, une légère diminution de cette force est détectée. Cette variation est un effet direct de l'imperfection géométrique W (dans ce cas, $W = 0,04$ mm correspondant à environ 250 newtons).

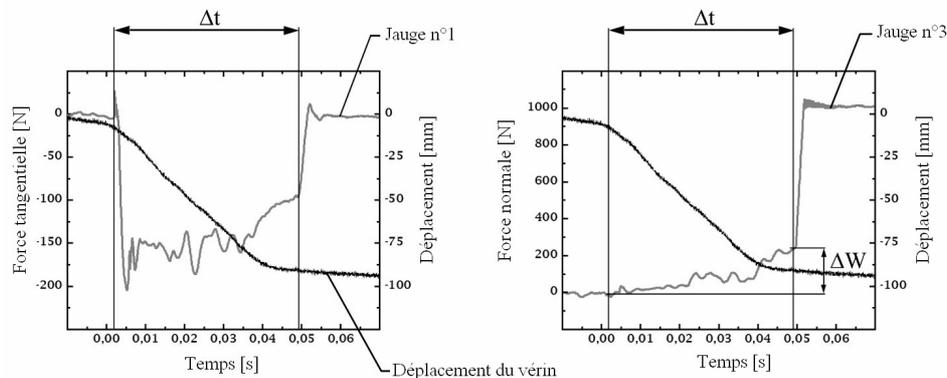


Figure 6. Enregistrements des signaux des jauges du tribomètre (n°1 & n°3)

Le tableau 1 récapitule tous les résultats expérimentaux en termes de conditions de glissement (vitesse et pression normale apparente), de dimensions de l'éprouvette B, de forces totales de frottement et de coefficients de frottement secs. Nous pouvons observer une légère différence entre la force totale de glissement mesurée par la cellule de la machine et celle du capteur de charge. La faible différence de niveau de ces forces (environ 300 newtons) par rapport à la capacité maximale de charge de la cellule (100 kN) pourrait expliquer ce point. En outre, les valeurs moyennes des coefficients de frottement pour ce couple de matériaux (matériaux métalliques) sont en bon accord avec ceux observés dans la littérature [4, 3].

Test	Vitesse de Glissement : V [m/s]	Dimensions Eprouvette B		Effort : Cellule de Force [N]	Effort Total : Capteur de Force [N]	Force Normale [N]	Pression Apparente Normale : p [MPa]	Coefficient de Frottement Sec : μ	
		w ₁ - [mm]	w ₂ - [mm]					Machine d'essai	Capteur
3	1,204	48,200	48,196	320	355	1025	8,8	0,31	0,35
4	2,163	48,192	48,188	270	300	1020	8,8	0,26	0,29
5	2,100	48,190	48,171	270	320	950	8,2	0,28	0,34
6	2,937	48,188	48,181	220	260	830	7,1	0,27	0,31
8	2,870	48,185	48,164	270	295	850	7,3	0,32	0,35
9	0,324	48,185	48,164	310	355	910	7,8	0,34	0,39

Tableau 1. Paramètres expérimentaux et résultats des essais

4. CONCLUSION

Les essais de frottement ont été effectués pour une gamme de vitesses variant de 0,3 à 3 m/s sur des aciers 1080 et VascoMax 300, avec une pression normale apparente p proche de 8 MPa. Un tribomètre modifié, basé sur le dispositif original développé par Philippon et al. [6] est employé, permettant une évaluation précise du coefficient de frottement à sec. Un nouvel anneau dynamométrique avec une rigidité accrue est équipé

de jauges de déformation permettant un contrôle continu de la pression apparente normale p au cours des essais. Sa haute sensibilité permet de mesurer la variation de force apparente normale due par exemple, à de légers défauts géométriques des éprouvettes. Les forces de frottement mesurées par le tribomètre et la force de frottement totale enregistrée par la cellule de charge de la machine d'essai sont en bon accord. Les résultats expérimentaux concernant le coefficient de frottement sec obtenu avec ces deux voies distinctes sont cohérentes avec les valeurs observées dans la littérature pour des matériaux métalliques [4, 3]. Le développement de ce projet consiste à adapter ce dispositif sur un canon à gaz afin d'examiner le coefficient de frottement sec pour des vitesses de glissement supérieures à 10 m/s. Le comportement dynamique du dispositif sera le paramètre principal de cette évolution et devra être considéré, afin d'améliorer les mesures des forces de frottement. D'un autre côté, des études incluant des simulations numériques liées aux problèmes de frottement et incorporant ce dispositif expérimental sont actuellement en cours de développement [9].

Références

- [1] Bowden F.P., Freitag E.H. and F.R.S., The friction of solids at very high speeds I. metal on metal; II. Metal on diamond, Proceedings of the royal society of London, series A : Mathematical and physical sciences (1958) 248, PP. 350-367.
- [2] Cinnamon J.D., Palazotto A.N., Kennan Z., Material characterization and development of a constitutive relationship for hypervelocity impact of 1080 steel and VascoMax 300. International Journal of Impact Engineering (2006) 33, pp. 180-189.
- [3] Lim S.C., Ashby M.F., Brunton J.H., The effects of sliding conditions on the dry friction of metals, metallurgica (1989) 37, n°3, pp. 767-772.
- [4] Lim S.C., Ashby M.F., Wear-Mechanism maps, Acta metallurgica (1987) 35, n°1, pp. 1-24.
- [5] Philippon S., Sutter G., Dedourge J., Molinari A., Etude expérimentale du frottement. International Journal of Mechanical Production Systems Engineering, High Speed Machining (2003). pp. 57-60.
- [6] Philippon S., Sutter G., Molinari A., An experimental study of friction at high sliding velocities. Wear (2004) 257, pp. 777-784.
- [7] Prakash V., A pressure-shear plate impact experiment for investigating transient friction. Experimental Mechanics (1995) 35, n°4, pp. 329-336.
- [8] Rajagopalan S., Prakash V., A modified torsional Kolsky bar for investigating dynamic friction. Experimental Mechanics (1999) 39, n°4, pp. 295-303.
- [9] Voyiadjis G. Z., Deliktas B., Lodygowski A., Palazotto A. N., Philippon S., Faure L., High rate and frictional effects in wear of metals using strain gradient plasticity, Workshop in Memory of J.R. Klepaczko, Metz, 13-15 May 2009.