

Etude théorique et expérimentale du coefficient de frottement dans un contact dynamique sec bronze-graphite, cuivre-graphite et graphite-graphite

Youcef MOUADJI¹, Ali BOUCHOUCHA², Mohand Amokrane BRADAI³

¹ Ecole Nationale Polytechnique de Constantine, 25000 Constantine 3. ymouadji@yahoo.fr.

² Laboratoire de Mécanique, Campus Chaabet-Ersas, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université Constantine1.

³ Laboratoire de Mécanique, Matériaux et énergétique (L2ME). Faculté de Technologie, Université de Bejaia, 06000 Bejaia.

Résumé

Le frottement sec désigne un ensemble de phénomènes et de mécanismes qui intervient en absence de lubrifiant au niveau de l'interface de deux corps en contact. Le contact unilatéral avec frottement est un des problèmes les plus compliqués de la mécanique des solides, car de nombreuses difficultés découlent de la nature souvent très complexe des surfaces réelles mais aussi du régime sévère de déformation qui se produit même, à de faibles niveaux de chargement. En outre, des phénomènes thermiques et physico-chimiques tels que des fusions ou des oxydations s'activent dès la mise en contact des solides et dans certains cas divers contaminants surfaciques peuvent être présents [1].

Ce travail a porté sur l'étude de l'influence de l'effort normal sur le comportement au frottement d'un pion frottant à sec sur un disque des couples cuivre-graphite, bronze-graphite et graphite-graphite. Les essais ont été réalisés sur un tribomètre de type pion-disque. Cinq efforts normaux de contact ont été retenus pour cette étude. est confrontée à la théorie d'Archard.

Les résultats ont montré que le coefficient de frottement croît avec l'augmentation de l'effort normal de contact. Les résultats obtenus corroborent assez bien ceux de la littérature.

Mots Clés : Coefficient de frottement, cuivre, bronze, graphite.

1. Introduction

Le coefficient de frottement est défini implicitement par $\mu = \text{force de frottement}/\text{force normale}$. Plusieurs recherches se sont intéressées par la suite à cette théorie et il a été observé que pour les matériaux ductiles, les aspérités se déforment plastiquement, produisant une croissance de l'aire réelle de contact limitée par les contraintes de cisaillement.

Les premières études sur le frottement sont dues à Léonard de Vinci et datent du début du 16^e siècle, d'Amontons (1699) et Coulomb (1781), le frottement était considéré comme un phénomène de nature exclusivement surfacique. Le modèle des jonctions adhésives, établi en 1950 par Bowden et Tabor [2], représente incontestablement une avancée majeure dans la compréhension des mécanismes du frottement, car il permet d'associer le frottement aux propriétés mécaniques et géométriques des surfaces en contact. C'est d'ailleurs sur la base de cette hypothèse des jonctions adhésives, que Greenwood-Williamson [3] a proposé en 1966 un

modèle à aspérités qui, suite aux travaux d'Archard [4], fournit une justification de la proportionnalité entre la force de frottement et la charge normale.

L'interface est d'ailleurs parfois considérée comme un troisième matériau avec des propriétés mécaniques spécifiques. A cette complexité, des mécanismes en jeu s'ajoutent à la difficulté des mesures expérimentales. Ceci explique que, malgré les nombreuses études sur le sujet, le lien entre les mécanismes microscopiques et le comportement macroscopique ne soit pas encore clairement élucidé.

Cependant, l'expérience permet d'établir certains faits concernant ce phénomène ; ils ont conduit à l'élaboration de lois simples connues sous le nom de lois de Coulomb [5]:

- la force de frottement est indépendante de l'aire apparente de contact,
- la force de frottement est proportionnelle à la force qui presse les deux surfaces l'une contre l'autre,
- la force de frottement cinétique est indépendante de la vitesse relative des deux surfaces.

1.1. Modèles de frottement

Un modèle de frottement est un modèle mécanique reliant les paramètres qui conditionnent le mécanisme physique du frottement. Les premiers travaux [2, 3-11] mettaient déjà en évidence une relation entre la composante tangentielle de l'action mécanique et sa composante normale. Ces études mettaient aussi en évidence le fait que lors du glissement, la force de frottement est opposée à la vitesse de glissement. Les recherches en tribologie [12-14] ont ensuite montré la dépendance des lois de frottement vis-à-vis des paramètres tels que la température, les matériaux, la vitesse de glissement et la rugosité des surfaces.

2. Modélisation du coefficient de frottement

La construction du modèle théorique passe tout d'abord par l'analyse des résultats recherchés. Le modèle théorique doit répondre à certains critères de validation avant que nous puissions utiliser ses résultats dans le modèle de frottement. Il faudra alors vérifier la pertinence du modèle vis-à-vis des résultats expérimentaux pour construire une simulation proche de la réalité.

Le modèle proposé par Bowden et Tabor est le premier qui prend en compte l'importance de la plasticité des surfaces en contact, en relation avec des phénomènes d'adhésion (soudages) localisés au niveau des sommets des irrégularités surfaciques.

Dans notre cas, nous avons calculé le coefficient de frottement par l'équation suivante [2] :

$$\mu_{th} = \frac{1,5 \tau_{max} A_r}{P} \quad (1)$$

Avec τ_{max} est la contrainte maximale de cisaillement.

$$A_r = \pi a^2 \quad (2)$$

Avec a est le rayon de contact donné par :

$$a = \left(\frac{3PR}{4E^*} \right)^{1/3} \quad (3)$$

Avec E^* est le module d'Young équivalent défini par l'expression :

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad (4)$$

2.1. Calcul de la contrainte maximale de cisaillement

Très souvent un déplacement tangentiel dynamique est associé à la charge appliquée. Dans certains cas le massif peut rouler. Si aucun mouvement de rotation n'est possible, il frotte. Au déplacement imposé est associé un effort tangentiel que nous mesurons. Considérons à présent une charge normale P appliquée dans la direction z , et une force tangentielle F appliquée dans la direction du déplacement x sur une sphère élastique de rayon R . Cette sphère se trouve au point O sur un plan semi-infini (Fig. 1).

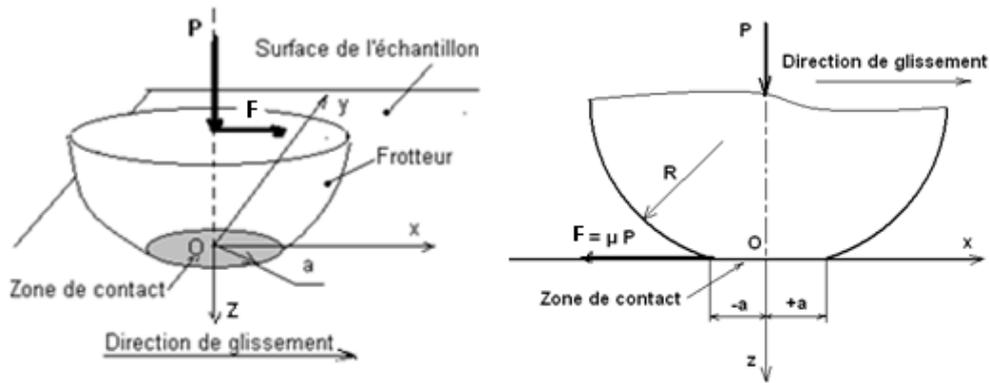


Figure 1. Schéma général du problème.

Nous supposons que les distributions hertziennes de chargement ne sont pas modifiées par la sollicitation tangentielle. Ceci est vérifié lorsque les deux massifs ont des propriétés identiques.

On utilise la formulation donnée par Mc Ewen [3]. Pour obtenir les équations des contraintes normales en chaque point du matériau :

$$\sigma_{xx} = \frac{-2P}{\pi a^2} \left[m - 2z + 2\mu(x - n) + m \frac{z^2 - m^2}{m^2 + n^2} + \mu n \frac{x^2 - n^2}{m^2 + n^2} \right] \quad (5)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{-2P}{\pi a^2} [m - z + \mu(x - n)] \quad (6)$$

$$\sigma_{zz} = \frac{-2P}{\pi a^2} \left[m - m \frac{z^2 - n^2}{m^2 + n^2} + \mu n \frac{z^2 - m^2}{m^2 + n^2} \right] \quad (7)$$

$$\tau_{xz} = \frac{-2P}{\pi a^2} \left[2\mu(m - 2z) + n \frac{z^2 - m^2}{m^2 + n^2} + \mu m \frac{z^2 - n^2}{m^2 + n^2} \right] \quad (8)$$

où σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} sont les contraintes normales dans les directions normales x, y, z et τ_{xz} la contrainte tangentielle.

Avec :

$$m = \pm \sqrt{\frac{1}{2} \left\{ (a^2 - x^2 + z^2) + \sqrt{(a^2 - x^2 + z^2)^2 + 4(xz)^2} \right\}} \quad (9)$$

$$n = \pm \sqrt{\frac{1}{2} \left\{ -(a^2 - x^2 + z^2) + \sqrt{(a^2 - x^2 + z^2)^2 + 4(xz)^2} \right\}} \quad (10)$$

Un des paramètres les plus significatifs et pourtant généralement le moins considéré concerne la topographie du contact. En effet, les hypothèses de calcul posent l'hypothèse de surfaces parfaites sans discontinuités.

On utilisant les équations précédentes (3-10). Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 1.

Tableau 1. Les valeurs de la contrainte maximale de cisaillement et de la surface réelle de contact en fonction de la charge appliquée.

P [N]	Graphite-graphite		Cuivre-graphite		Bronze-graphite	
	τ_{\max} [MPa]	A_r [mm ²]	τ_{\max} [MPa]	A_r [mm ²]	τ_{\max} [MPa]	A_r [mm ²]
5	30,23	0,029	35,42	0,021	35,49	0,021
10	38,69	0,046	35,02	0,034	34,67	0,034
15	46,01	0,06	46,63	0,044	46,02	0,044
20	55,1	0,073	54,58	0,053	49,54	0,053
30	66,05	0,095	78,49	0,07	59,58	0,07

5. Résultats et discussions

Les résultats obtenus montrent que le tribomètre permet de reproduire correctement le comportement observé, et en particulier :

- l'application d'une charge normale P à une influence significative sur le coefficient de frottement des pions en cuivre et, à un degré moindre de ceux en bronze. En revanche, leur effet demeure faible pour les pions en graphite ;

- le matériau frottant contre le disque en graphite a un effet important sur le comportement en frottement, tant que les couples qui donnent les meilleurs résultats tribologiques sont ceux des contacts bronze-graphite et ce, quelque soient les valeurs des charges.

Le couple graphite-graphite donne le frottement le plus élevé, suivi de celui du couple cuivre-graphite. Alors que le frottement le moins important est donné par le couple bronze-graphite. Tout en sachant que la différence entre les valeurs des coefficients de frottement des différents couples est faible.

Les trois figures 2,3 et 4 montrent aussi la comparaison des résultats théoriques et expérimentaux. Nous notons que l'écart entre les deux courbes expérimentale et théorique diminue avec l'augmentation de la charge en particulier à partir de 10 N où l'erreur relative se situe entre 3 % et 16%. Nous remarquons aussi, que la courbe expérimentale est en dessus de celle théorique et suit la même allure.

De la figure 2, pour une charge comprise entre 10 N et 20 N, l'erreur relative se situe entre 7% et 16%. Nous remarquons que les deux courbes se concourent à la valeur de $P = 12$ N.

Dans le cas du contact cuivre-graphite (Fig. 3), pour une charge supérieure à 10 N, l'erreur relative se situe entre 3% et 15% et les deux courbes se croisent à la valeur de $P = 16$ N.

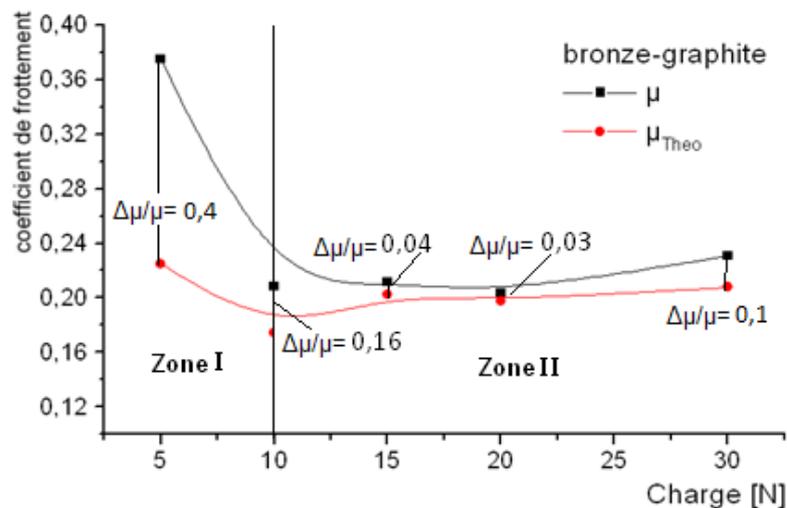


Figure 2. Confrontation des modèles théorique et expérimental du couple bronze-graphite en fonction de la charge, pour $V = 1$ m/s.

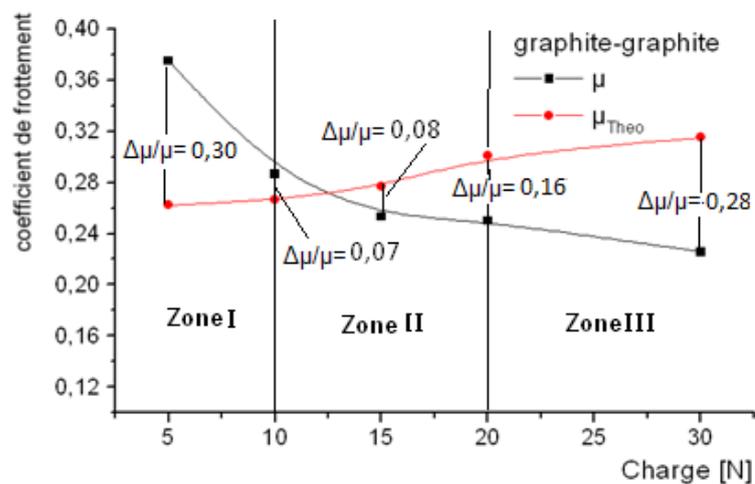


Figure 3. Confrontation des modèles théorique et expérimental du couple graphite-graphite en fonction de la charge pour $V = 1$ m/s.

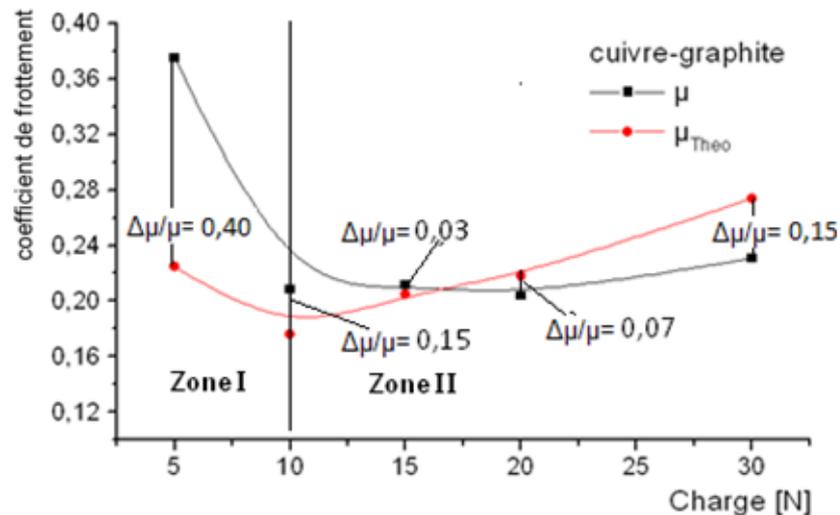


Figure 4. Confrontation des modèles théorique et expérimental du couple cuivre-graphite en fonction de la charge pour $V = 1 \text{ m/s}$.

4. Conclusion

La confrontation des résultats expérimentaux et théoriques, du modèle de détermination du coefficient de frottement, montre que le modèle est optimiste pour les charges supérieures à 10 N et l'incertitude relative varie selon le couple de 3 à 28%. Il semble bien que l'influence de la vitesse n'est pas prise en compte ; vu que le coefficient de frottement n'enregistre pas de grandes variations.

References bibliographiques

- [1] J.R. Barber, Bounds on the electrical resistance between contacting elastic rough bodies, Proc. R. Soc. Lond. A pp.459, 53-66. 2003.
- [2] E. P. Bowden and D. Tabor, The friction and lubrication of solids I, Clarendon Press, Oxford. 1950.
- [3] J.A Greenwood, J.B.P Williamson, Contact of nominally flat surfaces, Proc. R. Soc. Lond. A 295, pp.300-319. 1966.
- [4] J.F Archard, Elastic deformation and the laws of friction, Proc. R. Soc. Lond. A 243, pp.190-205. 1957.
- [5] C. A. Coulomb, Théorie de machines Simples. Mémoire de mathématique et de Physique de l'académie Royale, Paris, pp. 161-342, 1785.
- [6] B. Bushan, Tribology and mechanics of magnetic storage devices, Springer Verlag. 1990.
- [7] R. C. Jonson, Optimum Design of Mechanical Elements, 2 ed., John Wiley and Sons, New York 1980.
- [8] B. Bhushan and B.K. Gupta, Handbook of Tribology Materials. Coatings and Surface Treatments, McGraw-Hill, United States, 1991.
- [9] H. J. Mathieu, E. B. Rene, Analyse et technique des surfaces, Presse polytechnique Lausanne, première édition 2003.
- [10] E. Rabinowicz, Friction and Wear of Materials, 2 Edition, Wiley, New-York, pp. 3 15, 1995.

[11] E. P. Bowden and D. Tabor, The friction and lubrication of solids I, Clarendon Press, Oxford. 1950.

[12] M. Meiller. Etude Expérimentale du frottement outil/pièce en coupe orthogonale. PhD thesis, ENSAM Cluny, 2002.

[13] N. T. Trinh, la Modélisation du Comportement Thermomécanique et Métallurgique des Aciers Application au procédé de soudage et de traitements thermiques, thèse Doctorat de l'école polytechnique ParisTech, 2008.

[14] F. Zemzemi, Caractérisation de modèles de frottement aux interfaces Pièce-outil-copeau en usinage application au cas de l'usinage des aciers et de l'inconel 718, Thèse Doctorat de l'École Centrale de Lyon, 2007.