
Étude de l'impact de l'humidité sur la tenue tribologique des matériaux de contact glissant

Kaid-Ameur Djilali

*Laboratory of Industrial engineering and sustainable development (LGIDD),
University Center of Relizane, Algeria
djilalikaidameur@yahoo.fr*

RÉSUMÉ. La compréhension des mécanismes physiques mis en jeu dans un contact sec glissant disque/plaquettes nécessitent une simulation expérimentale représentée par un disque et un pion en tenant compte d'un certain paramètre de freinage tels que la nature du matériau du disque et du pion, la force appliquée par le pion, la vitesse de rotation du disque. D'autre part afin d'appréhender l'évolution des comportements tribologiques des contacts secs glissants des matériaux de freinage, il est critique de comprendre la réponse des matériaux des disques de frein à leurs environnements surtout au niveau du littoral ou l'humidité et le taux de salinité sont très élevées. Cependant, la corrosion du contact fait surface en raison de ces environnements qui ont de grands effets sur le coefficient de frottement et l'usure des disques de frein.

ABSTRACT. Understanding the physical mechanisms resulting from dry sliding contact disc/pads, require an experimental simulation represented by a disc and a pin, under the influence of a number of braking parameters, such as the nature of the disc material and pin, the load applied by the pin in, and the rotational speed of the disc. On the other hand to apprehend the evolution of the tribological behavior of braking materials, it is a critic to understand the answer of the brake disc materials in the environments especially in the littoral environment where humidity and salinity rate are very high. However, the corrosion of the contact emerges because these environments have a large effect on the friction coefficient and the wear of the brake discs materials.

MOTS-CLÉS : humidité, composite, fonte grise, acier, aluminium, usure, tribologie.

KEYWORDS: humidity, composite materials, grey font, steel, aluminum, wear, tribology.

DOI: 10.3166/rcma.2017.00021 © 2017 Lavoisier

1. Introduction

L'un des objectifs de ce travail consiste à l'étude expérimentale du comportement tribologique de trois matériaux destinés aux disques de frein : l'acier chromé 100Cr6, la fonte grise FG25 et le composite d'aluminium Al-MMC (A359/SiCp). Les matériaux de friction ou de garniture choisis sont un matériau organique de plaquettes de frein d'une voiture (1,4 essence) et un matériau semi-métallique des garnitures de freinage équipant un avion de transport.

À cette fin, un modèle expérimental de friction réalisée au moyen du tribomètre « disque-pion », en utilisant comme matériaux des disques de frein : fonte (FG25), acier chromé (100Cr6) et le composite à base d'aluminium renforcé par le silicium de carbure Al-MMC (A359/SiCp). Les pions dans tous les essais étaient en matériau de friction à base de résine organique des plaquettes de frein d'une voiture et en composite semi-métallique des garnitures équipant un avion de transport. Les résultats expérimentaux ont montré que les coefficients de frottement et le taux d'usure pour tous les matériaux étaient sensibles à l'augmentation de la force et de la vitesse de glissement. En augmentant l'humidité, il est observé une formation d'un film d'eau qui se comportait comme un lubrifiant à l'interface de glissement et réduit le coefficient de frottement et le taux d'usure.

2. Matériaux de disques de frein

2.1. Fonte grise FG25

Les résultats de recherche ont montré que la fonte à forte teneur en carbone est un matériau très approprié pour les disques de freins et peu coûteux. La fonte grise à graphite lamellaire, couramment utilisée dans les freins automobiles se distingue par ses bonnes propriétés mécaniques, thermiques et tribologiques acceptables. Les proportions de carbone et les ajouts de différents types d'éléments (phosphore, potassium, silicium, manganèse, cuivre, soufre, nickel, chrome, molybdène, aluminium, autres éléments d'alliages et des impuretés diverses) permettent d'influencer les propriétés thermo-mécaniques de la fonte qui demeure en perpétuelle évolution (Berthelot, 1992 ; Dufrenoy, 1995 ; Kim *et al.*, 1995).

Propriétés : Densité = (7,2 à 7,5)gr/mm³ ; Limite élastique = 300 MPa ; Module de Young = 140000 MPa ; Coefficient de dilatation thermique = $11,5 \cdot 10^{-6}$ W/m °K ; Conductivité thermique = 45 W/m °C ; Capacité thermique = 544 J/Kg °K¹.

2.2. Acier chromé 100Cr6 (Carneiro *et al.*, 1992 ; Jimbo *et al.*, 1990)

L'acier est un matériau à base de fer, ayant une teneur en carbone de 0,2 à 1,5 %, qui le rend plus dure que la fonte. Il se caractérise par une très bonne malléabilité et flexibilité.

L'acier chromé choisi (100Cr6) est utilisé dans la fabrication de pièces exposées à de sévères sollicitations et à l'usure, notamment des roulements (tableau 1).

Propriétés : Densité = (7,61 à 7,81)gr/mm³ ; Limite élastique = 900 MPa ; module de Young = 210 000 MPa ; Coefficient de dilatation thermique = $11,4 \cdot 10^{-6}$ W/m °K ; Conductivité thermique = 46,6 W/m °C ; Capacité thermique = 435 J/Kg °K.

1. www.optimol-instruments.de.

Tableau 1. Composition chimique de l'acier chromé 100Cr6 (Rosso, 2006)

Éléments	C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo	Al	Cu
%Masse	0,93– 1,05	0,15– 0,35	0,25– 0,45	< 0,015	< 0, 015	1,35 –1,6	< 0,1	< 0, 05	< 0,3

2.3. Composite à matrice d'aluminium renforcée au silicium de carbure Al-MMC (A359/SiCp)

Les composites à matrice métallique (MMC) sont composés d'au moins deux composantes, la matrice métallique et le renfort. Les matrices sont généralement en alliage dont les plus répandues sont à base d'aluminium (faible densité). Les renforts sont globalement des céramiques (carbures, oxydes, borures)².

Les composites à matrice d'aluminium renforcée par des particules du carbure de silicium (Al-SiCp) ont fait l'objet de nombreuses études. En raison de la présence de différents constituants, ils se caractérisent par leurs excellentes propriétés thermomécaniques et tribologiques. Ils résistent à l'usure, aussi bien en abrasion qu'en érosion. Grâce à ces propriétés, les composites au Al-SiCp trouvent une large application dans l'industrie civile et militaire, l'automobile, l'aérospatial et d'autres secteurs de l'industrie. Le composite au Al-SiCp choisi dans ce travail est celui du fabricant DURALCAN avec la désignation F3S-20S. Il est composé d'une matrice en alliage A359 et du renfort en Al-SiCp.

Le composite choisi, sous la désignation Al- MMC (F3S-20S) est renforcé de 20 % de Volume de particules de SiC de taille $12,4 \pm 4,2 \mu\text{m}$. Le seul inconvénient pour les Al-MMC est la difficulté de l'usinage et le traitement des pièces, un outil spécial doit être utilisé pour réaliser les dernières étapes de fabrication, telles que la découpe au jet d'eau ou l'utilisation d'outils diamantés³ (figure 1 et tableau 2).

Propriétés : Densité = $(7,61-7,81)\text{gr/mm}^3$; Résistance à la traction = $(317-340)$ MPa ; Limite élastique = $(317-340)$ MPa ; Module de Young = $(970\ 000-990\ 000)$ MPa ; Coefficient de dilatation thermique = $(4-6) \cdot 10^{-6}$ W/m °K ; Conductivité thermique = $(185-200)$ W/m °C ; Capacité thermique = 897 J/Kg °K (Rosso, 2006).

2. The Lucefin Group, <http://www.lucefin.com/en/siderurgia/acciai-speciali-e-al-carbonio/>, viewed Jan. 2014.

3. Deutsche Edelstahlwerke GmbH, <http://www.dew-stahl.com/produkte/edelbau-undwaelzlager-staehle/>, viewed Jan. 2014.

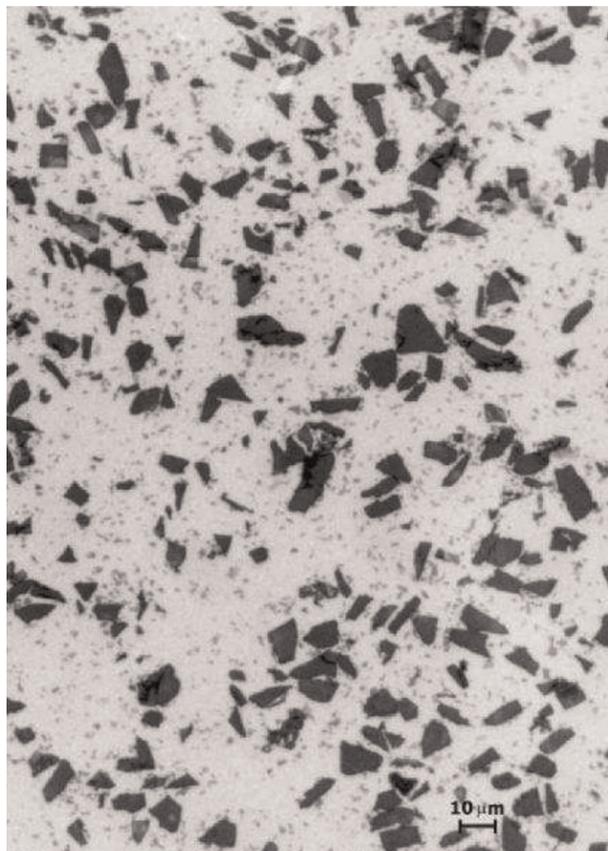


Figure 1. Microstructure de la surface du composite à matrice d'aluminium Al-MMC A359/SiCp (Rosso, 2006)

Tableau 2. Composition chimique de l'alliage A359 (Rosso, 2006)

Éléments	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Ti	Autres	Al
%Masse	0,2	0,5–0,7	0,1	8,5–9,5	0,2	0,1	0,2	0,2	Balance

3. Matériaux des garnitures ou pions

Les matériaux de friction utilisés pour les plaquettes doivent avoir de bonnes caractéristiques de frottement, d'usure, une large plage de température et donc une durée de vie appréciable. Les fabricants de freins ne divulguent presque aucune information sur la nature et la teneur des constituants des garnitures. Pour mener les essais expérimentaux, on s'est contenté de deux types de matériaux de friction, le premier un

matériau organique employé dans les plaquettes de frein d'une voiture et le second un matériau de friction semi-métallique utilisé dans les freins aéronautiques (Klose, 2012).

Tableau 3. Pourcentage massique des éléments constituant du pion en matériau organique

Cl	Mg	Al	Mn	Si	Fe	Zn	Cr	Ba	O	K	S	Ca
1,07	1,03	2,98	1,26	2,46	48,77	0,79	0,5	2,83	30	0,7	2,61	5

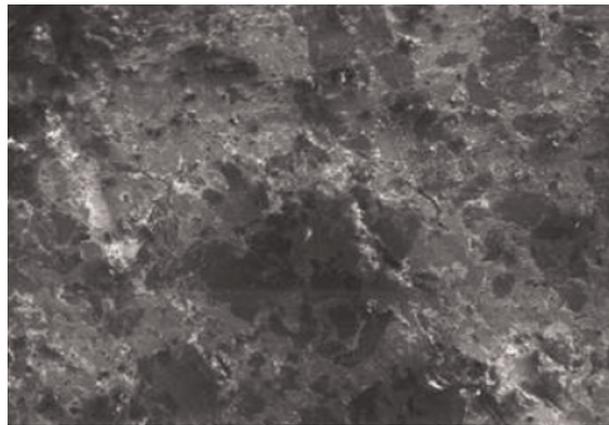


Figure 2. Image microscopique de la surface du pion en matériau organique

3.1. Matériau organique

Ce type de matériau est constitué de divers renforts, des particules et des fibres, dont la taille varie du micromètre au millimètre, englobés dans une matrice phénolique.

Chaque ingrédient ou renfort introduit dans la composition du matériau assure un rôle particulier qui participe à l'ajustement des propriétés physiques, mécaniques, thermiques et tribologiques. Le tableau 3 montre les éléments contenus dans un matériau organique trouvés par l'analyse EDX. La figure 2 montre l'image d'une observation par microscope électronique à balayage de la surface du matériau organique en question (Shabaita, 2014).

Les rapports volumiques des constituants de la garniture d'automobile (Shabaita, 2014) :

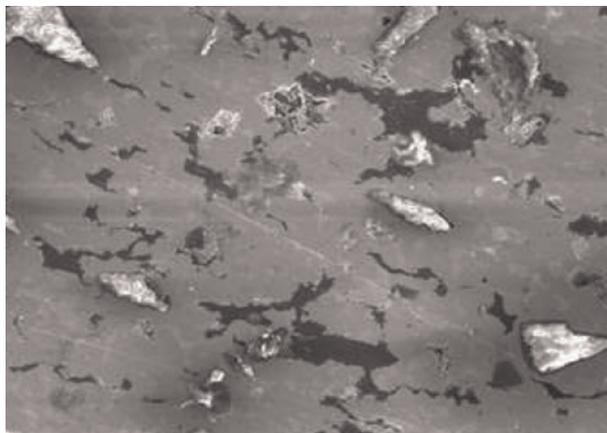


Figure 3. Image microscopique de la surface du pion en matériau semi métallique

Tableau 4. Pourcentage massique des éléments constituant du pion en matériau semi métallique (Shabaita, 2014)

Mg	Al	Mo	Si	Fe	Sn	Cu	Ba	O	C
0,39	4,09	7,80	1,57	58,83	1,27	15,13	5,43	4,37	1,13

Fibres structurelles.....(20–30) % ; Particules lubrifiantes.....(30–35) % ; Particules abrasives.....(10–15) % ; Matrice phénolique.....(20–30) %.

3.2. Matériau semi-métallique

Ces matériaux, constitués d'un mélange de matières organiques et métalliques supportent mieux les sollicitations thermiques élevées que les matériaux organiques en raison de leur composition mixte (Eriksson et Jacobson, 2017). La figure 3 et le tableau 4 montrent respectivement la composition et l'image MEB du matériau utilisé dans cette étude.

4. Influence de l'humidité

Les figures 4 et 5 montrent respectivement l'influence de l'humidité sur le coefficient de frottement et le taux d'usure des matériaux de disques de frein frottant contre des pions semi-métalliques. On remarque que l'humidité n'exerce aucun effet sur le comportement tribologique des trois matériaux testés. Les coefficients de frottement et les taux d'usures de chaque matériau testé sont presque constants. Sous l'influence

d'humidité, l'acier chromé 100Cr6 présente un meilleur comportement tribologique avec un coefficient de frottement acceptable et un taux d'usure le moins élevé, le composite Al-MMC avec un coefficient de frottement élevé et un taux d'usure moyen, malgré un bruit gênant constaté pour la vitesse de glissement choisie de $3,76 \text{ m.s}^{-1}$ (1200 tr/min). Enfin, la fonte se distingue par un mauvais comportement tribologique à cause de son taux d'usure élevé, malgré qu'elle a un coefficient de frottement élevé que celui de l'acier chromé.

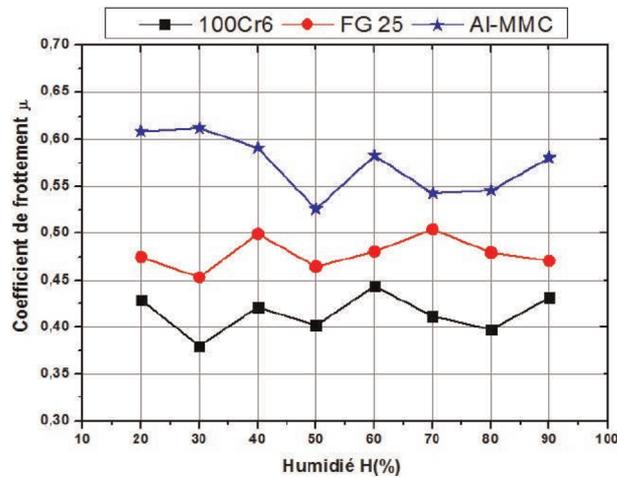


Figure 4. Influence de l'humidité sur le coefficient de frottement matériau de friction semi métallique

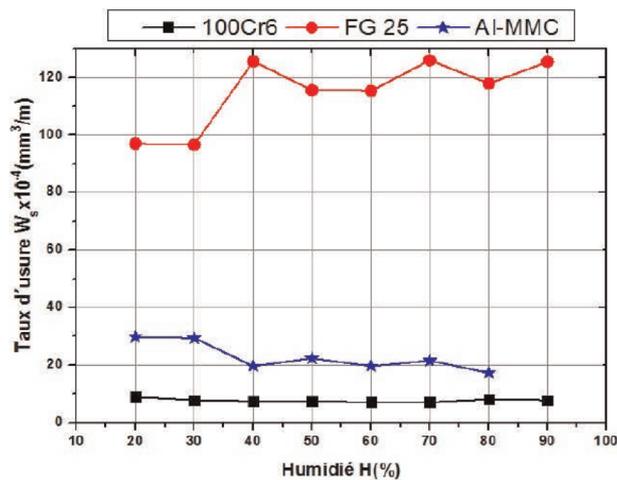


Figure 5. Influence de l'humidité sur le taux d'usure matériau de friction semi métallique

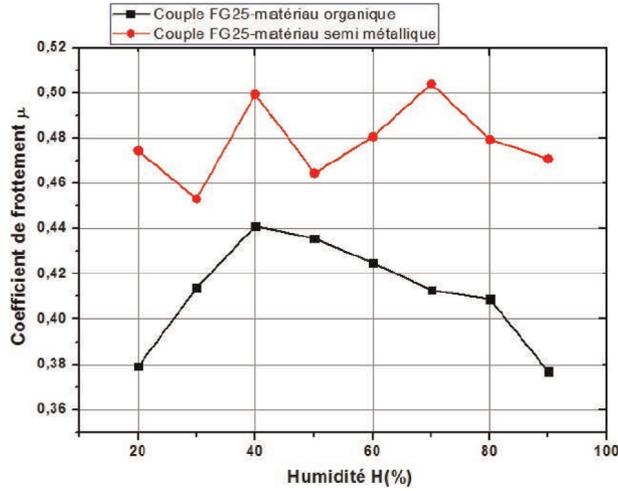


Figure 6. Comparaison des coefficients de frottement des disques en fonte FG25 frottant contre pion organique et semi métallique sous l'effet de l'humidité

5. Comparaison entre les effets de l'humidité

Comme on l'a évoqué auparavant l'humidité n'a aucune influence sur les matériaux frottant contre les matériaux de friction semi-métalliques, mais elle a une influence sur les matériaux frottant contre les matériaux organiques. Seul le coefficient de frottement

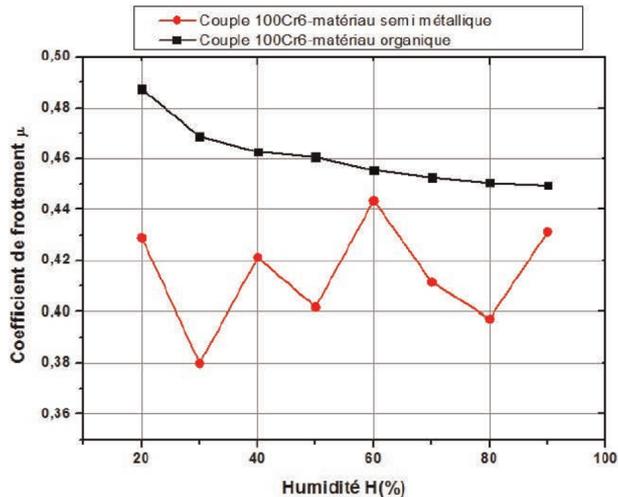


Figure 7. Comparaison des coefficients de frottement des disques en acier chromé 100Cr6 frottant contre pion organique et semi métallique sous l'effet de l'humidité

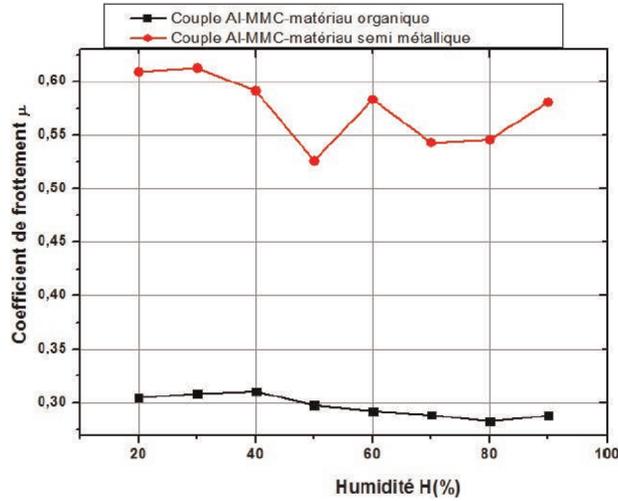


Figure 8. Comparaison des coefficients de frottement des disques en composite Al-MMC contre pion organique et semi métallique sous l'effet de l'humidité

du couple (100Cr6-organique) est plus élevé que celui du couple 100Cr6-semi métallique, car la charge appliquée par le tribomètre est plus élevée (200 N). Pour les autres couples, les coefficients de frottement des couples de matériaux frottant contre pion semi métallique sont plus importants (figures 6-8).

Pour les valeurs d'humidité allant jusqu'à 70 %, le taux d'usure du couple 100Cr6-matériau semi métallique reste presque constant, et il est moins élevé que celui du couple 100Cr6-matériau organique (figure 10). La tendance inverse est enregistrée pour

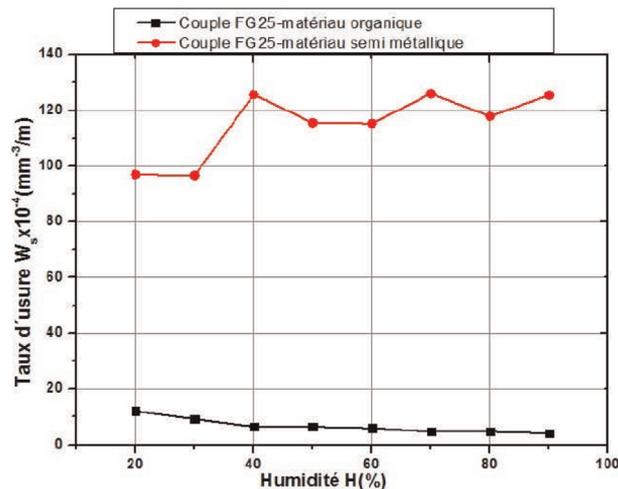


Figure 9. Comparaison des taux d'usures des disques en fonte FG25 contre pion organique et semi métallique sous l'effet sous l'effet de l'humidité

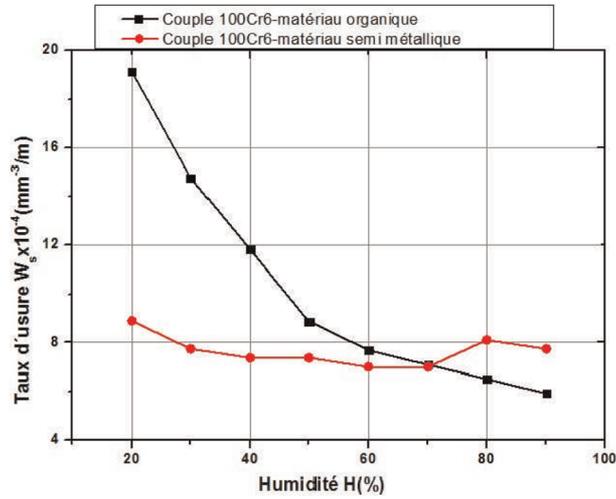


Figure 10. Comparaison des taux d'usures des disques en acier chromé 100Cr6 contre pion organique et semi métallique sous l'effet sous l'effet de l'humidité

les valeurs d'humidité supérieures à 70 %. Pour les autres couples, les taux d'usures des couples FG25matériau semi métallique et Al-MMC-matériau semi métallique présentent des valeurs importantes comparées à celles des couples FG25-matériau organique et Al-MMC-matériau organique (figures 9 et 11).

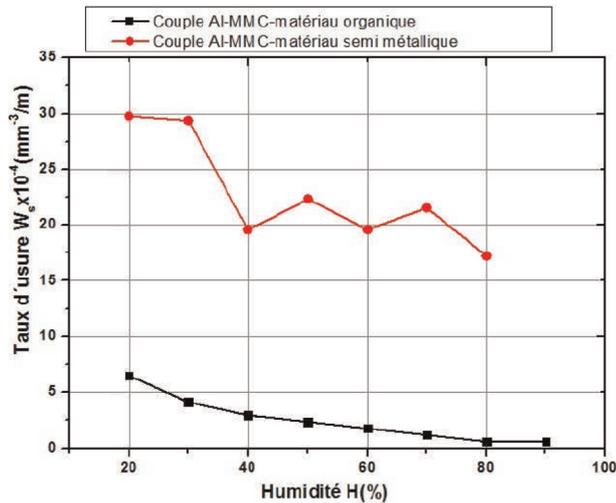


Figure 11. Comparaison des taux d'usures des disques en composite Al-MMC contre pion organique et semi métallique sous l'effet sous l'effet de l'humidité

6. Conclusion

L'effet de l'humidité sur le coefficient de frottement dépend des matériaux testés du couple disque-pion. Pour les matériaux de disques frottant contre un pion organique, le coefficient de frottement de la fonte FG25 augmente dans une plage d'humidité faible (jusqu'à 40 %), mais il diminue entre 40 % et 90 %. Le coefficient de frottement de l'acier chromé diminue avec l'augmentation de l'humidité. Par contre, pour le composite Al-MMC le taux d'humidité n'a aucune influence sur le coefficient de frottement. Concernant la variation du taux d'usure du pion organique, elle est inversement proportionnelle à l'humidité. Ceci est dû au film d'eau formé sur les surfaces de contact et qui se comporte comme un lubrifiant. Le taux d'humidité n'a aucune influence sur le comportement tribologique des matériaux des disques frottant contre un pion semi-métallique. Les travaux expérimentaux ont montré l'importance de la microstructure des matériaux de friction sur le piégeage du troisième corps et la formation des plateaux de portance. Les quantités de débris provenant des pions organiques et piégées dans les contacts conduisent à la formation de plaques planes portantes et larges. C'est ce mécanisme de formation de troisième corps qui explique le bon comportement tribologique du matériau de friction organique. Le matériau de friction semi-métallique développe en revanche des débris durs qui contribuent à la formation de rugosités des surfaces de contact des disques en composite et en fonte. Ces débris semi-métalliques seront ensuite éjectés ou évacués en dehors du contact durant les essais de frottement.

Bibliographie

- Berthelot J.-M. (1992). *Matériaux composites : comportement mécanique et analyse des structures*. Masson, Paris.
- Carneiro E.A., Winocq L., Berthaud J. (1992). *Disc brakes of trucks: a technical innovation for heavy vehicles*. Warrendale SAE.
- Dufrenoy P. (1995). *Étude du comportement mécanique des disques de frein vis avis des risques de défaillances*. Thèse de doctorat, Université de Lille, France.
- Eriksson M., Jacobson S. (2017). Tribological surfaces of organic brakepads. *Tribology*.
- Jimbo Y. et al. (1990). *Development of high thermal conductivity castiron for brake discrotor*. Warrendale SAE, p. 22-28.
- Kim S.S., Lee S.H., Lee S.M. (1995). Thermomechanical wear mechanism of friction brake. *Proceedings of the international tribology conference*. Tokohama, p. 1567-1572.
- Klose H. (2012). *LeichtbauwerkstoffeModul, WestsächsischeHochschule Zwickau*. Sommersemester.
- Rosso M. (2006). Ceramic and metal matrix composites: Routes and properties. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 175, p. 364-375.
- Shabaita K. (2014). *Characterizing corrosive wear of chemically reactive surface layers on metal and ceramic brake disc materials*. Master thesis, Zwickau, Germany.

