

Etude comparative du comportement tribologique et thermique des couples cuivre-graphite et graphite-graphite

Abdeldjalil BENFOUGHAL^{1,2*}, Ali BOUCHOUCHA¹, Redha ABOUD¹, Youcef MOUADJI¹

¹Laboratoire de mécanique, Département de Génie mécanique, Faculté des Sciences de la Technologie, Université des Frères Mentouri, Campus Chaab Ersas, 25000 Constantine, Algérie

²Research Center in Industrial Technologies (CRTI), P.O.Box 64 Cheraga 16014.Algiers.ALGERIA* auteur correspondant: abdeljalilbenfoughal@yahoo.fr

Résumé - Le comportement tribologique du contact glissant sec cuivre-graphite est étudié en fonction des paramètres charge normale, vitesse de glissement et temps d'essai. Les expériences ont été réalisées, dans une ambiance atmosphérique, en utilisant un tribomètre pion-disque. La mesure de la température moyenne de contact s'effectue à l'aide d'un thermocouple de type K placé à 2 mm de la surface de contact. Cinq efforts normaux et cinq vitesses de glissement ont été appliqués pour cette étude. Les résultats expérimentaux illustrent l'évolution de la température moyenne au voisinage de contact, coefficient de frottement et l'usure en fonction du temps, la vitesse linéaire et de la charge normale. Ces résultats montrent que ces paramètres ont un effet plus ou moins significatif sur la variation de la température moyenne de contact, l'usure et le coefficient de frottement. La discussion des résultats repose sur des observations au microscope optique et des phénomènes interfaciaux résultant du frottement.

Mots Clés : température, coefficient de frottement, usure, cuivre, graphite.

Nomenclature

P	charge normale, N	t	temps, mn
V	vitesse de glissement, m/s	m_i	masse avant essai, mg
T	température de contact, $^{\circ}C$	m_f	masse après essai, mg
W	taux d'usure, mg/m	d	distance parcourue par le pion, m
		μ	coefficient de frottement,

Symboles grecs

1. Introduction

Les problèmes de l'industrie sont très complexes par la nécessité d'optimiser le service de la vie des différents éléments, et impliquer beaucoup de phénomènes complexes tels que l'usure, le frottement entre les surfaces antagoniques et la surchauffe générée à l'interface de contact [1, 2].

Il existe plusieurs méthodes pour des essais tribométriques [3, 4]. Les plus utilisés pour les études fondamentales, des tribomètres : essai pion-disque, essai, essai bloc sur cylindre, essai unidirectionnel ou essai à mouvement alterné sur une plaque et l'essai des quatre sphères. De nombreuses études ont été confirmées ou prouvé que le coefficient de frottement dépend largement à la pression normale [5-12].

L'élévation locale de la température qui résulte et la perte de matière l'hors de fonctionnement peut fortement affecter les propriétés de surface des matériaux en contact dynamique et produire une dissipation d'énergie dans la zone de frottement [2].

Le graphite a été adopté dans plusieurs domaines technologiques pour les contacts de glissement, en raison de sa structure lamellaire et de ses propriétés anisotropes qui induisent un bon comportement de frottement. L'interaction du cuivre avec le graphite est d'importance pratique

considérable par transmission du courant électrique avec des contacts de glissement incluant dans la technologie des moteurs et des moteurs électriques ferroviaires [13].

L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence de la vitesse de glissement et la charge normale appliquée sur le comportement au frottement, usure et la température de contact du couple tournant cuivre-graphite et graphite-graphite et de faire une comparaison du comportement tribologique entre les deux couples.

2. Dispositif expérimental

2.1. Tribomètre

Le tribomètre utilisé (Fig.1) se base sur le principe de la machine d'usure par glissement, il consiste à créer un certain frottement entre deux pièces (pion sur disque).

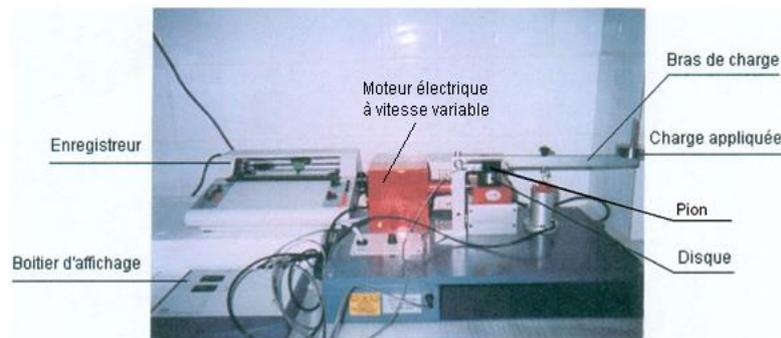


Figure 1 : Tribomètre de type pion-disque

2.2. Contact pion-disque

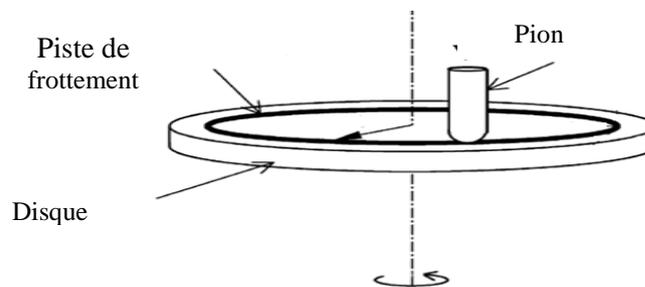


Figure 2 : Schéma du contact pion-disque

Le modèle de contacte utilisé est de type pion-disque. Les essais sont effectués à un air ambiant. Le pion utilisé est de forme cylindrique (Fig.2) contient un méplat, qui permet de le fixer dans un trou à l'aide d'une vis de blocage sur un bras de charge en aluminium. Il est chargé contre un disque par des masses du poids variable. Le pion est aisément échangé par un autre échantillon, ou peut être enlevé pour permettre la mesure de la perte de masse ou du changement dimensionnel dû à l'usure. Le disque est un plateau circulaire d'usure fixé sur un support qui tourne à des vitesses de rotation variables. La transmission de la puissance du moteur électrique au disque se fait à l'aide d'un réducteur de vitesses de rapport 1:20. Le variateur de fréquence qui permet d'avoir une gamme de vitesses de rotation allant de 10 tr/mn à 240tr/mn. Le rayon de la piste d'usure est fixé à 0,02m, la vitesse linéaire varie donc entre 0,020 m/s et 0,5m/s. La force normale est transmise au support d'échantillon à l'aide des masses reposant sur l'extrémité d'un bras de charge. La gamme de charge sur le pion est inférieure à 40N. Le disque est de 50mm de diamètre et

5mm d'épaisseur, le pion à 8mm de diamètre et 20mm de longueur.

Le capteur de force retient le bras de charge dans le plan horizontal et ceci enregistre la force de frottement produite dans le contact entre les deux échantillons.

3. Matériaux

Pion

Ilestencuivre pur à 99,9%, bon conducteur de la chaleur et d'électricité. Sa structure CFC le laisse élastique et ductile, facilement déformable à froid, sa recristallisation commence vers 220°C [14].

Disque

Le disque est en graphite (brush of carbon DE9000). Ce type de graphite est utilisé dans les moteurs électriques.

4. Méthode expérimentale d'évaluation du coefficient de frottement et la température de contact

1.1. Mesure de la température de contact

Le banc d'essai est équipé de capteurs, pour effectuer le suivi de l'évolution de la température. Les pions sont instrumentés par des thermocouples de type K placés à 2 mm derrière la surface de frottement (Fig.3). La température relevée n'est pas exactement celle de la surface de contact, mais elle en est un bon indicateur.

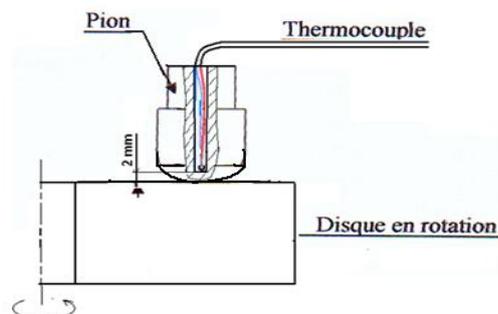


Figure 3 : Méthode expérimentale de mesure de la température

1.2. Mesure de l'usure

Comme les dommages causés par l'usure peuvent être de formes différentes, les essais traditionnels permettent d'évaluer la quantité de matière perdue. L'importance même de l'usure va aussi influencer le choix du test. En effet, si l'usure est élevée, la détermination de la variation de volume ou de masse sera un critère suffisant et facile à évaluer et le coût de l'essai sera économique. Par contre, lorsqu'il est nécessaire d'identifier une usure faible, des techniques beaucoup plus sensibles et donc plus coûteuses sont indispensables afin de détecter les variations de masse par minute [15].

L'usure des pions est évaluée par la méthode de pesage, en utilisant une balance de précision 10^{-5} [g]. L'échantillon est pesé avant et après de chaque essai.

$$\Delta m = m_i - m_f \quad (1)$$

Le taux d'usure est calculé par la formule :

$$W = \Delta m / d \text{ avec } d = v \cdot t \quad (2)$$

1.3. Mesure du coefficient de frottement

On a directement obtenu le coefficient de frottement par un système d'acquisition (capteur piézo-électrique). Nous obtenons l'évolution de la force de frottement en fonction du temps.

La courbe d'étalonnage (Fig.4) est la courbe de correspondance effective entre l'affichage du système d'acquisition de la force tangentielle et les charges réelles appliquées à son extrémité lors de la situation d'étalonnage. Ces courbes sont nécessaires à l'utilisateur qui peut définir quels sont les réglages conduisant à la meilleure exactitude.

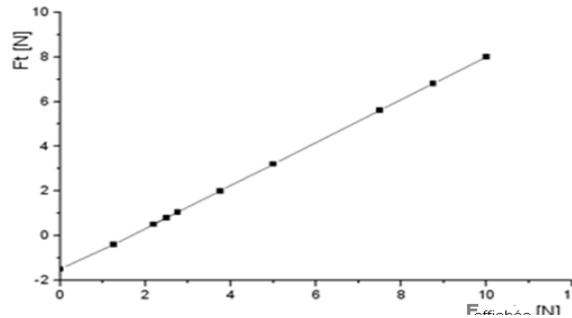


Figure 4 : Courbe d'étalonnage de la force de frottement.

La force tangentielle F peut être calculée par la relation suivante

$$F = 1,041667 (F_{\text{affichée}} - 0,8) + 2,5 \quad (3)$$

Le coefficient de frottement est défini par : $\mu = F/P$

2. Résultats et discussions

2.1. Influence de la charge normale et la vitesse de glissement sur la détermination de la température de contact

Le comportement en frottement et l'évolution de la température en fonction du temps pour plusieurs charges normales et vitesse de glissement sont enregistrés.

La température de contact est une valeur inestimable pour comprendre le comportement tribologique et thermique des matériaux en contact dynamique direct l'un sur l'autre [2].

L'usure dépend de l'interaction entre la charge appliquée et la vitesse de glissement, le changement du mécanisme d'usure est lié à la déformation plastique du métal sous-jacent et à la température de contact qui est fortement affectée par la charge normale P et la vitesse de glissement V . on peut considérer que la température de contact mesurée est une température moyenne de la surface apparente du pion.

Lors de l'étude de la température d'essai, les pions utilisés étaient instrumentés de thermocouples. Les températures mesurées se stabilisent après 1200 secondes (fig.5).

La figure 5 montre que la température augmente rapidement pour le couple cuivre-graphite alors que pour le couple graphite-graphite, elle est plus faible. Par ailleurs, on remarque aussi que, l'écart de température pour les mêmes conditions entre les deux couples de matériaux varie jusqu'à $t = 20\text{mn}$, ensuite, elle se stabilise pour une valeur de $\Delta T = 20^\circ\text{C}$.

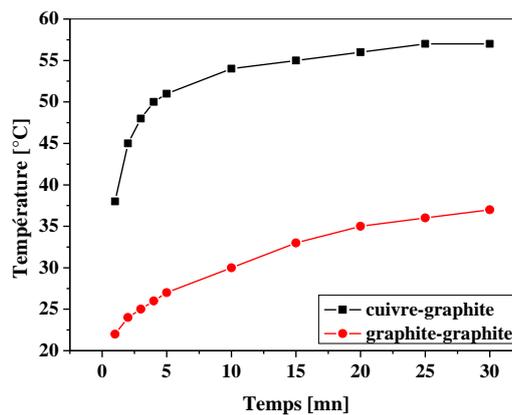


Figure 5 : Evolution de la température à 2mm de l'interface dans le pion en fonction du temps pour les deux couples, $P = 20\text{ N}$ et $v = 0,5\text{ m/s}$.

La température de contact à l'air ambiant augmente avec l'augmentation de la charge normale et la vitesse de glissement et atteint une valeur maximale de 58°C pour le couple cuivre-graphite, et 37°C pour le deuxième couple. Cette augmentation accélère la vitesse de plusieurs réactions et en particulier celle de la formation de la couche d'oxyde [16]. Par ailleurs, la pression de contact a pour objectif d'accroître l'aire réelle de contact.

La température de contact l'oxydation et change les propriétés mécaniques des surfaces en contact surtout quand la charge normale est élevée [17].

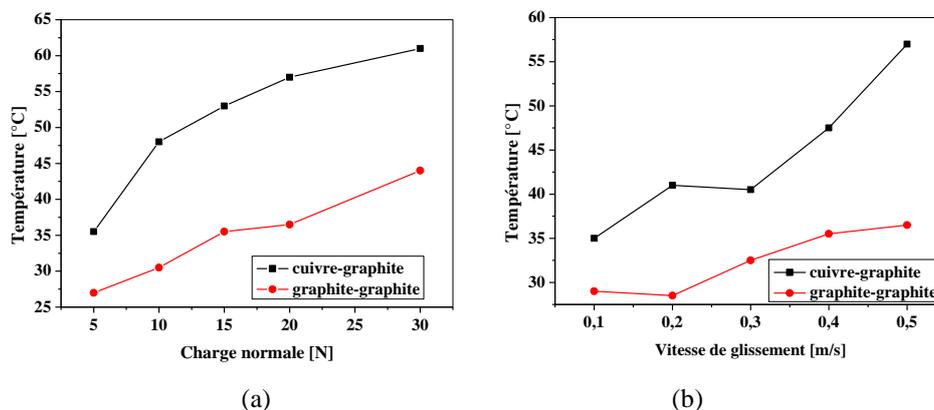


Figure 6: Evolution of the contact temperature of the interface to 2 mm in the pin according to, (a) load applied to $V=0,5\text{ m/s}$ and (b) sliding speed to $P = 20\text{ N}$

2.2. Influence de la charge normale et la vitesse de glissement sur l'usure

Les différents mécanismes d'usure développés dépendent de la charge normale et la vitesse de glissement [18]. Des rayures de surface et des particules d'adhésion sont observées sur les surfaces usées par un microscope optique (fig.8 et 9). Les débris d'usure sont sous forme de poudre noire ou de particules métalliques avec différentes morphologies, variant des particules irrégulières aux formes plus ou moins régulières comme l'illustre la figure 8.

L'évolution du taux d'usure en fonction de la charge normale appliquée et la vitesse de glissement sont représentés graphiquement par la figure 7 à l'air ambiant.

La figure 7 montre que, le volume usé est sensiblement proportionnel à la charge où l'usure croit considérablement pour les deux couples en contact [14]. L'usure augmente linéairement en fonction

de la charge normale. Au Contraire, lorsqu'on augmente la vitesse de glissement l'usure des couples étudiés est diminuée.

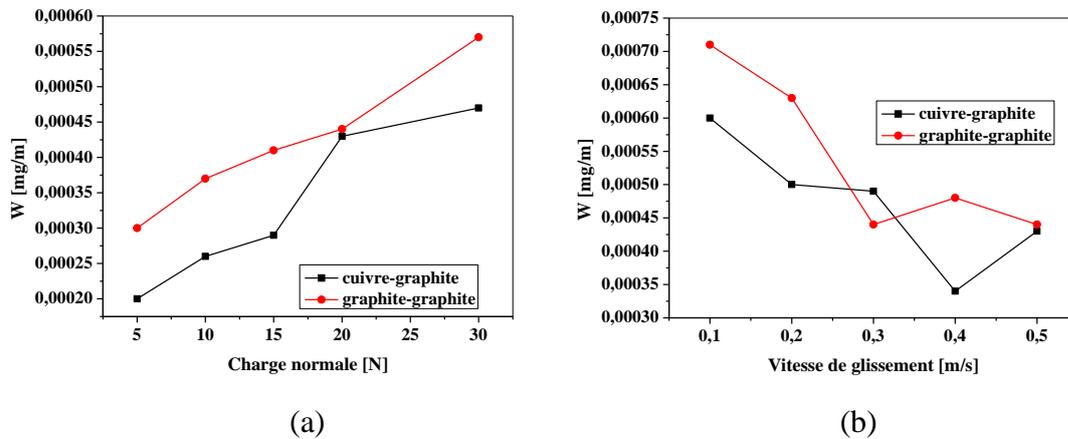


Figure 7 : Evolution de l'usure en fonction de (a) charge appliquée avec $V=0,5m/s$ (b) vitesse de glissement avec $P=20N$

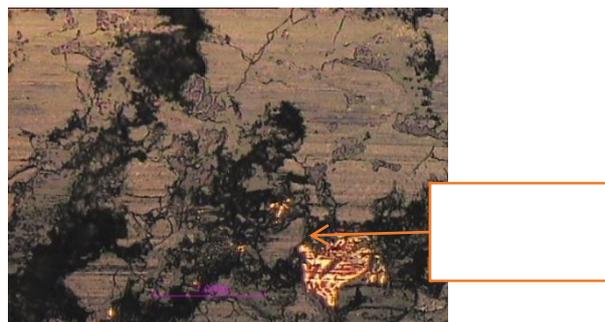


Figure 8 : Image optique d'une zone usée de graphite ayant frotté contre le cuivre, $P = 20N$ et $V = 0,5m/s$.

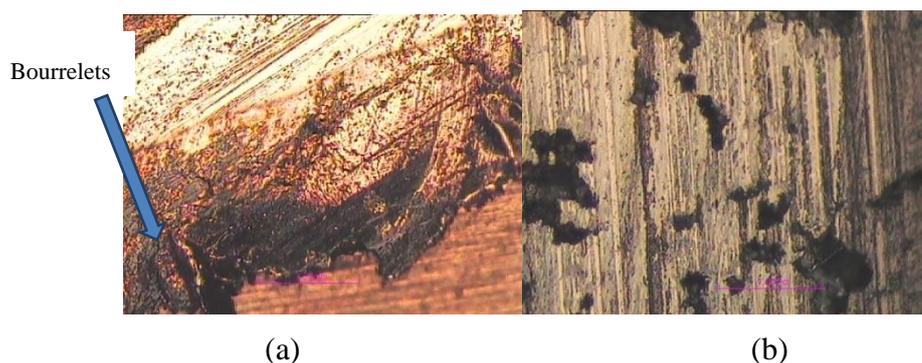


Figure 9 : Image obtenue par microscope optique de la surface usé du pion, (a) contact cuivre-graphite, (b) contact graphite-graphite pour $P = 20N$ et $V = 0,5m/s$.

2.3. Influence de la charge normale et la vitesse de glissement sur le coefficient de frottement

Les coefficients de frottement enregistrés des deux couples en fonction du temps, pour une charge appliquée de 20 N et une vitesse de glissement de 0,5 m/s, montrent l'existence de deux

régimes : le premier caractérisé par une augmentation brusque (période de rodage), le second est plus ou moins stable (Fig.10).

Le couple cuivre-graphite, montre que la courbe de frottement enregistrée est caractérisée d'abord par une étape transitoire reliée par un régime stable qui tend à se stabiliser à une valeur du coefficient de frottement de 0,24. Pour le couple graphite-graphite, le coefficient de frottement se stabilise autour d'une valeur inférieure à 0,18.

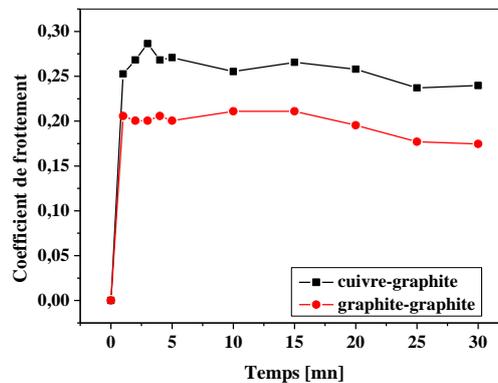


Figure 10 : Evolution du coefficient de frottement en fonction du temps pour les deux couples avec : $P = 20 \text{ N}$ et $v = 0,5 \text{ m/s}$.

D'une manière générale, l'augmentation de la charge normale conduit à une réduction significative du coefficient de frottement [18], le pion comprime la matière et l'oblige à s'écouler vers les côtés, sous forme des bourrelets (Fig.9), ce qui facilite son déplacement. Au contraire pour un faible effort, la matière passe d'avantage au-dessous du pion. Ce phénomène peut être expliqué aussi par l'effet de l'écroutissage de la pièce qui empêche le phénomène d'adhésion pour les hautes valeurs d'efforts. En effet, plus la pression de contact est grande plus le contact sera parfait [18]. Par conséquent, au lieu d'avoir le frottement entre les aspérités dans le cas des faibles pressions, il devient un frottement parfait dans le cas des grandes pressions. De plus, les phénomènes liés à la déformation plastique augmentent avec la pression de contact.

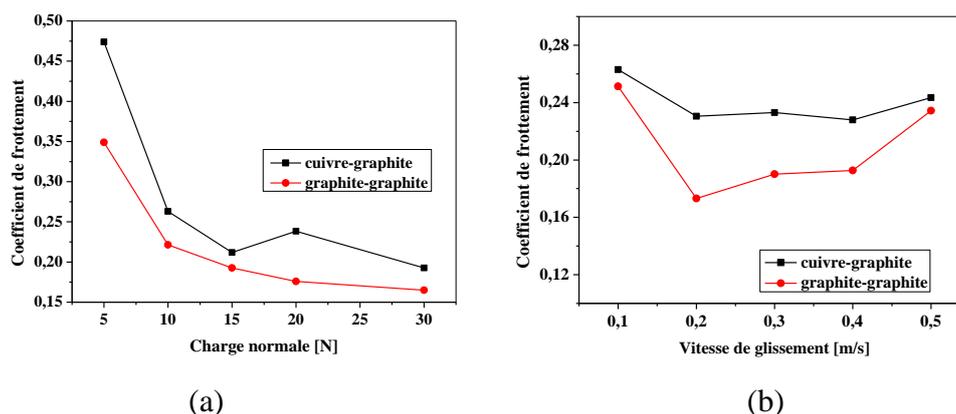


Figure 11 : Evolution du coefficient de frottement en fonction de (a) charge normale avec $V=0,5\text{m/s}$ (b) vitesse de glissement avec $P=20\text{N}$

La figure 11(a) montre, qu'il y a une diminution rapide du coefficient de frottement entre 5 et 15N et décroissement modérée jusqu'à 30N pour les deux couples étudiés. Nous notons également que, dans le cas du couple graphite-graphite, le coefficient de frottement tend vers une valeur de 0,16. Pour le deuxième couple le μ est stabilisé autour de 0,19.

La courbe de la figure 11 (b) prouve que, la vitesse n'a pas une influence significative sur le coefficient de frottement pour des faibles vitesses. ¶En effet, pour le couple graphite-graphite, le coefficient de frottement change de 0,25 à 0,24.¶Le couple cuivre-graphite reste presque inchangé est vari de 0,19 à 0,18

3. Conclusion

Nous avons développé dans cet article une étude destinée pour la détermination des températures interfaciales d'un contact dynamique, l'usure et le coefficient de frottement.

Les résultats expérimentaux ont confirmé l'effet de la charge normale appliquée et la vitesse de glissement des surfaces de contact sur la température de contact, le taux d'usure et le coefficient de frottement.

L'application d'une charge normale P a une influence significative sur le coefficient de frottement des pions de cuivre et, avec moins de degré de ceux du graphite.

Les résultats obtenus montrent que les paramètres les plus influents sur la variation de la température, l'usure et le coefficient de frottement sont : la charge normale, la vitesse de glissement et la nature des matériaux utilisés.

Le taux d'usure et le coefficient de frottement changent avec la charge normale appliquée et la vitesse de glissement. Cependant, la variation du taux d'usure et le coefficient de frottement en fonction de la charge normale appliquée et/ou la vitesse de glissement sont de nature différente.

On peut constater que le couple graphite-graphite supporte mieux la température que le couple cuivre-graphite, et ce à cause des propriétés thermiques du carbone, qui supportent très bien les changements thermiques.

On peut conclure aussi que, la température interfaciale joue un rôle primordial dans les tribocontacts.

Références

1. A. Bouchoucha and Al, [Influence of electric fields on the tribological behaviour of electrodynamical copper/steel contacts](#), Wear 203-204 (1997) 434-441. F. Joly, P. Vasseur, G. Labrosse, Soret instability in a vertical Brinkman porous enclosure. Number. Heat Transfer, Part A, 39 (2001) 339–359.
2. C. Boubechou; A. Bouchoucha; H. Zaidi; Y. Mouadji, Thermal and tribological analysis of the dry sliding steel-steel couple traversed by an electrical current, Physics Procedia 55 (2014) 165 – 172.
3. J. Paulo Davim; R. Cardoso, Effect of the reinforcement (carbon or glass fibers on friction and wear behavior of PEEK against steel surface at long dry sliding, Wear 266, (2009) pp. 795-799.
4. Chunxia Li, Fengyan Yan, A comparative investigation of the wear behavior of PTFE and PI under dry sliding and simulated sand dust conditions, Wear 266 (2009) 632-638.
5. J. Rech, C. Claudin, E. Eramo, Identification of a friction model—application to the context of dry cutting of an AISI 1045 annealed steel with a TiN-coated carbide tool, Tribology International 42 (2009) 738–744
6. C. Bonnet, F. Valiorgue, J. Rech, C. Claudin, Identification of a friction model—application to the context of dry cutting of an AISI 316L annealed steel with a TiN-coated carbide tool, International Journal of Machine Tool & Manufacture 48 (2008) 1211–1223.

7. O. Klinkova, J. Rech, S. Drapier, J.-M. Bergheau, Characterization of friction properties at the work material/ cutting tool interface during the machining of randomly structured carbon fibers reinforced polymer with carbide tools under dry conditions, *Tribology International* 44 (2011) 2050–2058.
8. W. Grzesik, P. Nieslony, Prediction of friction and heat flow in machining incorporating thermophysical properties of the coating–chip interface, *Wear* 256 (2004) 108–117.
9. M. Chen, K. Kato, K. Adachi, The comparison of sliding speed and normal load effect on friction coefficient of self-mated Si₃N₄ and SiC under water lubrication, *Tribology International* 35 (2002) 129–135.
10. P. Spijker, G. Anciaux, J. Molinari, Relations between roughness, temperature and dry sliding friction at the atomic scale, *Tribology International* 59 (2012) 222–229.
11. E. Feyzullahoglu, Z. Saffak, The tribological behaviour of different engineering plastics under dry friction conditions, *Materials and Design* 29 (2008) 205–211.
12. M. Stembalski and Al, Determination of the friction coefficient as a function of sliding speed and normal pressure for steel C45 and steel 40HM, *archives of civil and mechanical engineering* 13 (2013) 444–448.
13. A. Senouci, J. Frene, H. Zaidi, Wear mechanism in graphite–copper electrical sliding contact, *Wear* 225–229 (1999) 949–953.
14. A. Senouci, H. Zaidi, J. Frene, A. Bouchoucha, D. Paulmier, Damage of surfaces in sliding electrical contact copperrsteel, *Applied Surface Science* 144–145 (1999) 287–291.
15. T. Delvigne, Utilisation de la technique d'activation superficielle pour la mesure en continu des phénomènes d'usure, d'érosion et de corrosion, *Matériaux et Techniques*. vol. 1-2-3, p. 111-114, (1993).
16. C. Vergne, C. Boher, R. Gras, C. Levailant, Influence of oxides on friction in hot rolling: Experimental investigations and tribological modeling, *Wear* 260 (2006) 957–975.
17. H. Zhao, G. C. Barber, J. Liu, Friction and wear in high speed sliding with and without electrical current, *Wear* 249 (2001) 409-414.
18. T. Ding, G.X. Chen, X. Wang, M.H. Zhu, W.H. Zhang, W.X. Zhou, Friction and wear behavior of pure carbon strip sliding against copper contact wire under AC passage at high speeds, *Tribology International* 44 (2011) 437–444.