

JIFT 2023

31 mai-2 juin 2023
Villeneuve d'ascq
France

Table des matières

Effect of graphene reinforcement on the fracture and tribological properties of silicon-based nanocomposites, Abo El-Einein Hussein	1
Characterization of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the emissions of railway braking systems: exploratory study at reduced scale, Al Kaderi Raafa [et al.]	4
Régimes de frottement dans les transmissions de vélo en cyclisme de haut-niveau, Aubert Rémi [et al.]	5
INFLUENCE DU COURANT ELECTRIQUE ET DE SA POLARITE SUR LE COMPORTEMENT EN FROTTEMENT D'UN CONTACT GLISSANT, Bekhouche Djamel [et al.]	7
Influence du courant électrique et de sa polarité sur le comportement en frottement d'un contact glissant, Bekhouche Djamel [et al.]	8
INFLUENCE DE LA RUGOSITE INDUITES PAR SABLAGE SUR LE COMPORTEMENT D'UN CONTACT CYLINDRIQUE TRACEUR/GAZODUC, Ben Attia Malak	10
Indentation in-situ de mousses polymères en tomographie et modélisation numérique, Ben Khelil Nourchene	12
Optimisation des conditions de génération de la lubrification électrochimique des aciers inoxydables, Bouguerra Kaouthar [et al.]	15
USURE ET TOPOGRAPHIE DES SURFACES, Brunetiere Noël	18

Performance et fiabilité des alliages métalliques amorphes base Cu-Zr pour des applications tribologiques, Barlemont Solène [et al.]	21
Développement de nouveaux alliages base Nickel pour des applications tribologiques sous hautes températures: effet de la microstructure, Baydoun Soha [et al.]	23
INFLUENCE DES PARAMETRES FONCTIONNELS SUR LE COMPORTEMENT TRIBOLOGIQUE DES COUPLES DYNAMIQUES CUIVRE-ACIER ET LAITON-ACIER, Boubechou Choubeila [et al.]	25
COMPORTEMENT TRIBOTHERMIQUE DES CONTACTS DYNAMIQUES SECS CUIVRE-ACIER ET LAITON-ACIER SANS PASSAGE DU COURANT ELECTRIQUE, Boubechou Choubeila [et al.]	26
INFLUENCE DES PARAMETRES FONCTIONNELS SUR LE COMPORTEMENT TRIBOLOGIQUE DES COUPLES DYNAMIQUES CUIVRE-ACIER ET LAITON-ACIER, Boubechou Choubeila [et al.]	29
Le Machine learning comme outils de prédiction du frottement, Bouchot Alizée [et al.]	31
Relations entre les flux de troisième corps, les mécanismes de portance et les émissions de particules en situation de freinage automobile, Briatte Mathis	33
Prévision de l'érosion par particules solides véhiculées par un fluide à l'aide du POT-TEST, Chen Yan-Ming	34
Dépôt lubrifiant MoS ₂ +Ta pour application spatiale - Maintien de la lubrification lors de la transition Air/vide, Colas Guillaume [et al.]	37
Une méthode pour étudier l'évolution du frottement avec un historique sévère de freinage, Delattre Sylvain	40
Etude de la formation de tribofilm dans un contact électrique métallographique glissant par spectroscopie Raman, Doutriaux Timothée [et al.]	41
Comportement électrique et tribologique des contacts glissants or/or d'un collecteur tournant type cil/bague, Ferreira Corentin [et al.]	44

Etude expérimentale et simulation des phénomènes fretting fatigue dans les contacts Aube/Disque de turboréacteurs: influence de l'usure., Fouvry Siegfried [et al.]	47
INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR D'UN " FLASH " DE CUIVRE SUR LE COMPORTEMENT TRIBOLOGIQUE D'UN CONTACT ÉLECTRIQUE MULTICOUCHES NI-CU-AG SOUMIS À DES SOLlicitATIONS DE FRET-TING USURE, Goeury Laura [et al.]	50
Rayures ductiles pour atténuer des rayures aiguës et des impacts sur disques durs, Gauthier Christian	53
ANALYSE MORPHOTRIBOLOGIQUE MULTIÉCHELLE D'UN CONTACT PION-DISQUE LORS D'UN FREINAGE, Guibert Robin [et al.]	55
Caractérisation des émissions particulières de plaquettes de frein à l'aide d'un banc Pion-Disque, Hoff Marie	58
PERFORMANCES TRIBOLOGIQUES D'UN FILM ADHESIF BIOMIMÉTIQUE COMBINANT DES MICROSTRUCTURES EN FORME DE SPATULE ET DE CHAMPIGNON, Kasem Haytam [et al.]	62
Perception tactile de surfaces micro-texturées : impact de l'inclinaison du doigt sur la mesure in vivo du frottement, Louyot Etienne [et al.]	64
comportement tribologique en milieux lubrifié et non lubrifié de biomatériaux AISI316L et Ti-6Al-4V, Labaïz Mohamed	66
Comment glisser sans frotter du régime de lubrification limite au régime hydrodynamique, Mazuyer Denis [et al.]	69
Inter-comparaison de technologie de mesure sur un profilomètre multi-physique appliqué à des surfaces abrasées en TA6V, Moreau Clement [et al.]	72
Intéret de l'analyse in situ pour l'étude des particules d'usure des implants articulaires de hanche et l'analyse de leurs effets sur les tissus biologiques, Massardier Valentin [et al.]	74
USURE DE SURFACES ONDULEES REVETUES D'OR, Mischler Stefano	77

Impact de l'anisotropie morphologique et cristallographique sur le comportement tribologique d'un superalliage base nickel obtenu par procédé L-PBF: premiers résultats, Parent Pierre-Nicolas [et al.]	78
IMPROVEMENT OF SURFACE PROPERTIES OF 30CrMo12 STEEL USING BOROCARBONITRIDING TREATMENT, Rezala Aicha	80
Frottement entre deux fibres ou fils de carbone : étude expérimentale et modèle analytique, Tournalias Michel [et al.]	81
Tribomètre pour l'étude des contacts à très grande vitesse, haute température et incursion contrôlée, Vincent Julien [et al.]	83
Contact pneu-chaussée en traction, freinage ou en virage, Wallace Efoé R. [et al.]	85
SIMULATION DU TOUCHER DE SURFACES TEXTILES A L'AIDE D'UN STIMULATEUR : CONCEPTION DES SIGNAUX DE COMMANDE, Weiland Benjamin [et al.]	86
COMPORTEMENT TRIBOLOGIQUE A HAUTE TEMPERATURE DE L'INCONEL718 OBTENU EN FABRICATION ADDITIVE, Zurcher Théo [et al.]	88
LA THERMOMÉTRIE IN SITU DANS UN CONTACT SEC EST-ELLE POSSIBLE ?, Zhou Yujiao [et al.]	90
Liste des auteurs	92

Effect of graphene reinforcement on the fracture and tribological properties of silicon-based nanocomposites

H. Abo El-Einein¹, B. Berthel¹, A. Berrais², A. Weibel², C. Laurent², M.I. De Barros Bouchet¹

1. University of Lyon, Ecole Centrale de Lyon, Laboratory of Tribology and System Dynamics CNRS UMR 5513, 36 Avenue Guy de Collongue 69134, Ecully Cedex, France

2. CIRIMAT, UMR UPS-CNRS-INP 5085, Institut Carnot Université Toulouse 3 Paul-Sabatier, 31062 Toulouse cedex 9, France

MOTS CLES

Few-layered graphene, silicon nitride, silicon carbide, brazilian test.

INTRODUCTION

There is a strongly growing demand for highly wear-resistant and reliable ceramic-based materials that can be used for a wide range of industrial applications. For this reason, the development of ceramic-based, high-performance materials with superior tribological and high mechanical properties is of utmost interest. The aim of this work is to investigate the friction, wear and mechanical properties of a novel graphene reinforced ceramic matrix nanocomposites (GCMC), more particularly silicon nitride (Si_3N_4) and silicon carbide (SiC) composites, that can be used for technical applications such as bearings and rotary seals.

FRICITION AND WEAR BEHAVIOUR

The quality of graphene and the homogeneity of its dispersion at the nanoscale significantly affect the mechanical properties and tribological behavior of the final composite [1,2]. Therefore, Few-Layered-Graphene-reinforced (FLG) sheets are deposited by chemical vapor deposition (CVD) directly on the silicon nitride grains, then they are sintered by spark plasma sintering (SPS). The special feature of this deposition process [3] is to produce a composite material whose silicon grains are perfectly enveloped by FLG controlling the covering rate and the number of graphene sheets. Different FLG-reinforced and non-reinforced Si_3N_4 samples were selected to investigate the effect of the graphene covering rate and sheets number on the mechanical properties, friction and wear behaviors.

The tribological behavior is investigated under severe high contact pressures in dry and water-lubricated conditions using three different materials counterparts, tungsten carbide (WC), silicon nitride (Si_3N_4) and aluminum oxide (Al_2O_3).

FRACTURE BEHAVIOUR BY DIAMETRICAL COMPRESSION TEST

Furthermore, the mechanical properties of these materials were determined by means of a diametrical compression test (Brazilian test). The ultimate strength can be measured directly while the elastic properties of the material were obtained by coupling displacement field measurements by the Digital Image Correlation technique (DIC) and a classical Levenberg-Marquardt algorithm. The preliminary results were in good agreement with those obtained by other methods (ultrasound, hardness tests...). Then, the mechanisms of fatigue crack initiation and propagation are studied by analyzing the fracture surfaces using the scanning electron microscope. By investigating the tribological performance and mechanical properties of the new nanocomposites should make it

possible to clarify the relationship between properties and structure and to optimize the deposition process.

Références

- [1] P. Miranzo et al., From bulk to cellular structures: A review on ceramic/graphene filler composites, *J. Eur. Ceram. Soc.* 37 (2017) 3649–3672. 10.1016/j.jeurceramsoc.2017.03.016.
- [2] J. Balko et al., Wear damage of Si₃N₄-graphene nanocomposites at room and elevated temperatures, *J. Eur. Ceram. Soc.* 10.1016/j.jeurceramsoc.2014.02.025.
- [3] A. Weibel et al., Fast and easy preparation of few-layered-graphene/magnesia powders for strong, hard and electrically conducting composites, *Carbon* 136 (2018) 270-279. doi: 10.1016/j.carbon.2018.04.085 <https://oatao.univ-toulouse.fr/20140>.

Characterization of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the emissions of railway braking systems: exploratory study at reduced scale

R. Al Kaderi,^{1,2} A. Grira,¹ M. Jamar,¹ L. Y. Alleman,¹ E. Perdrix,¹ E. Davin,² A. Mege-Revil,² M.-J. Robert,³ Y. Desplanques,² A. Tomas¹

¹Center for Energy and Environment, IMT Nord Europe, Institut Mines-Télécom, Univ. Lille, F-59500 Douai, France

²Univ. Lille, CNRS, Centrale Lille, UMR 9013 - LaMcube - Laboratoire de Mécanique, Multiphysique, Multi-échelle, F-59000 Lille, France

³Alstom, F-93482 Saint-Ouen-sur-Seine, France

Air quality is a major public health issue over the world. Rail transportation is rightly considered as a greener and better CO₂-efficient mobility solution. However, many studies have evidenced poor air quality in confined railway stations with major concerns about particles from non-exhaust emissions (Querol et al., 2012; Martins et al., 2015). In addition to particles, Volatile Organic Compound (VOC) emissions are also expected to worsen air quality (Yang et al., 2023), although much less investigations have been carried out. The objectives of the present work are (i) to characterize VOC emissions from a reduced scale bench tribometer; (ii) to evidence relationships between VOCs emissions, brake materials (cast iron disc and organic pad), and braking conditions.

The bench was instrumented to control braking parameters and to measure VOCs and particles (not reported here) emissions, both directly with online monitors and off-line, back to the laboratory after sample collection. VOC characterization instruments include an online Photo-Ionization Detector (PID, for total VOCs) and sampling on Tenax and DNPH (dinitrophenyl hydrazine) cartridges followed by gas chromatography mass spectrometry (for Tenax) and liquid chromatography (for DNPH) analysis (for speciated VOCs and carbonyls, respectively).

A comprehensive description of the optimized methodology employed for offline measurements of VOCs using Tenax tubes is provided. The study yielded results that identified several VOCs, such as monoaromatics and linear alkanes. Furthermore, several hypotheses are presented regarding the possible sources of these compounds, including brake pads, emissions from lubricants, or other ambient air sources.

This work confirms the suitability of the reduced scale bench set-up and the proposed sampling and analysis methodology to study VOC emissions from railway brake systems.

Acknowledgements: The present work takes place within the BREAQ project funded by the French government as part of the PIA, invest for the Future Plan, now integrated into France 2030, and operated by ADEME, the French ecological transition agency.

References

- V. Martins, T. Moreno, M. C. Minguillón, F. Amato, E. de Miguel, M. Capdevila, X. Querol, Exposure to airborne particulate matter in the subway system, *Sci. Tot. Environ.* 511, 711–722 (2015)
- X. Querol, T. Moreno, A. Karanasiou, C. Reche, A. Alastuey, M. Viana, O. Font, J. Gil, E. De Miguel, M. Capdevila, Variability of levels and composition of PM 10 and PM 2.5 in the Barcelona metro system. *Atmos. Chem. Phys.* 12, 5055-5076 (2012)
- J. Yang, X. Fan, H. Zhang, W. Zheng, T. Ye, A review on characteristics and mitigation strategies of indoor air quality in underground subway stations, *Sci. Tot. Environ.* 869, 15 April 2023, 161781 (2023)

REGIMES DE FROTTEMENT DANS LES TRANSMISSIONS DE VELO EN CYCLISME DE HAUT NIVEAU

R. Aubert^{1,2,3}, X. Roizard², F. Grappe³ et F. Lallemand^{2,4}

1. Université de Franche-Comté, CNRS, Institut FEMTO-ST, F-25000 Besançon, France

2. Société AFULudine, F-39100, Dole, France

3. Laboratoire Athlète Matériel Environnement (LAME), Centre de Performance Equipe Cycliste Groupama-FDJ, F-25000 Besançon, France

4. Université de Franche-Comté, CNRS, Institut UTINAM, F-25000 Besançon, France

MOTS CLES

Tribologie, Cyclisme, Chaîne, Rendement, Usure

INTRODUCTION

La réduction des forces de frottement au sein des transmissions en cyclisme (F_t) peut impacter positivement les domaines de la performance (de nombreuses épreuves se jouent à la seconde après plusieurs heures de course) ainsi que la longévité des composants. Représentant 2 à 4% de la puissance totale développée par le cycliste [1], les F_t dépendent de plusieurs paramètres tels que la tension de chaîne [2] – qui donne la pression de contact (P , Pa), la vitesse de frottement (S , m.s⁻¹), la viscosité du lubrifiant utilisé (η , Pa.s) et la rugosité des surfaces en contact (\overline{Ra} , m). Ces paramètres permettent alors de déterminer un nombre de lubrification L (\emptyset) renseignant sur le régime de lubrification considéré selon l'équation suivante [3] :

$$L = \frac{S * \eta}{P * \overline{Ra}}$$

Le but de cette étude est de déterminer les régimes de lubrification rencontrés en cyclisme de haut niveau afin d'optimiser la lubrification.

METHODE

Les P et S considérés sont calculés pour être représentatifs d'un effort de type contre-la-montre effectué par un athlète professionnel : 300 à 500 watts de puissance moyenne (PO), 80 à 120 rpm de cadence de pédalage moyenne (Cad), 56 dents pour le plateau et une cassette de 12 vitesses réparties entre 11 et 30 dents.

Le parti est pris ici de considérer le frottement entre le rouleau de la chaîne et l'épaule du maillon interne, zone qui reçoit les P les plus élevées. Le diamètre intérieur du rouleau est de 5.168 mm et le diamètre externe du maillon interne est de 5.00 mm. Cet écart est considéré suffisamment grand pour utiliser la mécanique Hertzienne.

Les bornes P_{\max} et P_{\min} ont été déterminées à partir de PO, Cad, du diamètre du plateau et de la surface du contact. De même, S_{\max} et S_{\min} ont été calculées connaissant la géométrie du rouleau, le nombre de dents du plateau et de la cassette et Cad. Les bornes de η pour l'étude englobent l'ensemble des huiles utilisées dans le cyclisme. Enfin, \overline{Ra} a été fixée à une valeur de 0.25 μm .

RESULTATS ET DISCUSSION

Après calcul, L varie sur l'ensemble des domaines de lubrification décrits par Schipper et Stribeck : régime mixte (BL), régime limite (ML) et régime élasto-hydrodynamique (EHL). Pour BL, le coefficient de frottement est constant et élevé, du fait qu'il repose essentiellement sur un contact métal-métal. En ML, le coefficient de frottement chute brutalement pour une faible évolution de L ;

cette zone est donc à risque car une légère modification des conditions de frottement peut avoir de grands impacts sur la performance ou l'usure. De ce fait, la zone à viser correspond à l'EHL : il s'agit d'une zone présentant un coefficient de frottement faible et stable.

Afin d'approcher au mieux cette zone EHL, l'objectif est donc d'augmenter L . Plusieurs stratégies peuvent le permettre : réduction de P (augmentation de la surface de contact, diminution de la force normale pour une puissance donnée en modifiant le diamètre des plateaux), réduction de \bar{R}_a (polissage), augmentation de S (augmentation du diamètre du contact) et surtout augmentation de η .

Il est à noter que pour des S très élevées, une viscosité élevée peut augmenter le coefficient de frottement, le lubrifiant s'opposant au cisaillement. Un compromis est alors à déterminer pour le lubrifiant ; ce n'est pas le cas concernant les vitesses de frottement considérées ici.

Enfin, les zones BL et ML sont inévitables, notamment pour des S très faibles en début et fin d'articulation du maillon. De ce fait, l'emploi d'additifs extrême pression dans le lubrifiant sera indiqué afin de limiter le frottement métal-métal.

CONCLUSION

L'étude présentée ici a pour but de déterminer les régimes de lubrification rencontrés en cyclisme de haut niveau. Après calcul, il apparaît que l'ensemble des régimes décrits par Schipper et Stribeck sont rencontrés (BL, ML, EHL). L'objectif sera de tendre à une utilisation majoritaire de la plage EHL, celle-ci permettant d'abaisser le coefficient de frottement de façon stable, assurant alors une faible usure et une performance optimale. L'emploi d'additifs extrême pression et la viscosité du lubrifiant seront ainsi deux éléments primordiaux.

Références

- [1] Atkinson G, Davison R, Jeukendrup A, Passfield L (2003). "Science and cycling: current knowledge and future directions for research", *Journal of Sports Sciences*. 21(9), pp. 767–87.
- [2] Spicer JB, Richardson CJK, Ehrlich MJ, Bernstein JR, Fukuda M, Terada M (2001). "Effects of Frictional Loss on Bicycle Chain Drive Efficiency", *Journal of Mechanical Design*. 123(4), pp. 598–605.
- [3] Schipper DJ, De Gee AWJ (1995). "Lubrication modes and the IRG transition diagram", *Lubr Sci*. 8(1), pp. 27–35.



Bekhoucha Djamel¹, Bouchoucha Ali¹, Zaidi Hamid², Boubechou Choubella³

¹Laboratoire de Mécanique, Faculté des Sciences de la technologie, UEMC1, Algérie

²Institut Pprime UPR3346-IUT, Université de Poitiers, Futuroscop, Chasseneuil, F-86960, Poitiers, France.

³Faculté de Technologie, Département de Génie Mécanique, Université de 20 Août 1955, Skikda 21000, Algérie

Résumé

Ce travail a pour objectif d'étudier l'influence de l'intensité du courant électrique et de sa polarité sur le comportement en frottement d'un pion en graphite appuyé par une charge contre un disque rotatif en cuivre. Pour ce faire, nous avons utilisé un tribomètre pion-disque. Les essais se sont déroulés à sec dans une ambiance atmosphérique. Les paramètres d'essais comportent la charge normale, la vitesse linéaire et l'intensité du courant électrique et sa polarité. Les résultats obtenus montrent que l'intensité du courant électrique et de sa polarité ont un effet important sur le coefficient de frottement. En effet, il conduit à une diminution du coefficient de frottement, cette diminution est plus faible que lorsque le cuivre est anodique. D'autre part, le transfert du graphite sur la surface du disque facilite le glissement entre les deux surfaces et joue le rôle de lubrifiant solide. Pour discuter les résultats expérimentaux, des analyses et des observations sont faites pour mettre en évidence l'effet de ces paramètres sur le frottement du couple étudié.

I. INTRODUCTION

Dans la vie tribologique, le passage du courant électrique joue un rôle prépondérant dans le comportement en frottement des contacts électriques glissants soit négativement soit positivement. En revanche, divers auteurs [1-2] ont mis en évidence que le courant électrique est un paramètre important qui a une influence significative sur le processus thermique, les phénomènes cinétique-chimiques et les modifications géométriques des matériaux à l'interface des contacts dynamiques. En effet, le processus d'oxydation, et la croissance du film d'oxyde des antagonistes, dépendent de l'intensité du courant électrique et de sa polarité. Ce film d'oxyde joue un rôle primordial et détermine la durée de service des couples électriques glissants [3]. Le but de cet article est de montrer l'influence du courant électrique et de sa polarité sur le comportement en frottement du couple cuivre-graphite. En effet, une approche expérimentale sur des différents échantillons a été réalisée en utilisant des tests de type pion-cylindre.

II. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

II.1. Tribomètre

Le dispositif expérimental utilisé pour réaliser les essais tribologiques est un tribomètre de type bi-pion-cylindre (figure 1). Les expériences ont été réalisées à l'air ambiant. Pour le passage du courant électrique, une alimentation électrique entraîne la circulation d'un courant continu et unidirectionnel du pion cathodique au cylindre en acier puis du cylindre en acier au pion anodique.

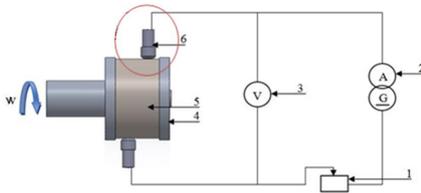


Figure 1. Dispositif expérimental. 1 rhéostat, 2 alimentation en courant continu, 3 voltmètre, 4 isolant porte-cylindre en teflon, 5 cylindre, 6 pion.

III. RESULTATS

III.1 Influence de l'intensité et de la polarité du courant électrique

La figure 1 présente l'influence de l'intensité et de la polarité du courant électrique sur le coefficient de frottement. En examinant cette figure, on constate que l'augmentation de l'intensité du courant électrique diminue le coefficient de frottement et semble tendre vers une limite et ce, quelle que soit la polarité du fil.

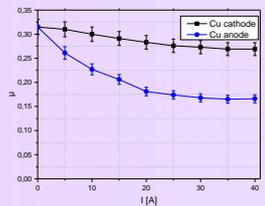


Figure 1: Evolution du coefficient de frottement en fonction de l'intensité du courant : P = 5N, V = 5.6 m/s.

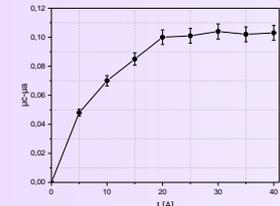


Figure 2: Allure de la différence $\mu_c - \mu_a$ en fonction de I [A].

Néanmoins, la courbe relative au cuivre cathode (μ_c) se situe au-dessus de celle quand le cuivre est anode (μ_a). Cette différence est illustrée par la figure 2 qui montre que la différence ($\mu_c - \mu_a$) en fonction de I semble admettre une asymptote horizontale. Autrement dit, il existe une intensité critique (20 [A]) à partir de laquelle la différence $\mu_c - \mu_a$ est indépendante de I.

Dans ce qui suit, nous allons faire varier les paramètres tribologiques que nous contrôlons à savoir la charge normale, la vitesse de glissement, la résistance électrique de contact, l'intensité du courant électrique et de sa polarité pour mettre en évidence les facteurs responsables de ce comportement.

III.2 Influence de la charge normale sous l'effet du courant électrique et de la résistance électrique de contact

D'après la figure 3, le coefficient de frottement diminue linéairement avec l'augmentation de la charge normale appliquée. En effet, le passage du courant électrique à travers le contact entraîne une diminution relative de coefficient de frottement par rapport à $I = 0$. Cette diminution est plus marquée à faible charge que le fil soit cathode ou anode.

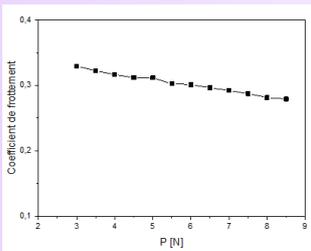


Figure 3: Evolution de coefficient de frottement en fonction de la charge normale (v=5.6 m/s, I=0).

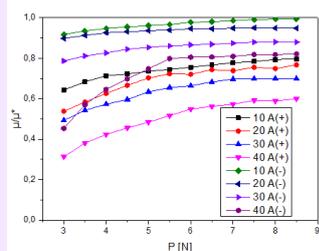


Figure 4: Evolution de coefficient de frottement relatif μ/μ_0 en fonction de la charge normale pour différentes intensités et polarités du courant (v=5.6 m/s, + signifie cuivre anode et - signifie cuivre cathode).

La figure 4 représente la variation du rapport μ/μ_0 en fonction de la charge normale appliquée pour différentes intensités et polarités du courant électrique, où μ et μ_0 symbolisent respectivement le coefficient de frottement avec et sans courant.

La figure 5 montre l'évolution de μ/μ_0 en fonction de l'intensité du courant sous différentes charges normales. Il ressort clairement de cette figure que l'effet du courant électrique sur la diminution relative de μ augmente avec I.

La figure 6 représente l'évolution de la résistance électrique de contact R_c pour différentes charges normales en faisant varier I. On remarque aisément la nette diminution de R_c quand le courant électrique augmente.

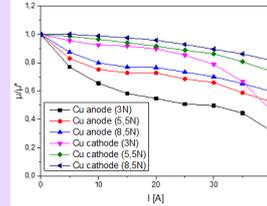


Figure 5: Evolution de coefficient de frottement relatif en fonction du courant électrique pour différentes charges. (v=5.6 m/s).

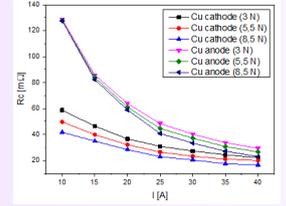


Figure 6: Influence de l'intensité du courant pour différentes charges sur la résistance électrique de contact (v=5.6 m/s).

IV. Influence de la vitesse de glissement sur le coefficient de frottement

L'influence de la vitesse de glissement sur le coefficient de frottement avec et sans passage du courant électrique est présenté dans la figure 6. On constate que :

Si I = 0 : μ augmente notablement avec la vitesse puis diminue ;

Si I ≠ 0 : Lorsque le fil est cathode μ croît avec la vitesse et tend vers une valeur limite à laquelle il reste relativement stable.

Par contre, si le fil est anode, μ présente une légère diminution lorsque la vitesse de glissement augmente. Il existe une vitesse en deçà de laquelle μ est plus faible, quand le fil est cathode, alors qu'il est plus élevé lorsque le fil est anode. Au-delà de cette de cette valeur le phénomène inverse est observé.

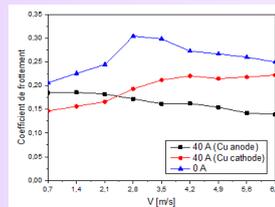


Figure 7: Influence de la vitesse de glissement sur le coefficient de frottement avec et sans passage du courant électrique (P=5.5 N).

Les résultats expérimentaux obtenus montrent que le courant électrique et sa polarité à un effet important sur le comportement en frottement du couple cuivre-graphite ce qui détermine sa durée de vie. En effet, ce paramètre a une influence majeure, en particulier sur le processus d'oxydation des surfaces antagonistes. Ainsi, en plus de la chaleur générée par frottement et par effet joule, l'intensité du courant électrique induit un champ électrique à l'interface. Ce champ active l'oxydation du matériau anode et réciproquement, la croissance du film d'oxyde diminue l'intensité du champ électrique. Donc, il y a croissance du film d'oxyde jusqu'à rupture mécanique et/ou électrique (arc électrique) de ce film. Dans certaines situations de fonctionnement, ce film s'adapte bien aux irrégularités du cuivre et le protège contre tout endommagement. Quand le pion est cathode, les résultats montrent que la variation du coefficient de frottement est plus significative qu'avec pion anode [2].

Le transfert du courant électrique à travers le contact crée un champ électrique dont la valeur est proportionnelle à l'intensité du courant et à la résistance électrique de contact [4]. Cette dernière est inversement proportionnelle à la charge normale. Le champ électrique augmente lorsque la charge diminue par conséquent, l'influence du courant sur le comportement en frottement et usage surtout du graphite augmente quand la charge diminue.

D'autre part, la direction du champ de contact est influencée par la vitesse de glissement. En effet, pour de faibles valeurs de cette vitesse, le champ est perpendiculaire au contact. A grande vitesse, le champ a une composante parallèle au plan de glissement [5].

Le taux d'oxydation est contrôlé par la diffusion à travers les couches superficielles. La diffusion à travers la couche d'oxyde dépend de la densité des défauts et de l'intensité du champ électrique de contact. La croissance du film d'oxyde est accompagnée par une diminution du champ électrique de contact et par une montée des contraintes de cisaillement maximales du contact [6,7]. L'épaisseur critique de rupture du film peut avoir lieu soit par cisaillement soit par rupture électrique.

D'autre part, la résistance électrique de contact augmente, μ diminue simultanément, ceci peut s'interpréter par la création sur les surfaces d'un dépôt d'impuretés, probablement un mélange d'oxydes de métal transféré et de particules d'usage provenant des graphites [8], jouant le rôle de lubrifiant. La rupture du film est cyclique et a lieu à partir d'une épaisseur critique caractérisée par une variation de la résistance électrique de contact. Par contre, au moment où μ augmente, on assiste durant cette période, vraisemblablement à une rupture du film d'oxyde (d'où augmentation de μ), par action mécanique et/ou électrique [3] et la mise en contact des surfaces métalliques nues favorise le passage du courant électrique.

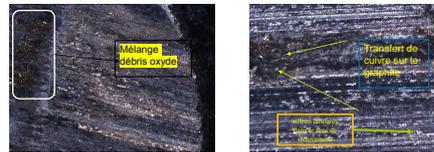


Figure 8: Micrographie optique de la face usée du pion

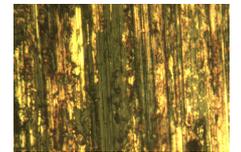


Figure 9: Vue microscopique illustrant Le transfert de graphite.

V. CONCLUSION

Cette étude a permis d'apporter une réponse à certaines questions relatives au frottement d'un contact électrique glissant. Il ressort de cette étude que le passage du courant électrique et sa polarité jouent un rôle majeur dans le comportement en frottement du contact cuivre-graphite.

- la présence du courant électrique, conduit à une diminution du coefficient de frottement.
 - la diminution du coefficient de frottement est plus faible que lorsque le cuivre est anodique.
- Cette dernière est due à la texture de la surface de graphite. En effet, la température de contact augmente de façon très nette, par effet Joule, ce qui accroît le degré d'oxydation et le taux de recouvrement de la surface en formant un film d'oxyde qui s'adapte bien aux irrégularités du substrat et joue le rôle d'un lubrifiant.

VI. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] D. Bekhoucha, A. Bouchoucha, H. Zaidi (2019) « Tribological behavior of a contact pin on cylinder cun7 bronze rubbing against 20mnrc steel in dry sliding with electrical current », Journal of Mechanical Engineering, 16(2), pp 109-128.
- [2] A. Bouchoucha. (1997) « Étude du comportement en frottement et usure des contacts électriques glissants cuivre-acier et cuivre-graphite », Thèse de Doctorat d'état de l'Université Frères Mentouri Constantine1.
- [3] A. Bouchoucha, H. Zaidi, E. K. Kadiri, D. Paulmier (1997) « Influence of electric fields on the tribological behaviour of electrodynamic copper/steel contacts », Wear, 203-204, pp 434-441.
- [4] E. Csapo, H. Zaidi, D. Paulmier, E.K. Kadiri, A. Bouchoucha, F. Robert (1995) « Influence of the electrical current on the graphite surface in an electrical sliding contact », Surface and Coatings Technology 76-77, pp 421-424.
- [5] E. Houkponou, H. Nery, D. Paulmier, A. Bouchoucha and H. Zaidi (1993) « Tribological behaviour of graphite/graphite and graphite/copper couples in sliding electrical contact: influence of the contact electric field on the surface passivation », Applied Surface Science 70/71, pp 176-179.
- [6] Y. Moudaji, (2013) « Effets du courant électrique sur le mécanisme de croissance de la couche d'oxyde à l'interface des contacts électrodynamiques cuivre-graphite et graphite-graphite », Thèse de Doctorat en Sciences, Université Frères Mentouri Constantine1.
- [7] D. Poljanec, M. Kalin, L. Kumar (2018) « Influence of contact parameters on the tribological behaviour of various graphite/graphite sliding electrical contacts », Wear 405-407, pp 75-83.

INFLUENCE DU COURANT ELECTRIQUE ET DE SA POLARITE SUR LE COMPORTEMENT EN FROTTEMENT D'UN CONTACT GLISSANT

D. Bekhouche¹, A. Bouchoucha¹, H. Zaidi², C. Boubechou³

1. Laboratoire de Mécanique, Faculté des Sciences de la technologie, UFMCI, Algérie

2. Institut Pprime UPR3346-IUT, Université de Poitiers, Futuroscope, F-86960, Poitiers, France.

MOTS CLES

Le courant électrique, L'oxydation, La polarité

INTRODUCTION

Dans la vie tribologique, le passage du courant électrique joue un rôle prépondérant dans le comportement en frottement des contacts électriques glissants soit négativement soit positivement. En revanche, divers auteurs [1-2] ont mis en évidence que le courant électrique est un paramètre important qui a une influence significative sur le processus thermique, les phénomènes cinétique-chimiques et les modifications géométriques des matériaux à l'interface des contacts dynamiques. En effet, le processus d'oxydation, et la croissance du film d'oxyde des antagonistes, dépendent de l'intensité du courant électrique et de sa polarité. Ce film d'oxyde joue un rôle primordial et détermine la durée de service des couples électriques glissants [3].

Le but de cet article est de montrer l'influence du courant électrique et de sa polarité sur le comportement en frottement du couple cuivre-graphite. En effet, une approche expérimentale sur des différents échantillons a été réalisée en utilisant des tests de type pion-cylindre.

RESULTATS OBTENUS

Les résultats obtenus (Figure 1), montrent que l'augmentation de l'intensité du courant électrique diminue le coefficient de frottement et semble tendre vers une limite et ce, quelle que soit la polarité du fil.

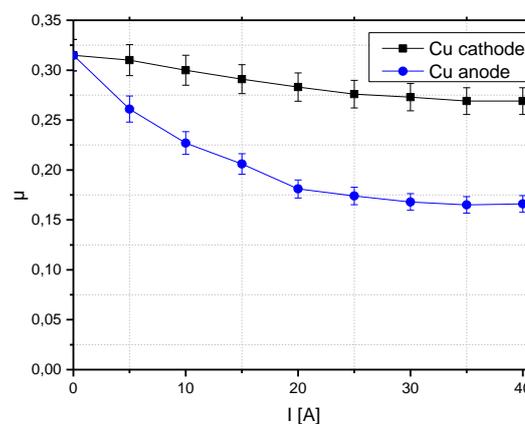


Figure 1: Evolution du coefficient de frottement en fonction de l'intensité du courant : $P = 5N$, $V = 5.6 \text{ m/s}$.

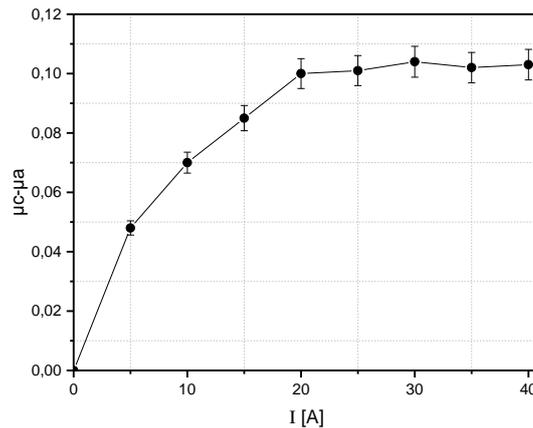


Figure 2: Allure de la différence $\mu_c - \mu_a$ en fonction de I [A].

Néanmoins, la courbe relative au cuivre cathode (μ_c) se situe au-dessus de celle quand le cuivre est anode (μ_a). Cette différence est illustrée par la figure 2 qui montre que la différence ($\mu_c - \mu_a$) en fonction de I semble admettre une asymptote horizontale. Autrement dit, il existe une intensité critique (20 [A]) à partir de laquelle la différence $\mu_c - \mu_a$ est indépendante de I .

CONCLUSION

Il ressort de cette étude que le passage du courant électrique et sa polarité joue un rôle majeur dans le comportement en frottement du contact cuivre-graphite. En effet, la présence du courant électrique, conduit à une diminution du coefficient de frottement.

Cette dernière est due à la texture de la surface de graphite. En effet, la température de contact augmente de façon très nette, par effet Joule, ce qui accroît le degré d'oxydation et le taux de recouvrement de la surface en formant un film d'oxyde qui s'adapte bien aux irrégularités du substrat et joue le rôle d'un lubrifiant.

Références

- [1] D. Bekhouche, A. Bouchoucha, H. Zaidi (2019) « *Tribological behavior of a contact pin on cylinder cusn7 bronze rubbing against 20mncr5 steel in dry sliding with electrical current* », Journal of Mechanical Engineering, 16(2), pp 109-128.
- [2] A. Bouchoucha. (1997) « *Etude du comportement en frottement et usure des contacts électriques glissants cuivre-acier et cuivre-graphite* », Thèse de Doctorat d'état de l'Université Frères Mentouri Constantine1.
- [3] A. Bouchoucha, H. Zaidib, E. K. Kadiri, D. Paulmier (1997) « *Influence of electric fields on the tribological behaviour of electrodynamic copper/steel contacts* », Wear, 203-204, pp 434-441.

INFLUENCE DE LA RUGOSITE INDUITES PAR SABLAGE SUR LE COMPORTEMENT D'UN CONTACT CYLINDRIQUE TRACEUR/GAZODUC

M.BEN ATTIA^{1,2}, J. BESSROUR²

1. Centre de Recherche et d'Innovation (CRI) Groupe Polytech Intl, Rue du Lac d'Annecy, Les Berges du Lac 1053, Tunis, Tunisie

2. Laboratoire de Mécanique Appliquée et ingénierie, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis BP 37, LE BELVEDERE 1002 TUNIS

MOTS CLES

Sablage, contact cylindrique, rugosité, Résistance Thermique de Contact

INTRODUCTION

Le transport efficace du gaz naturel, sur de longue distance à travers des conduites, est une activité essentielle dans le secteur de l'énergie. Cependant, les conduites non enterrées qui transportent le gaz (Gazoduc) peuvent subir une baisse de température (figure 1) qui réduit leur efficacité thermique et affecte leur état de surface [1].



Figure 1 : Gazoduc non enterré subissant une chute de température

Afin de maintenir une température adéquate, le réchauffage par traçage (figure 2) est une technique couramment utilisée qui consiste à installer un traçeur thermique, circulant un fluide de traçage, le long de la conduite. Son rôle est de maintenir la température de surface du gazoduc au-dessus du point de rosée de l'humidité et éviter les dépôts de glace sur sa surface.

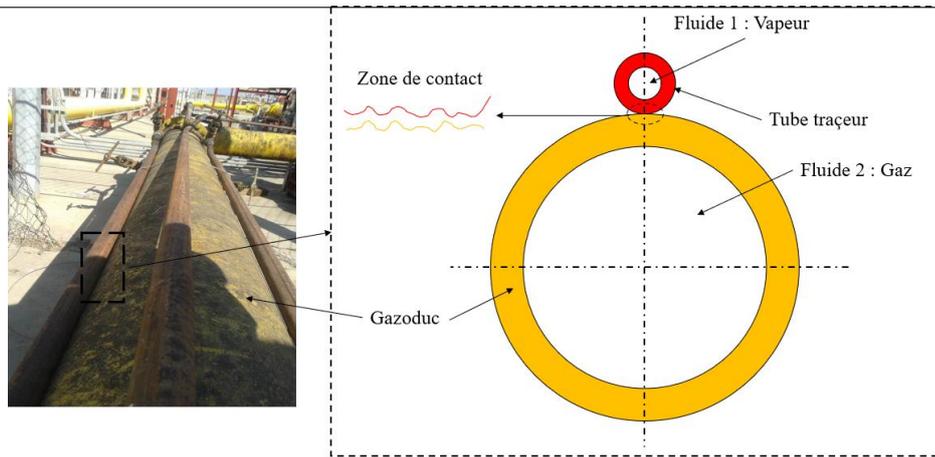


Figure 2 : Installation des tubes traceurs

Cependant, l'utilisation de tubes traceurs peut également entraîner des problèmes de contact entre les tubes traceurs et les conduites traitées par la technique de sablage [2].

Dans cette étude, nous examinons l'influence de la rugosité induite par le sablage sur le comportement dominé par la micro-géométrie induite par sablage des surfaces traceur/gazoduc en contact. L'objectif est d'évaluer l'impact de différentes conditions de sablage sur l'évolution de la résistance thermique de contact entre le traceur thermique et le gazoduc.

Cette étude a été menée à l'aide de simulations numériques réalisées avec le logiciel Abaqus. Les résultats de cette étude peuvent aider à optimiser la conception des systèmes de traçage thermique pour les gazoducs en considérant des matériaux appropriés pour le tube traceur, en contrôlant la pression de contact et en minimisant la rugosité de surface induite par sablage pour améliorer le transfert de chaleur dans le système de traçage thermique.

Références

- [1] H. Xu, Q. Liu et G. Cheng, "Une étude numérique sur la résistance de contact thermique d'un fil traceur sur un tuyau en acier", *Applied Thermal Engineering*, vol. 144, p. 357-368, 2018.
- [2] SF Hejazi, M. Shahidi et M. Ghaemi, "Une nouvelle approche du calcul de la résistance de contact thermique des câbles chauffants dans les gazoducs", *Energy Conversion and Management*, vol. 195, p. 853-862, 2019

Indentation in-situ de mousses polymères en tomographie et modélisation numérique

N. Ben khelil¹, T. Roland^{1,2}, M. Solar^{1,2}, A. Egele¹, D. Favier¹, C. Gauthier¹

1. Institut Charles Sadron, C.N.R.S, Université de Strasbourg, 23 rue du Loess, 67034 Strasbourg

2. INSA de Strasbourg, 24 Bd de la Victoire, 67084 Strasbourg

MOTS CLES

Indentation, Mousses Polymères, Modélisation EF, Loi de comportement, Essais mécaniques

INTRODUCTION

En raison d'une grande versatilité des propriétés mécaniques (raideurs, viscoélasticités) et fonctionnelles (isolation phonique, thermique), les mousses polymères sont appliquées dans de nombreux secteurs industriels tels que le transport, la construction ou encore le médical. Ces matériaux sont particulièrement utilisés dans l'industrie de l'emballage où une protection aux charges ponctuelles ou contondantes doit être assurée et d'une manière générale lorsqu'une résistance aux chocs est nécessaire. Dans ce cadre, la prise en compte des comportements sous sollicitations de contact est d'une importance majeure.

De nombreux modèles constitutifs ont été utilisés pour décrire le comportement à la déformation des mousses polymères. En particulier, les modèles hyperélastiques tels que celui d'Ogden [1] ou de Mooney-Rivlin [2, 3] ou encore le modèle « hyperfoam » [4] sont parmi les plus répandus. Le premier type de modèle a été principalement développé pour l'étude des caoutchoucs avec une notion d'incompressibilité (coefficient de Poisson proche de 0,5), alors que le second type est destiné aux mousses souples compressibles caractérisés par des porosités ouvertes, avec prise en compte de valeurs non nulles du coefficient de Poisson. La définition de ces modèles repose sur l'énergie de déformation élastique et la précision des résultats qu'ils donnent est principalement fonction des conditions d'essais expérimentaux à partir desquels les paramètres des modèles sont extraits par ajustement « fit ».

Dans le cadre de notre étude, un modèle phénoménologique a été utilisé [5, 6]. Prenant en compte l'influence de la densité relative (porosité) comme paramètre principal pour prédire le comportement en compression, nous cherchons à évaluer ses capacités à prédire le comportement en indentation conique pour différentes natures de polymères constitutifs de la mousse.

Pour cela, une technique d'indentation instrumentée réalisée sous tomographie RX est développée et appliquée sur deux natures de mousses de différentes densités : une mousse PVC de 100kg.m^{-3} et une mousse PE de 250kg.m^{-3} . En autres, cette caractérisation expérimentale vise à établir la surface de contact réelle de l'indenteur en fonction de la profondeur d'indentation pour les différents types de mousses étudiées, mais aussi d'analyser les mécanismes de déformation des cellules.

Une modélisation numérique par EF est également développée dans le but de pouvoir comparer les prédictions données par les modèles phénoménologiques avec les résultants expérimentaux, d'abord dans le cadre d'une compression uniaxiale puis dans le cadre d'indentations via des indenteurs coniques de différents angles.

CARACTERISATION EXPERIMENTALE: INDENTATION CONIQUE

Des essais d'indentation conique ont été réalisés sur des échantillons de mousses polymères de différentes densités avec un suivi in-situ en tomographie RX. Ces essais montrent que la porosité a une influence de premier ordre sur l'aire de contact et les mécanismes de déformations observés. La mesure de l'aire de contact et son évolution en fonction de la profondeur d'indentation peut être reliée à l'hétérogénéité de la microstructure de la mousse. Différents angles d'indenteur sont utilisés ($\theta=90^\circ$,

120° et 150°) afin d'explorer une large gamme de déformation et dans le but de solliciter un volume élémentaire représentatif du matériau. Cette technique en indentation instrumentée vise à révéler une corrélation entre le comportement de la mousse sous forme massive, la porosité ainsi que l'évolution des propriétés et comportement en surface. En particulier, l'analyse des indentations en tomographie RX permet de suivre précisément l'évolution des flexions, flambements et la phase de densification des cellules de la mousse. Une corrélation de ces mêmes observations dans le cadre d'une compression simple, nous a permis de remonter à un taux de déformation à des fins de comparaisons avec un modèle EF.

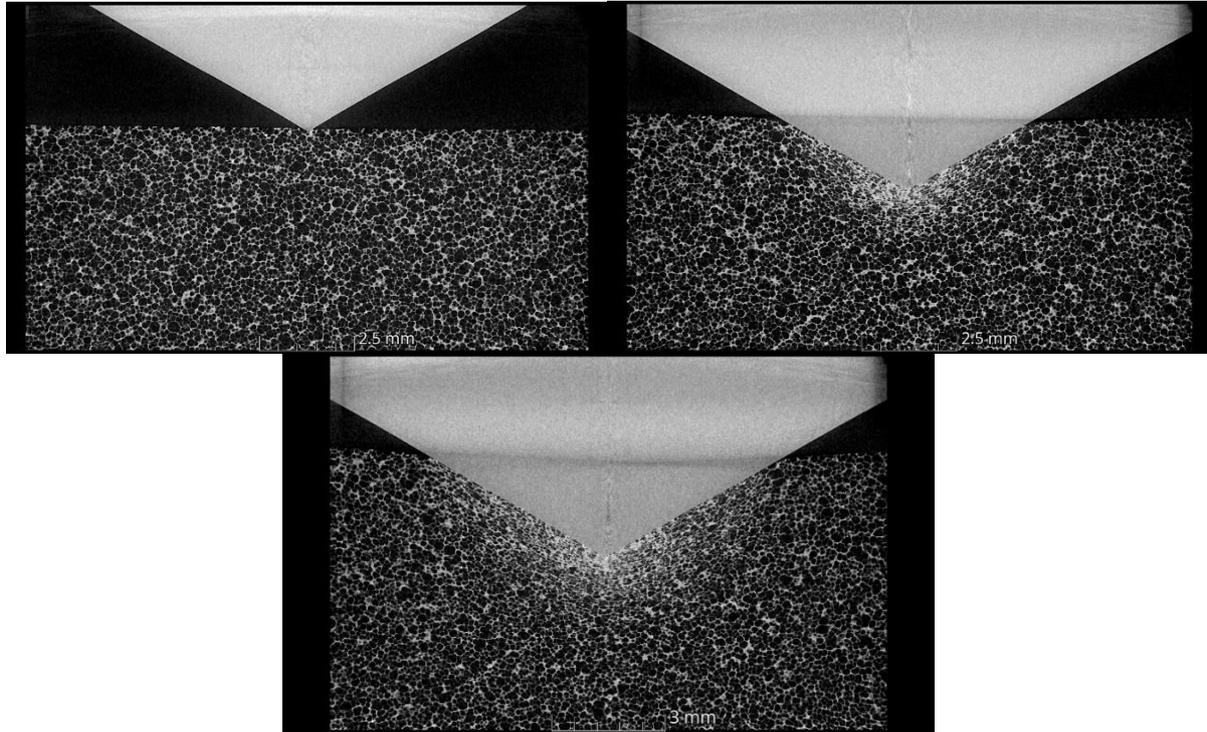


Figure 1 : Visualisation de l'évolution des surfaces de contact ainsi que de l'enfoncement d'un indenteur conique (120°) sur une mousse PE de Porosité 250Kg/m³ au cours d'un test de compression simple

MODELISATION NUMERIQUE EN EF

L'objectif de cette partie est de pouvoir développer un modèle phénoménologique à partir de la connaissance de la densité de la mousse. Le paramétrage de ce modèle est obtenu à partir du dépouillement d'un essai de compression uniaxiale sur la mousse considérée. Il permet ensuite de prédire le comportement de mousses de différentes densités (de même nature matériau).

Cinq paramètres constituent ce modèle dont trois sont dépendants de la densité. Les deux autres paramètres sont indirectement reliés à la densité selon les lois développées par L.J. Gibson et M. Ashby sur les matériaux cellulaires [7]. Ils sont identifiés à partir de la mesure du module élastique, du plateau de contrainte et de la déformation à la densification, étapes caractéristiques des déformations observées pour un matériau mousse lors d'une compression. Chaque paramètre a un sens physique et agit sur une région particulière de la courbe caractéristique contrainte-déformation.

Une fois le modèle paramétré, il est démontré que la courbe contrainte-déformation en compression peut être prédite pour une mousse donnée à partir de la seule connaissance de sa densité.

L'étape suivante de cette étude a consisté à implémenter cette loi phénoménologique dans un code de calcul éléments finis afin de simuler des essais d'indentation conique. Une comparaison des résultats

numériques du modèle d'indentation avec les tests expérimentaux précédemment effectués est réalisée. L'analyse repose sur une mesure expérimentale/numérique de l'aire de contact réelle et des champs de déformations sous indenteur pour une mousse PVC de densité de 100kg.m^{-3} et pour une mousse PE de densité de 250kg.m^{-3} .

CONCLUSION

Le modèle de comportement mécanique des mousses proposé dans le cadre de cette étude à l'avantage de reposer sur un paramètre mesurable simple qui est celui de la porosité associé à la connaissance d'un résultat d'un essai de compression. Une fois le modèle paramétré, la prédiction du comportement en compression pour une large gamme de densités de mousse est possible. Une extension de ce modèle est étudiée afin de prédire la courbe force-déplacement en indentation avec comme principale donnée d'entrée la densité de la mousse. Pour cela, une analyse des champs de déformations sous indenteur en tomographie RX comparés à ceux obtenus via un modèle EF est réalisée.

Références

- [1] RW. Ogden (1972) « Large deformation isotropic elasticity—on the correlation of theory and experiment for incompressible rubberlike solids», Proc Roy Soc Lond A, 326, 565–84.
- [2] M. Mooney (1940) «A theory of large elastic deformation». J Appl Phys, 11, 582–92.
- [3] Rs. Rivlin (1948) « Large elastic deformations of isotropic materials. I. Fundamental concepts». Phil Trans Roy Soc Lond, 240, 459–90.
- [4] C. Briody, B. Duignan, S. Jerrams, J.Tiernan (2012) «The implementation of a visco-hyperelastic numerical material model for simulating the behaviour of polymer foam materials». Comput Mater Sci, 64,47–51.
- [5] F. Saint-Michel, L. Chazeau, J.V. Cavaillé, E. Chabert (2006) «Mechanical properties of high-density polyurethane foams: I. Effect of the density», Composites Science and Technology, 66, 2700-2708.
- [6] M. Avalle, G. Berlinggardi, A. Ibba (2007) «Mechanical models of cellular solids: Parameters identification from experimental tests », International Journal of Impact Engineering, 34, 3-27.
- [7] L.J. Gibson, M.F. Ashby (1997) «Cellular Solids: Structure and Properties», Cambridge University Press, Cambridge.

OPTIMISATION DES CONDITIONS DE GENERATION DE LA LUBRIFICATION ELECTROCHIMIQUE DES ACIERS INOXYDABLES

K. Bouguerra¹, C. Richard¹, Y-M. Chen², N. Ducommun³, A. Romaine³, P-F Cardey³

1. Université de Tours, GREMAN - UMR CNRS 7347, Tours / France

2. Centre Technique des Industries Mécaniques, Cetim, Senlis / France

3. Centre Technique des Industries Mécaniques, Cetim, Nantes / France

MOTS CLES

Acier inoxydable, Tribo-électrochimie, Film passive.

INTRODUCTION

Dans la majorité des cas de lubrification, il est prévu que les surfaces de frottement soient complètement séparées par un film de lubrifiant. Cependant, dans certaines industries comme l'industrie agroalimentaire, l'utilisation de lubrifiants et aussi de détergents pour la propreté des chaînes de production doivent être particulièrement choisis pour des raisons de sécurité alimentaire. La génération ou le développement de films passifs, en particulier sur des matériaux métalliques type aciers inoxydables peut amener à une lubrification électrochimique permettant d'obtenir des coefficients de frottement peu élevés contrairement à un contact à sec.

Dans ce contexte, l'objectif de ce travail est d'explorer les conditions optimales de la lubrification électrochimique des aciers inoxydables austénitiques dans un milieu alcalin à base d'hydrogénocarbonate de sodium (NaHCO_3) ou nom commercial : « bicarbonate de soude », afin d'optimiser ou de préconiser des routines de nettoyage durables, éco-compatibles, des équipements de production. Les paramètres telles que la fréquence, la charge et la concentration du lubrifiant ont été étudiés pour évaluer leur impact sur les propriétés tribologiques et chimiques de la surface de l'acier inoxydable.

PROCEDURE EXPERIMENTALE

Afin de cerner les conditions d'obtention de lubrification électrochimique, un plan d'expérience a été réalisé. Ainsi, des essais de tribo-corrosion ont été mis en œuvre en couplant un tribomètre TE-77 (mesure du coefficient de frottement) avec un potentiostat Biologic (mesure du potentiel à circuit ouvert - : OCP – Open Circuit Potential) – Figure 1. La fréquence, la charge appliquée et la concentration du milieu alcalin environnant ont été balayées. Le contact est de type bille-plan en mouvement réciproque.

Dans un premier temps, une première série d'essai a été faite sur le couple 316L/316L dans NaHCO_3 5%, en appliquant une charge constante, à température ambiante, en variant la fréquence.

Dans un second temps, une autre série d'essai de tribo-corrosion du couple 316L/316L a été effectuée en appliquant une charge constante, à température ambiante en variant la concentration massique de la solution.

Toutes les mesures ont été faites pour une durée de 1000 secondes en corrosion (mesure du potentiel), 1000 secondes en tribologie (mesure du coefficient de frottement en fonction du temps).

Dans un dernier temps, une analyse physico-chimique par MEB-EDS, Raman, AFM-TUNA, FIB a été mise en œuvre et a permis d'obtenir des informations sur la nature, et la morphologie des couches d'oxydes formées sur les aciers inoxydables de type 316L dans le NaHCO_3 . Une comparaison des différents échantillons soumis à différentes fréquences, a permis d'étudier l'effet de la vitesse sur la lubrification de ces aciers.

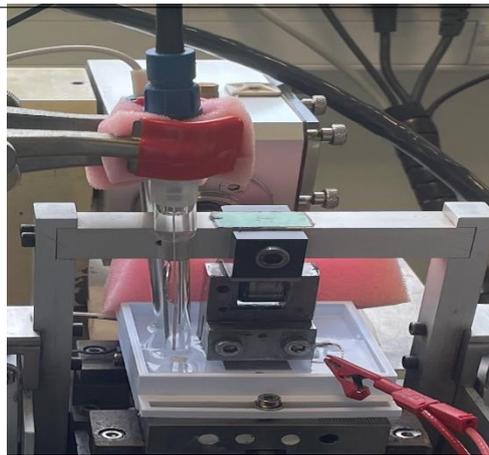


Figure 1 : essai de tribo-corrosion.

PARTIE RESULTATS ET DISCUSSION

La figure 2 présente les résultats de l'essai de tribo-corrosion en mouvement alternatif d'un couple de billes/plan en acier inoxydable (316L/316L) dans une solution de NaHCO_3 . Les graphiques montrent l'évolution du potentiel et du coefficient de frottement au fil du temps. Il a été observé que le coefficient de frottement diminuait avec une augmentation correspondante du potentiel. Au début de l'essai, le potentiel était stable à $-0,1\text{V}/\text{Ag}/\text{AgCl}$, ce qui correspond à l'état passif de l'acier inoxydable. Cependant, dès le début de l'essai, le potentiel a chuté à environ $-0,6\text{V}/\text{Ag}/\text{AgCl}$, indiquant un état non-passif. Ceci peut être expliqué par l'enlèvement de la couche d'oxyde de chrome. Lorsque le coefficient de frottement a diminué, le potentiel a de nouveau augmenté à $-0,4\text{V}/\text{Ag}/\text{AgCl}$. Deux hypothèses ont été avancées pour expliquer ce phénomène : soit il y a eu une étape intermédiaire entre l'état passif initial et la chute du potentiel, soit l'action de la bille a enlevé une couche qui a modifié le film passif (effet de carbonate). Après la fin de l'essai tribologique, le potentiel a repris presque sa valeur initiale, ce qui indique la reformation de la couche passive en suivant l'OCP.

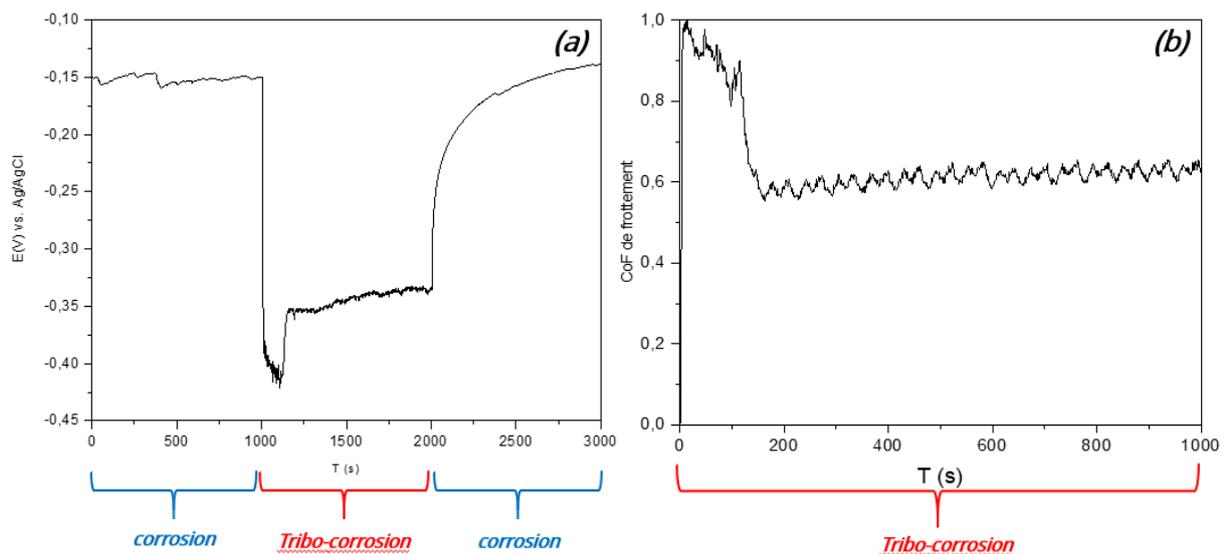


Figure 2 : essai de tribo-corrosion du couple 316L/316L dans NaHCO_3 . (a) mesure de potentiel à circuit ouvert avant, pendant et après l'essai tribologique, (b) essai tribologique - coefficient de frottement.

La Figure 3 présente une coupe transversale de la piste usée dans le NaHCO_3 , obtenue par FIB. Cette image révèle l'apparition d'une couche, constituée principalement de Fe, Cr et Ni, selon l'analyse spectrale de l'EDS.

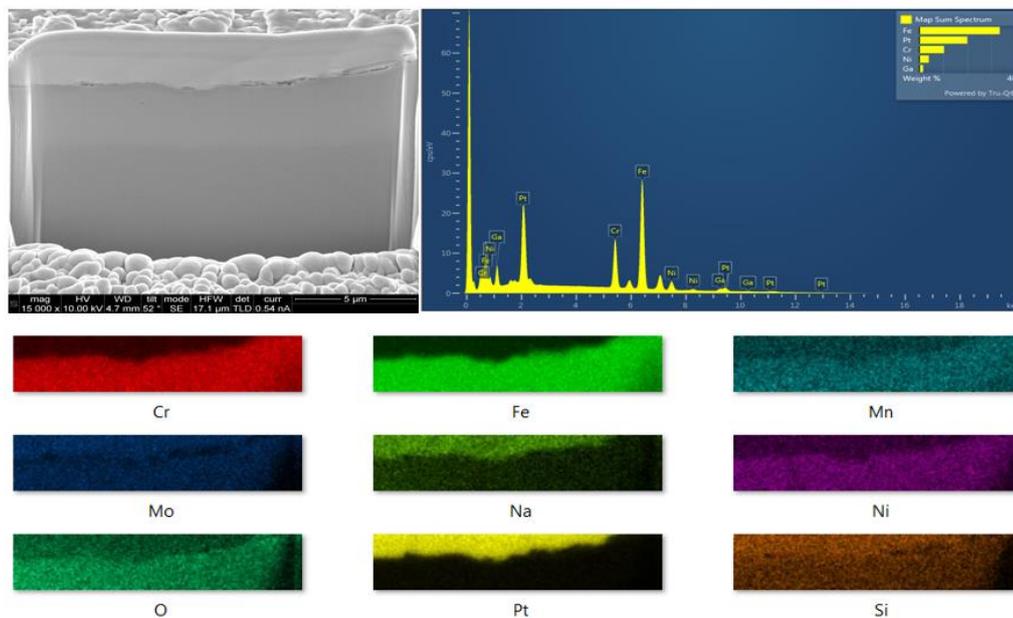


Figure 3 : Observation de la coupe transversale du centre de la piste usée dans NaHCO_3 .

CONCLUSION

En conclusion, les résultats des essais de tribo-corrosion sur le couple 316L/316L dans NaHCO_3 ont montré des variations significatives de l'OCP et du coefficient de frottement en fonction de la fréquence d'essai. Il a été révélé que le régime de lubrification a été atteint instantanément à de faibles fréquences, alors qu'à de grandes vitesses, il y avait un effet tribologique plus important que l'effet de corrosion.

Les résultats de l'analyse physico-chimique ont montré une faible conductivité électrique, une répartition plus ou moins homogène selon la fréquence appliquée, ainsi que la présence d'oxydes/hydroxydes de fer, de chrome, de nickel et de carbonates.

Ces résultats fournissent des informations importantes pour comprendre les mécanismes tribo-corrosifs des aciers inoxydables dans des environnements alcalins corrosifs et aideront à optimiser le processus de nettoyage pour les applications industrielles.

USURE ET TOPOGRAPHIE DES SURFACES

N. Brunetière¹

1. Institut Pprime, CNRS, Université de Poitiers, Ensma, noel.brunetiere@univ-poitiers.fr

MOTS CLES

Usure, rugosité, modèle analytique

INTRODUCTION

Après une phase de rodage, les surfaces d'un contact frottant sont le siège d'un régime d'usure normale que l'on peut décrire par un modèle simple comme celui proposé par Archard [1]. Dans cette phase d'usure normale, bien que les surfaces soient renouvelées au cours du temps, les propriétés statistiques des surfaces sont stables. Il semble que l'état de surface de ce régime stable ne soit pas dépendant de la topographie initiale des surfaces [2]. Dans ce travail, un modèle analytique simple est proposé pour décrire le phénomène d'évolution de la topographie vers un régime stable.

MODÈLE ANALYTIQUE

Nous ferons l'hypothèse que le contact entre les surfaces en mouvement relatif peut être décrit par le modèle simplifié de Greenwood et Williamson [3] où la distribution des sommets des aspérités est exponentielle. Dans ce cas, il est possible d'exprimer la pression moyenne de contact qui est constante et d'exprimer analytiquement le travail élastique. Le rapport entre la pression moyenne de contact et la dureté peut s'exprimer au moyen du critère de plasticité introduit par Greenwood et Williamson :

$$\psi = \frac{E'}{2H} \sqrt{\frac{\sigma}{R}} \quad (\text{Equation 1})$$

où E' est le module élastique équivalent, H la dureté des matériaux, R le rayon de courbure des aspérités et σ l'écart type des hauteurs des sommets. Si ce nombre augmente, le risque de déformation plastique des sommets augmente. Il se traduit par un aplatissement des sommets, soit une réduction de la hauteur des aspérités. Il est possible de comparer le travail des forces adhésives W_{ad} au travail des forces élastiques W_{el} dans le contact. On suppose que l'adhésion est proportionnelle à l'aire réelle de contact. Il vient alors :

$$\kappa = \frac{W_{ad}}{W_{el}} = \frac{w_{ad}}{E'} \sqrt{\frac{R}{\sigma^3}} \sqrt{32\pi} \quad (\text{Equation 2})$$

Ici, w_{ad} est le travail d'adhésion par unité de surface. Ce rapport correspond à $\kappa \approx 5/\alpha$ où α est l'index d'adhésion proposé par R. Gras [4]. Plus κ est élevé, plus le risque d'adhésion est grand. L'adhésion se traduit par un arrachement de matière et donc une augmentation de la hauteur des aspérités. Il est alors possible de construire un modèle évolutif de l'état de surface semblable à celui proposé par Nosonovsky [5]. Nous retenons le paramètre Sq pour décrire la hauteur quadratique des aspérités. Il vient :

$$\dot{Sq} = -a\psi + b\kappa \quad (\text{Equation 3})$$

où a et b sont des coefficients empiriques. En utilisant les relations proposées par Whitehouse et Archard [6], on peut relier R et σ à Sq et Sal , la longueur d'auto-corrélation. On obtient alors une équation différentielle en Sq qui présente une solution analytique, si on suppose que la longueur d'auto-corrélation ne varie pas durant la phase d'usure. On montre que :

$$Sq = \left[(Sq_0^3 - Sq_\infty^3) e^{-\frac{t}{\tau}} + Sq_\infty^3 \right]^{1/3} \quad (\text{Equation 4})$$

avec la constante de temps :

$$\tau = \frac{2HSal}{3aE'} \quad (\text{Equation 5})$$

et la rugosité finale :

$$Sq_{\infty} = \left(\frac{\beta}{\alpha}\right)^3 = \left(\frac{2bw_{ad}HSal^2}{aE'^2}\right)^{1/3} \quad (\text{Equation 6})$$

et Sq_0 la rugosité initiale.

RÉSULTATS

Le modèle établi montre qu'il existe un état final de rugosité qui dépend des propriétés des matériaux et résulte de la compétition entre les déformations élastiques et l'usure adhésive (équation 6). La rugosité finale est indépendante de l'état de surface initial. La constante de temps est pilotée par les effets plastiques (équation 5). En supposant que $Sq \propto Sa$, il est possible de comparer le modèle aux résultats expérimentaux de Pham-Ba et Molinari [2]. La figure 1 montre que le modèle permet reproduire globalement l'évolution de l'état de surface observée dans [2]

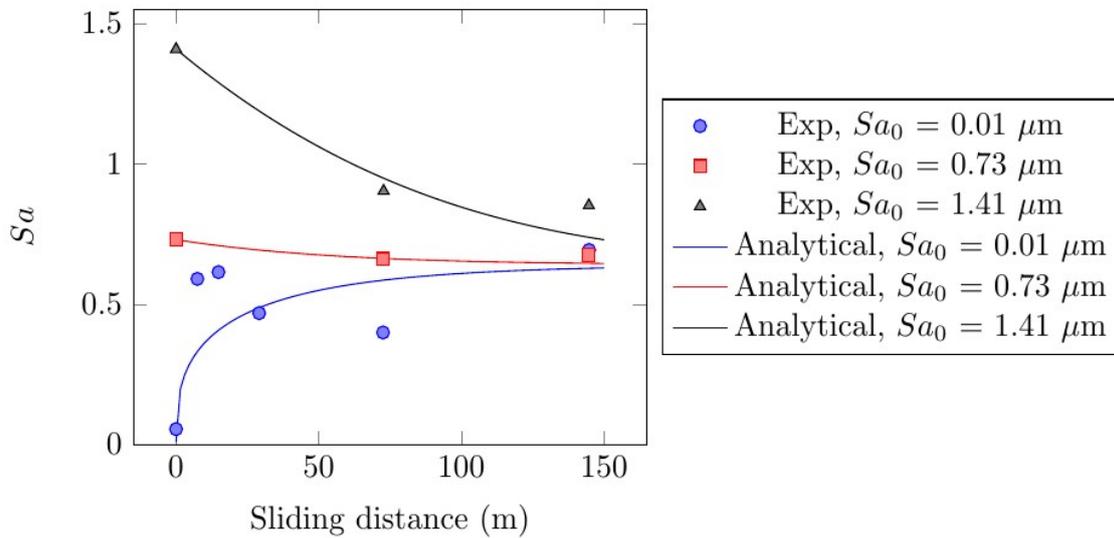


Figure 1: Comparaison avec les résultats expérimentaux [2]. $\tau = 50 \text{ m}$ et $Sq_{\infty} = 0.64 \mu\text{m}$.

CONCLUSION

Un modèle simple basé sur la loi de contact de Greenwood et Williamson, un critère de plasticité et un critère d'adhésion conduit à une loi décrivant l'évolution de l'état de surface pendant la phase de rodage. Le modèle montre que l'état atteint est indépendant de la hauteur initiale des aspérités et dépend des propriétés des matériaux.

Remerciements

Ce travail s'inscrit dans les programme FRANCE 2030 LABEX INTERACTIFS, reference ANR-11-LABX-0017-01 and EUR INTREE, ANR-18-EURE-0010.

Références

- [1] J. F. Archard (1953) « *Contact and Rubbing of Flat Surfaces* », Journal of Applied Physics, **24**, pp. 981–988.
 [2] S. Pham-Ba, J.-F. Molinari (2021) « *Creation and evolution of roughness on silica under unlubricated wear* », Wear, **472-473**, p. 203648.

-
- [3] J. A. Greenwood, J. B. P. Williamson (1966) « *Contact of Nominally Flat Surfaces* », Proceedings of the Royal Society (London), **A295**, pp. 300–319.
- [4] R. Gras (2008) « *Tribologie - Principes et Solutions Industrielles* » Paris: Dunod.
- [5] M. Nosonovsky (2010) « *Entropy in Tribology: in the Search for Applications* », Entropy, **12**, pp. 1345–1390.
- [6] D. J. Whitehouse, J. Archard (1970) « *The properties of random surfaces of significance in their contact* », Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences, **316** (1524), pp. 97–121.

PERFORMANCE ET FIABILITE DES ALLIAGES METALLIQUES AMORPHES BASE CU-ZR POUR DES APPLICATIONS TRIBOLOGIQUES

S. BARLEMONT¹, G. COLAS², P-H. CORNUAULT¹, P. LAFFONT³, R. DAUDIN³, et A. LENAIN⁴

1. SUPMICROTECH, Université de Franche-Comté, CNRS, Institut FEMTO-ST, 25000 Besançon, France
2. Université de Franche-Comté, CNRS, Institut FEMTO-ST, 25000 Besançon, France
3. Univ. Grenoble Alpes, CNRS, SIMaP, 38402 Saint-Martin d'Hères, France
4. Vulkam Inc. Amorphous metal micro casting, 38610 Gières, France

MOTS CLES

Alliages Métalliques Amorphes, contreface, environnement, troisième corps, micromécanique

INTRODUCTION

Les alliages métalliques amorphes (AMA) sont des alliages métalliques de composition complexe fabriqués par un processus de refroidissement rapide depuis l'état liquide, de manière à obtenir un matériau à l'état solide qui présente la structure d'un verre. Les AMA ont un fort potentiel d'applications industrielles en micromécanique en raison de leurs excellentes propriétés mécaniques [1] (en particulier une limite élastique et une déformation élastique élevées), combinées à un très faible retrait et une excellente résistance à la corrosion. Un certain nombre d'études s'intéressent en particulier à la fabrication de micro-engrenages en AMA [2]. Cependant, les domaines micromécaniques ciblés requièrent des considérations tribologiques, en raison du rôle important du frottement et de l'usure aux micro-échelles.

MATERIAUX ET METHODES

La présente étude vise à étudier les performances des AMA en matière de frottement et d'usure en vue d'applications industrielles futures dans le domaine des micro-mécanismes. Des AMA base Cu-Zr ont été choisis pour la combinaison de leur bonne formabilité (Glass Forming Ability, GFA) et de leurs bonnes propriétés mécaniques, en particulier leur ductilité. Diverses configurations expérimentales ont été exploitées afin d'explorer le comportement tribologique des AMA base Cu-Zr de manière représentative à l'échelle macroscopique. Tout d'abord, des configurations de glissement et de roulement ont été utilisées avec des conditions de contact variables. De plus, les conditions environnementales ont été prises en compte et plus particulièrement l'impact de l'humidité relative (RH). Enfin, des frotteurs de matériaux différents (laiton, bronze, aciers) ont été utilisés pendant les essais, afin d'analyser l'impact de la nature de la contreface et d'identifier les contre-matériaux prometteurs d'un point de vue tribologique.

Pendant les essais de frottement, le coefficient de frottement (COF) a été calculé en considérant l'énergie dissipée par cycle de frottement, et les volumes d'usure ont été mesurés après frottement sur les deux contrefaces à l'aide d'un microscope optique à focale variable. Une compréhension approfondie des mécanismes d'usure et des réactions tribochimiques a été élaborée par rugosimétrie 3D, microscopies optique et électronique à balayage (MEB), analyses EDS et XPS.

RESULTATS ET DISCUSSION

Les résultats mettent en évidence une grande répétabilité des essais de frottement réalisés avec les AMA, ainsi qu'une large gamme de COF et de taux d'usure qui dépendent fortement du contre-matériau et des conditions de contact.

Contrairement à une majorité de matériaux (dont les métaux traditionnels et les céramiques), la dureté n'a pas un rôle prépondérant sur l'usure des AMA, comme le suppose la loi d'Archard. En revanche, cette étude montre un impact déterminant des réactions tribochimiques sur le comportement tribologique des AMA. Le COF et l'usure sont le résultat de phénomènes de transferts de matière, résultant en l'établissement d'un troisième corps dans le contact. La présente étude montre que ce transfert de matière est fortement dépendant du film d'oxydes natifs à la surface de l'AMA (majoritairement composé de ZrO_2 et CuO), et des oxydes provenant de la contreface (par exemple le Fe_2O_3 pour une contreface en acier AISI 52100, ou le ZnO pour une contreface en laiton) (Figure 1a) [3]. Un second résultat majeur de cette étude concerne l'importance de l'humidité relative (RH) de l'air ambiant sur le contact tribologique [4]. En effet, le COF diminue de 0,95 à 0,55 pour une RH passant de 20% à 80% lors d'essais de frottement de plaques en AMA contre des billes en acier AISI 52100 (Figure 1b). Cette dépendance à l'humidité s'explique par des changements de morphologie du 3^{ème} corps issu de la bille en acier par transfert de matière : en environnement sec, le 3^{ème} corps est rugueux et éparse, tandis qu'en environnement humide, le 3^{ème} corps est lisse et compact. La résistance à l'usure de l'AMA est ainsi améliorée lorsque RH est élevée.

Cette étude met donc en évidence la possibilité d'optimiser le comportement tribologique des AMA pour une application spécifique en fonction du matériau antagoniste et des conditions environnementales.

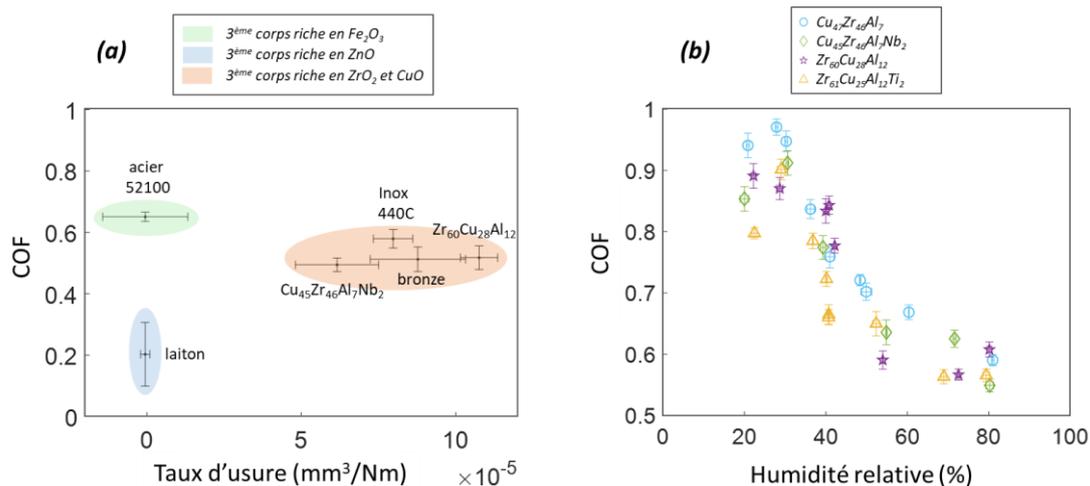


Figure 1 : Taux d'usure et COF pour des essais de glissement bille-plan impliquant des plaques en AMA $Cu_{45}Zr_{46}Al_7Nb_2$ et des billes de différents matériaux (identifiés sur le graphe), avec indication de la composition du 3^{ème} corps dans la trace d'usure de la plaque (a). Evolution du COF en fonction de l'humidité relative de l'air ambiant pour différents AMA frottant contre des billes en AISI 52100 (b).

REFERENCES

- [1] A.L. Greer (2009) « *Metallic Glasses... On the threshold* », *Materials Today*, **12** (1-2), pp. 14-22.
- [2] A. Inoue, B. Shen, A. Takeuchi (2006) « *Fabrication, properties and applications of bulk glassy alloys in late transition metal-based systems* », *Materials Science and Engineering*, **441**, pp. 18-25.
- [3] S. Barlemont, G. Colas, A. Lenain, P-H. Cornuault (2023) « *Effect of the counter material on the tribological behavior of $Cu_{45}Zr_{46}Al_7Nb_2$ bulk metallic glass* », *Wear*, article in press.
- [4] S. Barlemont, P. Laffont, R. Daudin, A. Lenain, G. Colas, P-H. Cornuault (2023) « *Strong dependency of the tribological behavior of $CuZr$ -based bulk metallic glasses on relative humidity in ambient air* », *Friction*, **11** (5), pp. 785-800.

Développement de nouveaux alliages base Nickel pour des applications tribologiques sous hautes températures: effet de la microstructure

S. Baydoun¹, S. Fouvry^{1*}, G. Guillonau¹, J.C. Pereira², F. Santos³, P.L. Ruiz⁴, J. Vega⁴, J. Rocchi⁵

¹Ecole Centrale de Lyon, LTDS Laboratory, 36 av Guy de Collongue, 69130 Ecully, France

²LORTEK Technological Centre, Basque Research and Technology Alliance BRTA, Gipuzkoa, Spain

³AZTERLAN Metallurgy Research Centre, 6, 48200 Durango, Bizkaia, Spain

⁴CIDETEC, Paseo Miramon, Miramon Pasealekua, 196, 20014 Donostia-San Sebastian, Gipuzkoa, Spain

⁵LIEBHERR Aerospace Toulouse SAS, Toulouse, France

* Auteur pour correspondance: siegfried.fouvry@ec-lyon.fr

Mots clefs: usure; hautes températures, fabrication additive, Alliages NiCrSiB, Inconel718.

INTRODUCTION

De nombreux composants aéronautiques soumis à des sollicitations de fretting /reciprocating sous hautes températures sont réalisés à partir d'alliages base Cobalt (Stellite 6). Le Cobalt est un métal rare, cher et polluant à extraire. L'objectif de cette étude est d'étudier les performances tribologiques de nouveaux alliages à base Nickel obtenus par fabrication additive pour remplacer le cobalt dans les composants aéronautiques. Deux nouveaux alliages NiCrSiFeB, ayant des microstructures différentes, sont soumis à des sollicitations de frottement «reciprocating» pour des températures comprises entre 25°C et 650°C. Le comportement tribologique de ces nouveaux matériaux est comparé à un alliage référence Stellite 6.

1. DEMARCHE EXPERIMENTALE

Un nouvel alliage base de nickel dit « C » (at% : Ni: 77%, Cr: 12.51%, Si: 3.73%, Fe: 4.04%, B: 2.42%, C:0.45%) est élaboré à partir de deux procédés différents. Un procédé LMD (Laser metal deposition) donne lieu à une microstructure fine dite C-LMD. Un second procédé dit GC (Gravity casting) impliquant des plus hautes températures et une durée de refroidissement plus longue donne lieu à une microstructure « grossière » avec une matrice biphasée dont l'une dite « segregation matrix » présente une forte concentration de silicium [16%]. Ces deux alliages ainsi que la référence Stellite 6 sont testés contre un cylindre Inconel revêtu d'un dépôt CrC-Ni. La géométrie de contact consiste en une configuration de cylindres croisés testée à l'aide d'un banc de fretting-reciprocating haute température [1]. Les variables mesurées sont l'effort normal P (N), le déplacement relatif δ (μm), l'effort tangentiel Q (N), l'amplitude de glissement δ_s ($\pm\mu\text{m}$) mesurée sur le cycle Q - δ quand $Q=0$, ainsi que l'aire du cycle E_d (J) de fretting qui correspond à l'énergie de frottement dissipée dans le contact. Des analyses Portmortem sont réalisées à l'aide d'observations optiques, des profils 3D pour la mesure du volume d'usure ainsi que des observations SEM et EDX de façon à établir les scénarios d'endommagement.

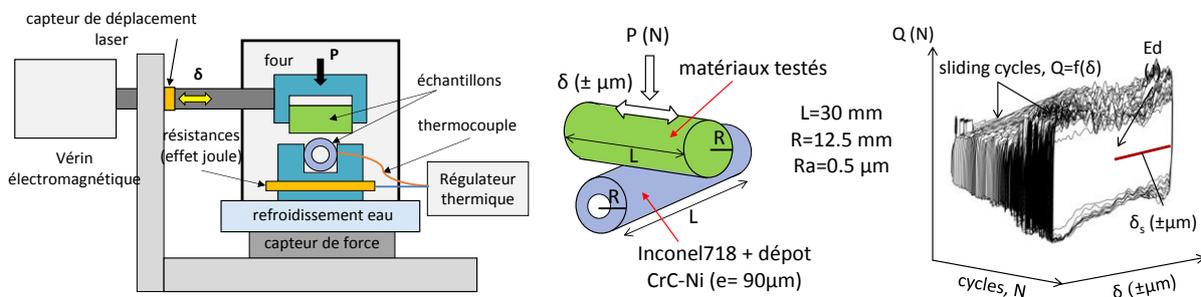


Fig. 1 : illustration de la démarche expérimentale (contact cylindres croisés & analyse des conditions de glissement (fréquence fixée à $f = 20$ Hz).

2. RESULTATS

Une première étude est réalisée en imposant un effort normal de $P = 23\text{N}$, une amplitude de glissement de $\delta_s = 450 \pm \mu\text{m}$ (condition reciprocating car $\delta_s > \text{rayon de contact}$), une durée d'essai de $2 \cdot 10^5$ cycles et en faisant varier la température entre 25 et $650\text{ }^\circ\text{C}$. On observe un comportement non monotone similaire à celui décrit par Dreano et al. [1]. Entre 25 et $300\text{ }^\circ\text{C}$ tous les contacts montrent une augmentation de l'usure liée à l'activation de processus de tribo-oxydation. Cependant, au-delà de $300\text{ }^\circ\text{C}$ on observe une évolution différente entre les contacts. Le stellite 6 et l'alliage C-GC parviennent à former une couche protectrice Glaze Layer (GL). Les propriétés rhéologiques de ce troisième corps permettent de réduire considérablement la cinétique d'usure [1]. En revanche l'alliage C-LMD donne lieu à une usure adhésive induisant une dégradation importante de l'interface.

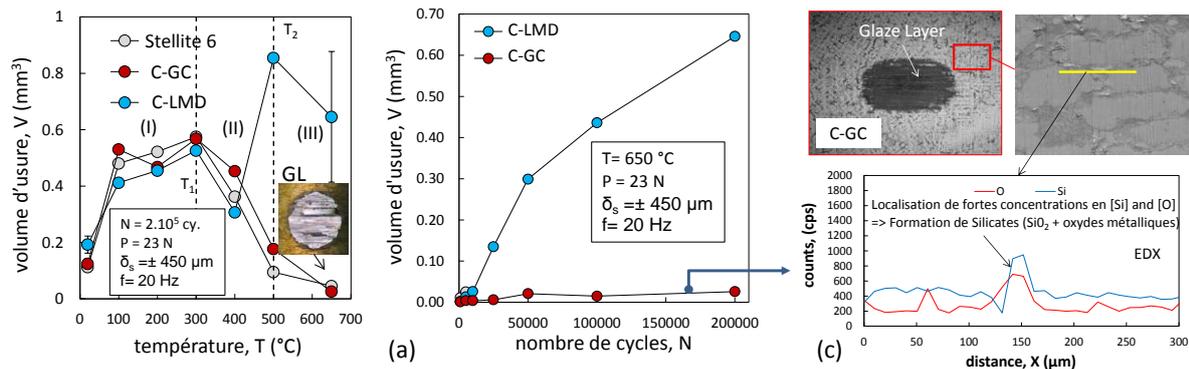


Fig. 2 : (a) Comportement tribologique des alliages étudiés ; (b) Effet de la microstructure vis-à-vis de la formation des Glaze Layers sur l'alliage C-GC (formation de dépôts de silicates activateurs des GL).

Ce comportement est confirmé par l'étude de l'évolution de l'usure à $650\text{ }^\circ\text{C}$. On observe pour l'alliage C-GC un comportement bilinéaire. Après la formation très rapide de la Glaze Layer (< 5000 cycles) l'usure n'augmente plus donnant lieu à une cinétique d'usure quasi nulle. En revanche pour la microstructure C-LMD l'usure est continue et donne lieu à des dégradations significatives.

3. CONCLUSION

La plupart des travaux publiés dans la littérature suggèrent que la formation de la couche protectrice GL à haute température est principalement liée à la composition de l'alliage et en particulier à la présence du Cobalt [1,2]. Ce dernier présente un coefficient de diffusion très élevé qui favorise le processus de « thermo-frittage » des débris oxydes pour gérer les Glaze Layers. Ce travail montre que la microstructure est aussi un paramètre très important. Une hypothèse avancée serait que la microstructure C-GC, qui présente des phases riches en silicium favorise sous hautes températures la ségrégation en surface de dépôts de silicates (SiO_2 + oxydes métalliques (Fig. 2c)). Ces ségrégations de silicates ne sont pas observées sur l'alliage C-LMD. Des travaux antérieurs (Viat et al [3]) montrent que la présence de silicates dans une interface favorise la formation de Glaze Layers protectrices et réduit en conséquence la cinétique d'usure. Ainsi, le procédé de « Gravity casting » en favorisant la formation d'une « segregation matrix » très riche en silicium permet la ségrégation sous hautes température de dépôts de silicates en surface qui in fine favoriseront la formation de Glaze Layers protectrices.

REFERENCES

- [1] A. Dreano, S. Fouvry, G. Guillonneau, Understanding and formalization of the fretting-wear behavior of a cobalt-based alloy at high temperature, *Wear*. 452–453 (2020) 203297. doi:10.1016/j.wear.2020.203297.
- [2] A. Viat, A. Dreano, S. Fouvry, M. I. De Barros Bouchet, J. F. Henne, Fretting wear of pure cobalt chromium and nickel to identify the distinct roles of HS25 alloying elements in high temperature glaze layer formation, *Wear* 376–377 (2017) 1043–1054
- [3] A. Viat, S. Fouvry, M.-I. De Barros Bouchet, L. Pin, Influence of carbon-based solid lubricant on fretting wear response for alumina-based ceramics versus cobalt superalloy contact, *Surface & Coatings Technology* 284 (2015) 327–333.

INFLUENCE DES PARAMETRES FONCTIONNELS SUR LE COMPORTEMENT TRIBOLOGIQUE DES COUPLES DYNAMIQUES CUIVRE-ACIER ET LAITON-ACIER

C. Boubouchou¹, H. Zaidi², A. Bouchoucha³

¹ Faculté de Technologie, Département de Génie Mécanique, Université 20 Août 1955, Skikda 21000, Algérie, E-mail: choubela_boubouchou@yahoo.fr

² Institut Pprime UPR3346-IUT, Université de Poitiers, Futuroscope, F-86960, Poitiers, France, E-mail: hamid-zaidi@univ-poitier.fr

³ Laboratoire de Mécanique, Campus Chaabot-Ersas, Faculté des Sciences de Technologie, Université Mentouri, Constantine 25000, Algérie

E-mail: bouchoucha_ali1@yahoo.fr

Les 34èmes Journées Internationales Francophones de Tribologie auront lieu à Lille du 31 mai au 2 juin 2023.



Résumé

Ce travail porte sur l'influence des facteurs fonctionnels sur le comportement en frottement et usure des couples tribologiques cuivre-acier et laiton-acier. Pour ce faire, on a effectué des essais sur le frottement et l'usure en utilisant un tribomètre pion-disque, dans une ambiance atmosphérique. Il s'agit d'un pion tantôt en cuivre tantôt en laiton frottant à sec contre un disque tournant en acier. Afin d'évaluer les contraintes mécaniques et les déformations à l'interface des couples; un code numérique Comsol Multiphysics a été utilisé.

Les résultats obtenus, montrent que les paramètres sus-cités ont une influence significative sur le comportement tribomécanique des deux couples. En effet, ces paramètres modifient les propriétés physicochimiques et mécaniques des contacts et favorisent le processus d'oxydation. Le mécanisme de transfert mutuel de matière en plus de la formation des oxydes jouent un rôle primordial dans le frottement et l'usure des couples. La discussion des résultats expérimentaux et numériques s'appuie sur des observations macroscopique et microscope des surfaces usées et des phénomènes interfaciaux résultants du glissement.

Mots clés : Cuivre, Laiton, Acier, Interface, Frottement, Usure, Oxydation, Contraintes, déformations.

1. INTRODUCTION

D'une manière générale, dans un contact dynamique, la friction est caractérisée par un coefficient de frottement global ; du point de vue physique, en tenant compte des paramètres de fonctionnement et des propriétés des matériaux. Ce coefficient se compose de trois termes: le coefficient de frottement potentiel, le coefficient de frottement de déformation du matériau le plus tendre et le coefficient de frottement d'adhésion nécessaire pour rompre les microliaisons interfaciales. Ces différents mécanismes varient en fonction de la nature et des propriétés des matériaux ainsi que des conditions dans lesquelles s'effectuent les contacts. En outre, pour comprendre le comportement de l'interface, on fait varier les paramètres dynamique, cinématique et la nature des matériaux glissants ; une étude tribomécanique est nécessaire, dans la plupart des systèmes mécaniques.

L'objet de cette étude est de mettre en évidence, l'effet de ces paramètres sur le comportement tribologique des couples glissants à sec cuivre-acier et laiton-acier.

2. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Les expériences ont été réalisées à l'air ambiant en utilisant un tribomètre classique pion-disque (Fig. 1(a)). Le disque est en acier(41CrMo4). Le pion tantôt en cuivre tantôt en laiton. Il est appuyé contre le disque par une charge normale P. Sa forme cylindrique de longueur 20 mm et de diamètre égale à 8 mm; 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. Le disque de diamètre égal à 50 mm a une épaisseur de 12 mm. Il possède un trou lamé au centre, ce dernier permet la fixation du disque, à l'aide d'une vis sur le support du tribomètre. Le rayon de la piste sur le disque est fixé à 40 mm. Pour avoir le même état de surface et afin d'assurer les mêmes conditions d'essais, le disque est poli à l'aide du papier verre de grade 1200 ($R_a = 0,4 - 0,16 \mu m$).



Fig 1. Tribomètre pion-disque

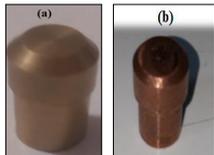


Fig 2. Formes des pions: (a) pion en laiton (b) pion en cuivre

3. Matériaux

3.1. Composition chimique des matériaux des couples

	Cu	Zn	Pb	Fe%	Ni%	Mn%	Cu%	V%	Cr %	Mo%
Cu	99,99	-	-							
CuZn40Pb3	57	40	3							
41CrMo4				96,86	0,16	0,82	0,12	0,01	1,05	0,21

3.2. Caractéristiques mécaniques de l'acier, cuivre et du laiton

	E [N/mm ²]	R [N/mm ²]	R _m [N/mm ²]	A%	HB
Cu	115	70	240	50	400
CuZn40Pb3	96000	180	460	15	120
41CrMo4	207000	Min 650	-	min12	270-330

4. RESULTATS

4.1. Comportement tribologique

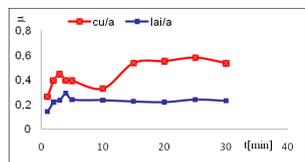


Fig. 3. Variation du coefficient de frottement en fonction de temps (P = 20N et V = 0,5m/s)

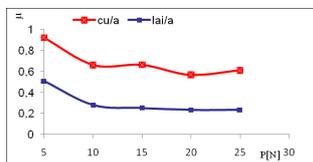


Fig. 4. Variation du coefficient de frottement en fonction de la charge (V = 0,5 m/s et t=30mn)

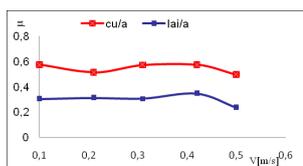


Fig. 5. Variation du coefficient de frottement en fonction de la vitesse (P = 20N et t = 30 min)

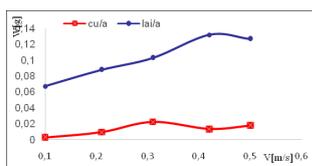


Fig. 6. Variation de l'usure en fonction de la vitesse de glissement (P = 20N et t = 30min)

5. CONCLUSION

Il ressort de notre étude que les paramètres fonctionnels conduisent à des déformations importantes entraînant des modifications des propriétés physicochimiques des couches superficielles des contacts et régissent leurs comportements tribologiques.

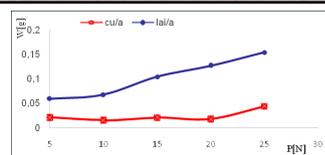


Fig. 7. Variation de l'usure en fonction de la charge normale (V = 0,5 m/s et t = 30 min)

4.2. Comportement mécanique

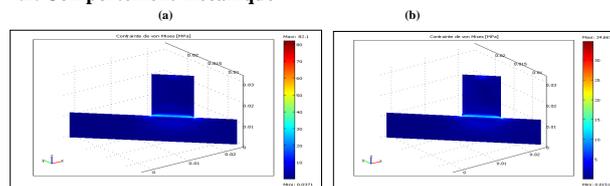


Fig. 8. La contrainte équivalente au niveau de la surface de contact pour les deux couples : (a) cuivre et (b) laiton

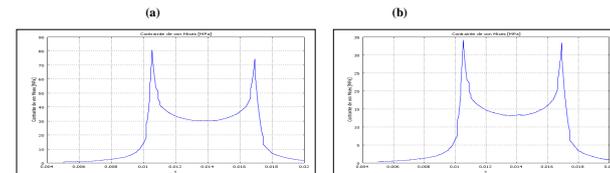


Fig. 9. Evolution de la contrainte équivalente en régime stationnaire pour le contact glissant : (a) cuivre et (b) laiton

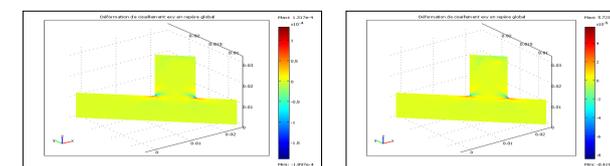


Fig. 10. Déformation de cisaillement ϵ_{xy} au niveau d'une partie de la surface de contact pour les contacts : (a) cuivre et (b) laiton

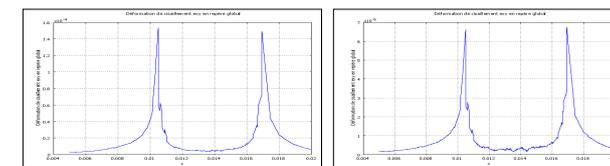


Fig. 11. Evolution de la déformation de cisaillement ϵ_{xy} pour les couples : (a) cuivre et (b) laiton

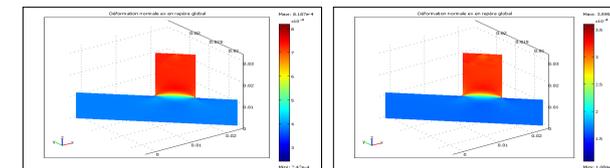


Fig. 12. La déformation normale au niveau de la surface de contact pour les couples : (a) cuivre et (b) laiton

Références

- [1] P.J. Blau, J.C. McLaughlin, Effects of water films and sliding speed on the frictional behavior of truck disc brake materials, Tribology International, vol. 36, p. 709-715, 2003.
- [2] C. Vilarinho, J. P. Davim, and al. "Influence of the chemical composition on the machinability of brasses. J. Mater. Process. Technol., Vol. 170, No. 1-2, pp. 441-447, 2005.
- [3] M. Okada, N-s Liou, v. Prakash, K. Miyoshi, "Tribology of high-speed metal-on-metal sliding at near-melt and fully-melt interfacial temperatures", wear, vol.1249,672-686,20.

COMPORTEMENT TRIBOTHERMIQUE DES CONTACTS DYNAMIQUES SECS CUIVRE-ACIER ET LAITON-ACIER SANS PASSAGE DU COURANT ELECTRIQUE

C. Boubechou¹, A. Bouchoucha², H. Zaidi³ et D. Bekhouche²

1. *Faculté de Technologie, Département de Génie Mécanique, Université de 20 Août 1955, Skikda 21000, Algérie*

2. *Laboratoire de Mécanique, Faculté des Sciences de la technologie, UFMCI, Algérie*

3. *Institut Pprime UPR3346-IUT, Université de Poitiers, Futuroscope, F-86960, Poitiers, France.*

MOTS CLES

Température de contact, Oxydation, Interface

RESUME

Cette étude porte sur une analyse thermique du contact et son effet sur le comportement tribologique des couples cuivre-acier et laiton-acier. Pour ce faire, on a effectué des essais sur le frottement et l'usure en utilisant un tribomètre pion-disque, dans une ambiance atmosphérique. Il s'agit d'un pion tantôt en cuivre tantôt en laiton frottant à sec contre un disque tournant en acier. Afin d'évaluer la température de contact à l'interface des couples ; un code numérique Comsol Multiphysics a été utilisé. Les résultats obtenus, montrent que la chaleur générée par friction mécanique a une influence significative sur le comportement tribomécanique des deux couples. En effet, la dissipation de la chaleur par glissement modifie les propriétés physicochimiques et mécaniques des matériaux et favorise le processus d'oxydation. Le mécanisme de transfert mutuel de matière en plus de la formation des oxydes jouent un rôle primordial sur le frottement et l'usure des couples. La discussion des résultats expérimentaux et numériques s'appuie sur des observations macroscopique et microscope des surfaces usées et des phénomènes interfaciaux résultants du glissement.

INTRODUCTION

On sait que le frottement est un mécanisme de dissipation d'énergie qui peut se faire sous différentes formes : dissipation mécanique par déformation, plastification, fluage épidermique, hystérésis élastique... ; usure, arrachement de débris ; dissipation thermique, échauffement du contact, étincelle,... ; et les phénomènes physicochimiques, oxydation, corrosion, réactions chimiques, changements de phases, diffusion d'éléments [1].

En outre, pour comprendre le comportement de l'interface, du point de vue transfert de chaleur et de matière ; en faisant varier les paramètres dynamiques, cinématiques et la nature des matériaux en contact glissant ; une étude tribothermique est nécessaire, dans la plupart des systèmes mécaniques.

L'objet de cette étude est de mettre en évidence, l'effet thermique sur le comportement thermomécanique et tribologique des couples glissants à sec cuivre-acier et laiton-acier.

EQUATIONS PHYSIQUES ET CONDITIONS AUX LIMITES DU PROBLEME THERMIQUE EN REGIME TRANSITOIRE

On définit l'équation de l'énergie dans les coordonnées cartésiennes comme suit :

$$\rho C_p \left(\frac{dT}{dt} \right) = \nabla(\lambda \nabla T) + S + \mu \phi \quad (2)$$

On considère les hypothèses suivantes :

- les matériaux sont isotropes.

- la dissipation visqueuse et l'effet de compressibilité sont négligeables.

L'équation (3) devient :

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + V \nabla T \right) = \lambda \nabla^2 T \tag{3}$$

Résoudre notre problème revient à résoudre l'équation de chaleur dans les coordonnées cartésiennes avec présence d'une source de chaleur surfacique. Elle prend la forme suivante [5] :

➤ **Pour le disque :**

$$\lambda_d \Delta T_d = \rho_d C_{p_d} \left(\frac{\partial T_d}{\partial t} + V \nabla T_d \right) \tag{4}$$

➤ **Pour le pion:**

$$\lambda_p \Delta T_p = \rho_p C_{p_p} \left(\frac{\partial T_p}{\partial t} \right) \tag{5}$$

EQUATIONS PHYSIQUES ET CONDITIONS AUX LIMITES DU PROBLEME THERMIQUE EN REGIME STATIONNAIRE

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0 \tag{6}$$

L'équation qui régit les transferts de chaleur dans le disque est :

$$\lambda_d \Delta T_d = \rho_d C_{p_d} V \nabla T_d \tag{7}$$

Et dans le pion :

$$\lambda_p \Delta T_p = 0 \tag{8}$$

Les conditions aux limites sont spécifiées comme suit :

Au contact, on a un flux de chaleur généré par frottement entre le pion et le disque, il est noté par q_t . En dehors du contact, on a la convection, elle est caractérisée par le coefficient d'échange de chaleur h_{air} suppose constant.

RESULTATS

LA TEMPERATURE EN FONCTION DE LA SURFACE DE CONTACT

La figure 1 présente la distribution de la température en régime stationnaire au niveau de la surface de contact des deux couples glissants pour une charge de 20N et une vitesse de 0.5m/s. On observe que plus on se rapproche de la zone de contact au niveau de l'interface pion-disque, plus la température augmente pour le couple cuivre-acier que pour le couple laiton-acier.

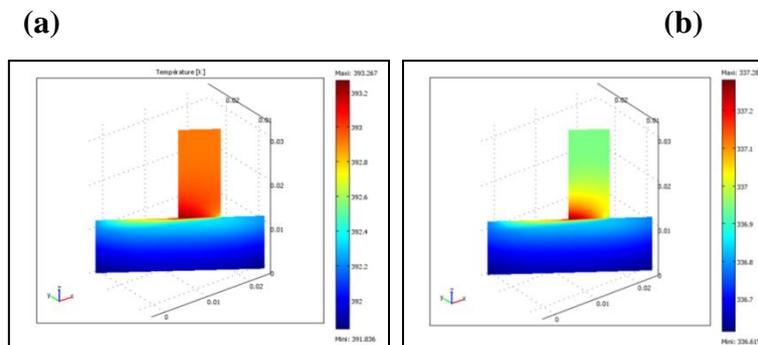


Figure 1 : La distribution de la température au niveau de la surface de contact : (a) cuivre-acier et (b) laiton-acier.

LA TEMPERATURE EN FONCTION DU DEPLACEMENT

On remarque que la variation de la température est une fonction croissante avec le déplacement suivant l'axe X.

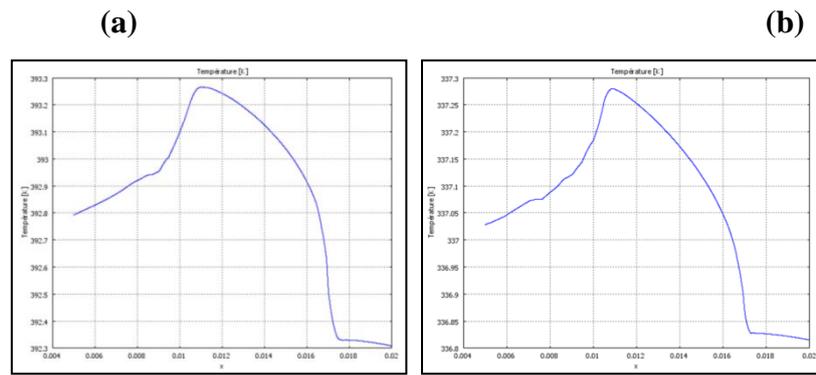


Figure 2 : Evolution de la température de contact en fonction du déplacement : (a) cuivre-acier et (b) laiton-acier.

CONCLUSION

Il ressort de notre étude que la chaleur générée par frottement mécanique conduit à des changements des propriétés physicochimiques des matériaux en contact et des phénomènes interfaciaux qui en résultent durant le glissement. Des modifications des propriétés surtout mécaniques des couches superficielles des contacts. L'activation thermique due aux déformations des matériaux, la diffusion et l'interaction à l'interface jouent un rôle décisif sur le comportement tribologique.

Références

- [1] C. Boubechou, A. Bouchoucha, H. Zaidi. Study of the tribo-thermal behavior of the disc-pin contact. 5th International conference on advances in mechanical engineering, Istanbul 2018. 17-19 December 2019.
- [2] V.Stoica, R. Ahmed, T. Itsukaichi, " Influence of heat-treatment on the sliding wear of thermal spray cermet coatings". Surface and Coatings Technology, 199(1), 7-21, 2005.

INFLUENCE DES PARAMETRES FONCTIONNELS SUR LE COMPORTEMENT TRIBOLOGIQUE DES COUPLES DYNAMIQUES CUIVRE-ACIER ET LAITON-ACIER

C. Boubechou¹, A. Bouchoucha², H. Zaidi³ et D. Bekhouche²

1. *Faculté de Technologie, Département de Génie Mécanique, Université de 20 Août 1955, Skikda 21000, Algérie*

2. *Laboratoire de Mécanique, Faculté des Sciences de la technologie, UFMCI, Algérie*

3. *Institut Pprime UPR3346-IUT, Université de Poitiers, Futuroscope, F-86960, Poitiers, France.*

MOTS CLES

Contraintes, Déformations, Oxydation, Usure

RESUME

Ce travail porte sur l'influence des facteurs fonctionnels sur le comportement en frottement et usure des couples tribologiques cuivre-acier et laiton-acier. Pour ce faire, on a effectué des essais sur le frottement et l'usure en utilisant un tribomètre pion-disque, dans une ambiance atmosphérique. Il s'agit d'un pion tantôt en cuivre tantôt en laiton frottant à sec contre un disque tournant en acier. Afin d'évaluer les contraintes mécaniques et les déformations à l'interface des couples ; un code numérique Comsol Multiphysics a été utilisé.

Les résultats obtenus, montrent que les paramètres sus-cités ont une influence significative sur le comportement tribomécanique des deux couples. En effet, ces paramètres modifient les propriétés physicochimiques et mécaniques des contacts et favorisent le processus d'oxydation. Le mécanisme de transfert mutuel de matière en plus de la formation des oxydes jouent un rôle primordial dans le frottement et l'usure des couples. La discussion des résultats expérimentaux et numériques s'appuie sur des observations macroscopique et microscope des surfaces usées et des phénomènes interfaciaux résultants du glissement.

INTRODUCTION

D'une manière générale, dans un contact dynamique, la friction est caractérisée par un coefficient de frottement global ; du point de vue physique, en tenant compte des paramètres de fonctionnement et des propriétés des matériaux. Ce coefficient se compose de trois termes [1] : le coefficient de frottement potentiel, le coefficient de frottement de déformation du matériau le plus tendre et le coefficient de frottement d'adhésion nécessaire pour rompre les microliaisons interfaciales. Ces différents mécanismes varient en fonction de la nature et des propriétés des matériaux ainsi que des conditions dans lesquelles s'effectuant les contacts. En outre, pour comprendre le comportement de l'interface, on fait varier les paramètres dynamique, cinématique et la nature des matériaux glissants ; une étude tribomécanique est nécessaire, dans la plupart des systèmes mécaniques.

L'objet de cette étude est de mettre en évidence, l'effet de ces paramètres sur le comportement tribologique des couples glissants à sec cuivre-acier et laiton-acier.

COMPORTEMENT MECANIQUE

La figure 1 présente l'évolution de la contrainte en régime stationnaire au niveau de la surface de contact des deux couples.

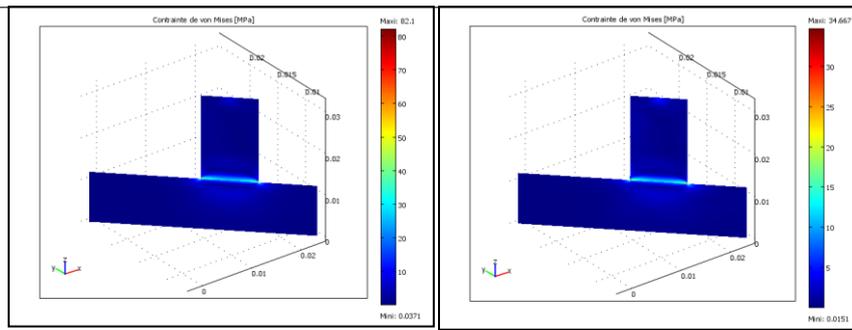


Figure 1: La contrainte équivalente au niveau de la surface de contact pour les deux couples.

La figure 2 donne la contrainte équivalente en repère global en fonction de déplacement. Cette figure récapitule le point exact du contact pion-disque (la contrainte maximale).

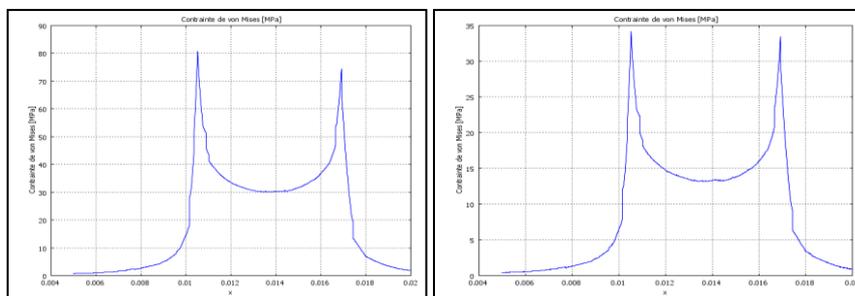


Figure 2: Evolution de la contrainte équivalente en régime stationnaire pour le contact glissant : cuivre-acier et laiton-acier.

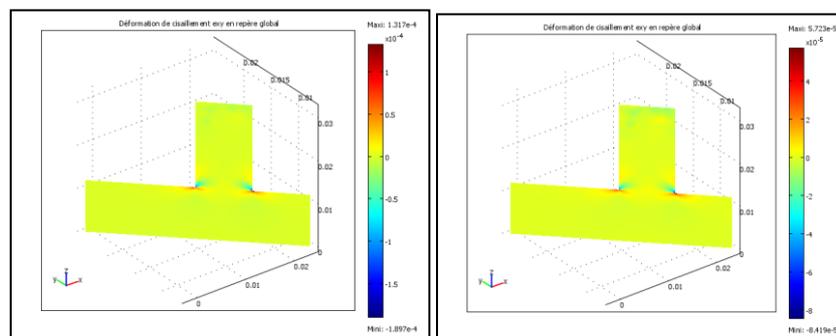


Figure 3: La déformation de cisaillement ϵ_{xy} au niveau d'une partie de la surface de contact pour les contacts : cuivre-acier et laiton-acier.

CONCLUSION

Il ressort de notre étude que les paramètres fonctionnels conduisent à des déformations importantes entraînant des modifications des propriétés physicochimiques des couches superficielles des contacts et régissent leurs comportements tribologiques.

Références

[1] P.J. Blau, J.C. McLaughlin, Effects of water films and sliding speed on the frictional behavior of truck disc brake materials, Tribology International, vol. 36, p. 709-715, 2003.

Le Machine learning comme outils de prédiction du frottement

A. Bouchot¹, A. Ferrieux¹, G. Mollon¹, J. Debayle² et S. Descartes¹

1. Univ Lyon, INSA Lyon, CNRS, LaMCoS, UMR5259, 69621 Villeurbanne, France.

2. Mines Saint-Etienne, CNRS, UMR 5307 LGF, Centre SPIN, Saint-Etienne, France.

MOTS CLES

Frottement sec, Analyse d'image, Machine learning

INTRODUCTION

Dans cette communication, nous présentons un cadre général permettant de déduire un coefficient de frottement expérimental à partir des propriétés morphologiques de la couche de troisième corps présente sur la piste d'usure. Ce cadre implique des essais tribologiques, l'extraction et le traitement d'images, et la construction d'un modèle d'apprentissage automatique afin d'établir le lien entre les données rhéologiques et morphologiques.

EXPERIMENTATION

Les expériences sont réalisées sur un tribomètre pion-disque (contact acier-acier) dans diverses conditions de charge et de vitesse, à l'air ambiant ou sous argon. Les forces normale et tangentielle ainsi que des accélérations (3 directions) sont mesurées. Le frottement est calculé et cartographié en fonction du nombre de tours et de la position radiale sur le disque afin d'analyser ses variations dans l'espace et le temps (Fig. 1).

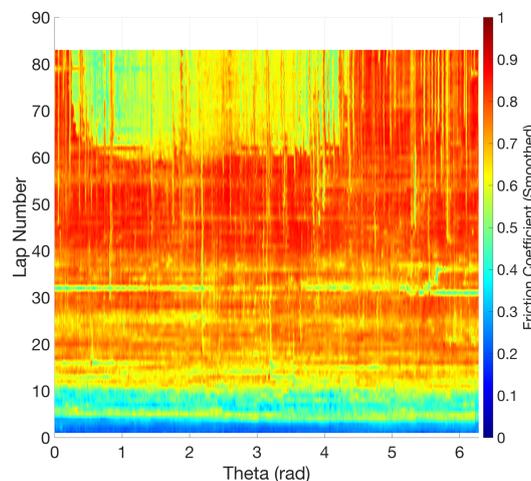


Figure 1 : Mesure expérimentale du coefficient de frottement, cartographié en fonction du nombre de tours et de la position radiale sur le disque.

Après chaque expérience, des images sont prises par microscopie électronique à balayage (MEB) tous les 15° (position radiale Theta) le long de la piste de frottement afin de capturer la morphologie du troisième corps. L'analyse des images est ensuite effectuée selon deux protocoles :

(i) dans les zones périphériques de la piste frottée, zones où les particules de troisième corps sont éjectées. Les images des particules sont segmentées à l'aide d'une approche automatique assistée par machine learning (ML), basée sur un réseau neuronal artificiel (Fig. 2), qui fournit une large collection de descripteurs morphologiques pour chaque particule.

(ii) dans la partie centrale de la piste frottée, zone où le troisième corps se présente généralement sous forme de couches plus ou moins compactées, s'étant écoulées, plutôt que sous forme de particules. Ainsi les textures du troisième corps sont caractérisées sur la base de descripteurs extraits des statistiques de la matrice de cooccurrence des images MEB [1, 2].

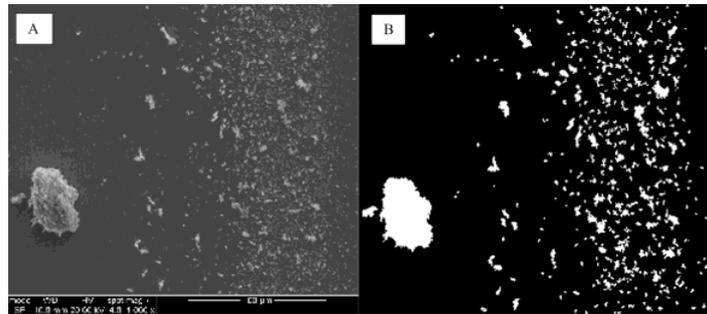


Figure 2 : A) Image MEB des particules d'usure. B) Segmentation par machine learning

MACHINE LEARNING ET RESULTATS

Pour chaque Theta le long de la piste frottée, les descripteurs morphologiques (à la fois des particules et des textures) sont étiquetés par la valeur du coefficient de frottement obtenue localement au cours du dernier tour expérimental (Fig. 1). Les valeurs de frottement sont très variables, allant approximativement de 0,2 à 1,2, et varient à la fois entre les essais et entre les positions Theta pour un même essai. Un algorithme de ML basé sur les forêts aléatoires [3] est ensuite appliqué afin de construire un modèle de régression prédisant la valeur locale du coefficient de frottement à partir des morphologies locales du troisième corps.

Diverses configurations de bases de données (uniquement des particules, uniquement des textures, les deux, etc.) sont testées, et les hyperparamètres de l'algorithme de ML sont optimisés. Après une phase d'entraînement, la capacité prédictive de l'algorithme est testée sur un nouveau lot de données et donne des résultats encourageants : le coefficient de frottement peut généralement être prédit avec une erreur inférieure à 15%, malgré la grande variabilité des valeurs de frottement et des conditions expérimentales. Cette étude démontre donc qu'une partie du coefficient de frottement est effectivement codée dans l'aspect visuel du troisième corps, et l'explicabilité physique du modèle est apportée à l'aide d'outils d'analyse d'influence.

CONCLUSION

Cette communication présentera deux axes : les outils d'intelligence artificielle mis en place en vue de prédire le coefficient de frottement à partir de la morphologie de l'interface frottée, ainsi que les résultats obtenus, puis dans un second temps l'explicabilité de ces prédictions.

Références

- [1] BOUCHOT, Alizée, *et al.* Segmentation and morphological analysis of wear track/particles images using machine learning. *Journal of Electronic Imaging*, 2022, vol. 31, no 5, p. 051605-051605.
- [2] HARALICK, Robert M., *et al.* Textural features for image classification. *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics*, 1973, no 6, p. 610-621.
- [3] BREIMAN, Leo. Random forests. *Machine learning*, 2001, vol. 45, p. 5-32.

Relations entre les flux de troisième corps, les mécanismes de portance et les émissions de particules en situation de freinage automobile

Mathis BRIATTE ¹, Alexandre MEGE-REVIL ¹, Yannick DESPLANQUES ¹, Pierre Olivier SANTACREU ²

1. Univ. Lille, CNRS, Centrale Lille, UMR 9013 - LaMcube - Laboratoire de Mécanique, Multiphysique, Multi-échelle, F-59000 Lille, France ; [prénom].[nom]@centralelille.fr

2. APERAM Stainless Steel, 62330 ISBERGUES, France ; coralie.parrens@aperam.com

MOTS CLES

Émission de particules, Mécanismes d'usure, Sollicitation thermomécanique, Oxydation, Freinage.

RESUME

Lors du freinage automobile, le troisième corps généré par la friction forme un circuit tribologique qui alimente le contact entre le disque et la plaquette, assurant les capacités de dissipation d'énergie du frein à disque. Une partie du troisième corps est éjectée du circuit tribologique en formant des flux d'usure, parmi lesquels des matières en suspension dans l'air composées de particules fines et ultrafines. Ces particules, principalement des oxydes métalliques cancérigènes, sont particulièrement importantes dans le cas d'un disque de frein constitué d'un matériau en fonte à graphite lamellaire.

Afin d'étudier les mécanismes d'émission de ces particules fines et ultrafines, une étude comparative a été réalisée. Deux disques, l'un en acier inoxydable et l'autre en fonte grise, ont été soumis à des essais de freinage sur un tribomètre de laboratoire, en contact avec des plaquettes en matériau composite métallique fritté utilisé comme garniture de frein. Deux situations de freinage automobile, typiques du trafic urbain et suburbain, sont modélisées et étudiées. L'instrumentation permet de suivre l'évolution de la piste de frottement du disque, en termes de morphologie (caméra visible à grande vitesse) et de localisation de la dissipation thermique (caméra thermique infrarouge). L'émission de particules est étudiée in operando grâce à une chambre de prélèvement sous flux d'air contrôlé et deux analyseurs de matière particulaire fournissant un taux de particules par taille dans la gamme [6 nm ; 10 µm]. De plus, un impacteur collecte les émissions pour des analyses de composition chimique post-mortem. Les surfaces de frottement des plaquettes et des disques sont analysées par microscopie électronique à balayage et par spectroscopie à dispersion d'énergie, et la troisième couche du corps est examinée en relation avec les matériaux du disque et le contexte de l'émission de particules et de la localisation thermique.

Prévision de l'érosion par particules solides véhiculées par un fluide à l'aide du POT-TEST

Y. CHEN¹, D. CAZE¹, PF. CARDEY¹, V. ROHR²

1. CETIM, Laboratoire Tribologie, Pole Matériaux Métalliques et Surfaces
2. ORANO Recyclage, Etablissement de La Hague.

MOTS CLES

Erosion, particules solides, pot-test, acier, acier inoxydables, modèle d'érosion.

INTRODUCTION

L'érosion par particules solides véhiculées par un fluide est un mode d'usure qu'il est nécessaire d'étudier pour dimensionner les composants de l'industries nucléaire, chimique, agro-alimentaires, sanitaire (traitements des eaux usées) et transport, sur des pâles de mélangeur, des pièces de pompe et de compresseur, de la tuyauterie, des véhicules à grande vitesse... Si les mécanismes semblent relativement simples dans la majorité des cas, leur prévision est souvent plus difficile, car la vitesse d'usure dépend non seulement des propriétés intrinsèques du matériau, mais également de celles des particules, de leur taille ou encore de leur forme... De plus, la vitesse d'usure dépend des conditions de sollicitations, de la vitesse du fluide, de l'angle d'incidence. Finnie a proposé un modèle pour calculer le taux d'usure en impliquant la vitesse, la masse de particules, l'angle d'incidence et la pression de contact[1]. Hutchings a optimisé ce modèle en introduisant la dureté du matériau basé sur les mécanismes de déformation plastique[2]. Mais l'utilisation de ces modèles est souvent complexe car les résultats dépendent fortement de combinaison de la ductibilité du matériau et de l'angle d'incidence.

Afin d'étudier l'évolution de l'usure d'un mélangeur pour des eaux usées, des essais d'érosion ont été réalisés sur le banc pot-test du Cetim (figure 1). L'objectif de cette étude est de définir les conditions d'essai représentatives des sollicitations des pales de mélangeur.

CONDITIONS DES ESSAIS

Les essais ont été réalisés avec de l'eau chargée de particules de silice de 125 μm et d'alumine de 50 μm à une concentration de 50g/L. La vitesse maximale sur l'échantillon est de 5 m/s. Trois éprouvettes sont fixés sur le support réparties en 120°. L'angle d'attaque de l'éprouvette est de 45°.

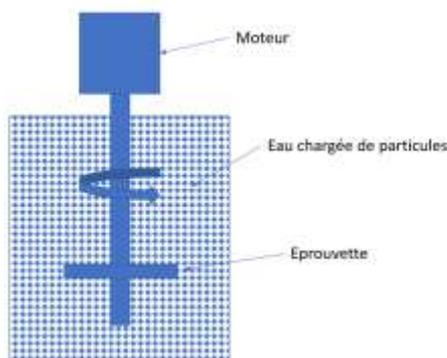


Figure 1: Schéma de pot-test Cetim et photo des éprouvettes

Deux types d'acier ont été testés, un acier de construction type E36 (Rm 490 MPa, 146HB) et un acier inoxydable austénitique type 316L (Rm=485 MPa, 145 HB). Les éprouvettes ont été pesées avant et après chaque test à l'aide d'une balance dont la précision est de 0.01 mg.

PREMIERS RESULTATS

Les premiers résultats d'essai montrent que la taille de particules a une influence importante. Contrairement à ce que propose le modèle de Finnie, les particules plus fines en alumine sont plus agressives que les particules en silice dont la taille est nettement plus grande. L'usure des éprouvettes dépend très fortement de type d'acier, même si la dureté de l'acier au carbone et celle de l'acier inoxydable était similaire (figure 2). Ces résultats ne confirment pas non plus le modèle de Hutchings dans lequel l'usure devrait être d'autant plus faible que la dureté est grande.

Afin de mieux comprendre les mécanismes d'usure des éprouvettes, des observations au microscope ont été réalisées sur une éprouvette en acier au carbone et sur une éprouvette en 316L. Les images montrent que les faciès d'usure sur l'éprouvette en acier se caractérise par des cavités de forme très complexe, alors ceux de l'éprouvette en 316L par des stries très fines avec des traces d'impact (figure 3).

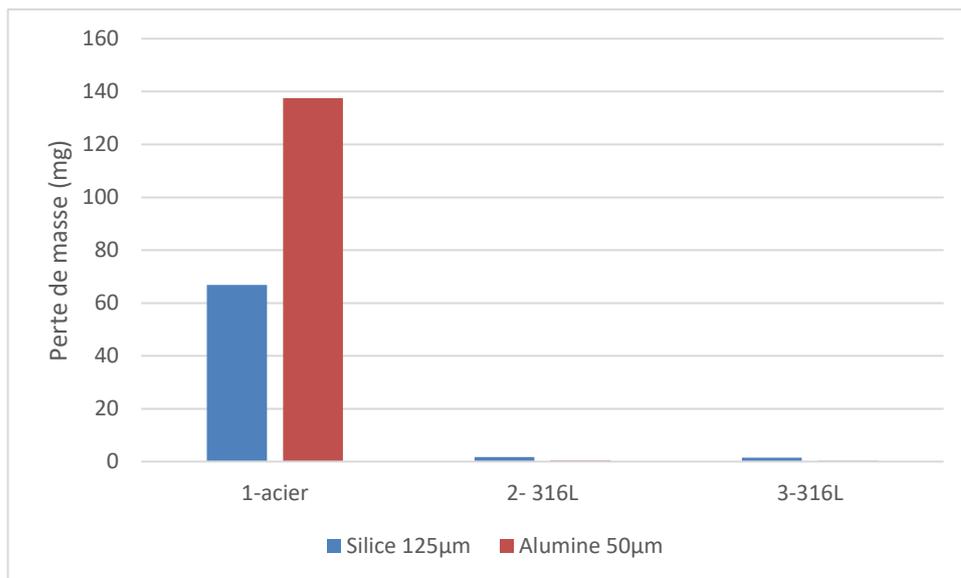


Figure 2: Perte de masse des éprouvettes après l'essai

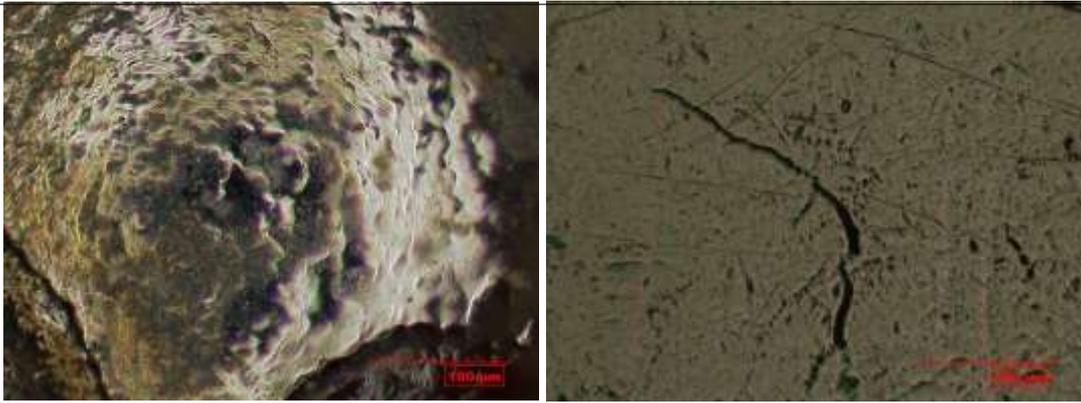


Figure 3: Traces d'usure sur l'éprouvette en acier (gauche) et l'éprouvette en 316L (droit)

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les résultats de ces premiers essais montrent qu'il est très difficile de prévoir l'usure d'un système spécifique comme le mélangeur avec les modèles classiques.

Il est donc important de poursuivre les essais pour avoir les premières données fiables avant d'adapter les modèles pour permettre de prendre en compte ces lois d'usure dans le dimensionnement d'installations industrielles.

Références

- [1] L. Finnie, « Some reflections on the past and future of erosion », *Wear*, vol 186-187, 1995, pp. 1-10.
- [2] I Hutchings, « Erosion by solid particle impact, *TRIBOLOGY* », Edward Arnold, 1992, ISBN 0-340-56184-x.

Dépôt lubrifiant MoS₂+Ta pour application spatiale - Maintien de la lubrification lors de la transition Air/vide

Serles Peter^{1,2}, Nicholson Eric³, Tam Jason³, Barri Nima², Chemin Jean-Baptiste⁴, Wang Guorui¹, Michel Yann⁵, Singh Chandra Veer³, Choquet Patrick⁴, Aurélien Saulot², Filleter Tobin¹ et Colas Guillaume⁶

1. Department of Mechanical & Industrial Engineering, The University of Toronto, 5 King's College Road, Toronto, ON M5S 3G8, Canada

2. LaMCoS, INSA Lyon, Université de Lyon, CNRS UMR5259, Villeurbanne 69621, France

3. Department of Materials Science and Engineering, The University of Toronto, 184 College St, Toronto, ON M5S 3E4, Canada

4. Department of Materials Research and Technology, Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST), 28 avenue des Hauts-Fourneaux, Esch-sur-Alzette L-4362, Luxembourg

5. Centre National D'Études Spatiales (CNES), 18 Avenue Edouard Belin, Toulouse 31401, France

6. Université de Franche-Comté, CNRS, Institut FEMTO-ST, F-25000, Besançon, France

MOTS CLES

MoS₂, Tribologie Spatiale, 3^{ème} corps

INTRODUCTION – Historique du développement du dépôt

Dans les mécanismes spatiaux et en raison de son héritage spatial, le revêtement majoritairement utilisé est le MoS₂ (principalement déposé par PVD). Le comportement tribologique sous vide de ce revêtement est très satisfaisant mais il présente des limites d'utilisation dues à sa tenue mécanique (pression de contact limitée) et à sa susceptibilité à l'environnement (air et humidité).

En raison de ces problèmes, de nouveaux produits sont proposés par des industriels (déposeurs ou fournisseurs de mécanismes) et des laboratoires développant des instruments scientifiques. Les seules caractéristiques techniques disponibles sont celles données par les déposeurs. Elles sont souvent insuffisantes pour pouvoir envisager/valider l'utilisation de ces produits dans les mécanismes du CNES (plages de température limitées, données tribologiques inexistantes ou à l'interprétation limitée), les informations reçues par les fournisseurs peuvent également être parfois partiellement erronées. A titre d'exemple le MoS₂+Ti a été annoncé comme étant un très bon lubrifiant à la fois sous environnement sec (Air et Azote) et sous vide par extension du comportement sous azote sec. Les travaux de la thèse de G Colas [1] sur l'impact de l'environnement et de la microstructure sur le comportement tribologique des dépôts minces à base MoS₂ ont démontrés une durée de vie du MoS₂+Ti extrêmement limitée sous vide. Tous ces dépôts sont parfois prometteurs en termes de tenue mécanique et des performances tribologiques mais il manque actuellement en partie les connaissances nécessaires pour approuver ou au contraire émettre des réserves concernant ces choix.

L'étude approfondie des circuits tribologiques des 3^{ème} corps solides et gazeux, et l'analyse qualitative des morphologie et composition chimiques des 3^{ème} et 1^{er} corps ont permis d'identifier des pistes d'élaboration (cristallinité, microstructure, dopage) de nouveaux dépôts secs « dopés » par des additifs gazeux et/ou solides afin de les rendre peu sensibles aux environnements gazeux ou vides [2–4]. Etant donné la fréquence d'utilisation des dépôts MoS₂ dans les mécanismes spatiaux et les contraintes posées en essais de qualification au sol pour le fonctionnement sous air, il semblait particulièrement intéressant d'explorer ces pistes de conception afin de développer des matériaux insensibles aux transitions air humide / vide.

La poursuite des investigations tribologiques et physicochimiques des matériaux (dépôt originel et 3^{ème} corps) à travers les échelles [5–7] ont permis de confirmer l'intérêt de la structure fibreuse dense contenant à la fois des phases amorphes et cristallines dans le cadre des applications visées. En effet,

celle-ci favorise le détachement de particules à la morphologie appropriée pour l'établissement du 3^{ème} corps lubrifiant, et ce très rapidement. La densification des dépôts (mouvance actuelle, car tend à augmenter la dureté) avec une constitution essentiellement nanocrystalline, et une microstructure amorphe conduisent en effet à une rupture de lubrification extrêmement rapide (même du MoS₂ dans le vide !) [3]

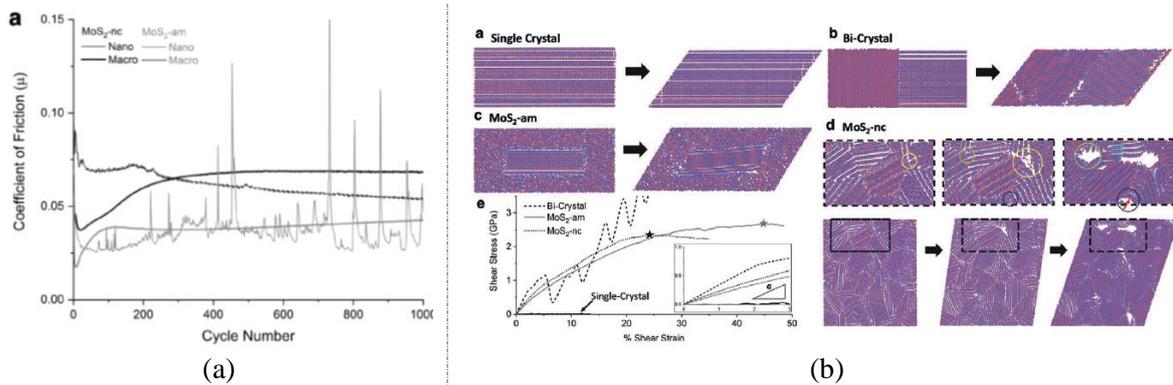


Figure 1 – ref [7] (a) coefficient de frottement mesuré lors d'essais menés sous azote sec, sur un AFM avec une microbille d'acier (10μm de diamètre). Les essais ont permis de reproduire le processus de détachement de particule de 3^{ème} corps, de le détecter in-situ. Une évolution similaire du coefficient de frottement a ainsi été observée. (b) étude par dynamique moléculaire mettant en évidence le rôle de la microstructure des dépôts sur l'accommodation de ce dernier au cisaillement, et par extension sur la création de 3^{ème} corps alimentant le contact.

Suite aux recommandations issues de la thèse et les caractérisations au travers des échelles des mécanismes de création des 3^{ème} corps et des propriétés de surfaces des 3^{èmes} corps, une formulation a été proposée, réalisée techniquement au LIST (Luxembourg). Cette formulation, un dépôt MoS₂ dopé au Ta, et contenant de l'oxygène, a été testée tribologiquement avec succès au LaMCoS.

Réalisation et essais tribologiques du dépôt MoS₂+Ta

Le premier prototype du dépôt a en effet surpassé plusieurs dépôts (Figure 2), dont celui de référence (le MoS₂), actuellement utilisé dans les applications spatiales [8]. C'est en effet, le seul qui a permis l'obtention d'un frottement faible dans le vide, après avoir été préalablement utilisé sous air.

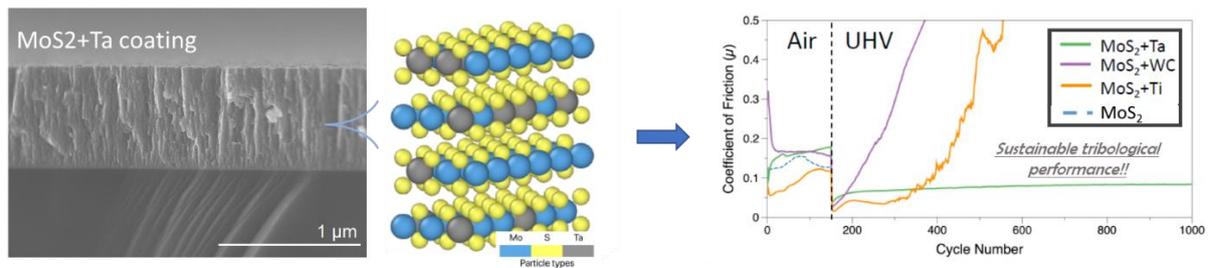


Figure 2 – Dépôt MoS₂+Ta (cross section) avec le Ta en substitution au Mo localement sans rupture de la structure hexagonale induit l'obtention d'un frottement faible sous air et sous vide. Le dépôt MoS₂ n'a pas résisté aux 150 cycles sous air, le dépôt ayant été entièrement retiré. Essais tribologiques à 10 mm/s, 1Gpa, air 50% humidité, vide 1.e⁻⁷ mbar. [8]

Cependant, frottement faible ne veut pas dire usure et dégradation faible du dépôt. Les analyses MEB ont démontré que le 3^{ème} corps généré sous air avait la même morphologie que celui généré par le MoS₂+Ti sous air, et que la morphologie de celui généré sous vide après la transition air/vide était très similaire à celui généré par le MoS₂ frottant uniquement sous vide. Ainsi, le 3^{ème} corps approprié à chaque environnement a bien été généré et dans un laps de temps suffisamment court pour ne pas consommer l'entière du dépôt. L'hypothèse forte expliquant ce comportement est que l'addition du Ta et son comportement à l'oxydation permet de protéger le Mo et d'empêcher la création d'un oxyde abrasif. En effet, les analyses XPS du dépôt montrent la création naturelle d'oxysulfure de Mo, d'oxysulfures de Ta, d'oxyde Ta₂O₅, et de TaS₂. Tous ces éléments ont des propriétés lubrifiantes sous air ou sous vide. L'interface se modèlerait donc à façon lors de la transition air/vide. Pour finir, il est à

noter que le choix de la microstructure fibreuse dense pour favoriser la création de 3^{ème} corps n'a pas été au détriment des propriétés mécaniques du dépôt. En effet, elles sont supérieures ou égales à celles du MoS₂+Ti et MoS₂+WC, et nettement supérieure à celle de dépôt MoS₂ de références.

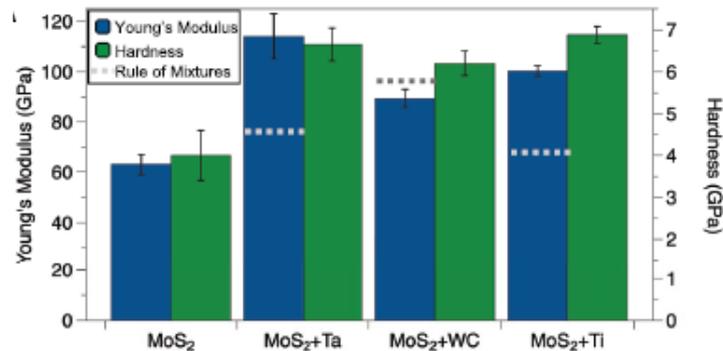


Figure 3 - Dureté et module d'Young du dépôt MoS₂+Ta comparés au 3 autres dépôts de l'étude [8].

CONCLUSION

Cette étude présente le développement d'un nouveau dépôt pour application spatiale au travers d'une investigation tribologique transdisciplinaire, et au travers des échelles, d'un seul et même matériau, tout en emmenant le concept de 3^{ème} corps au sein de ces différents domaines. En effet, ces dépôts lubrifiants sacrifient une partie de leur surface et de leur volume pour créer une couche de 3^{ème} corps lubrifiante. Le comportement tribologique obtenu avec le dépôt formulé suivant les recommandations établies lors des différentes études démontre des performances surpassant les dépôts de références actuels, en termes de frottement et de durée de vie, notamment lors de la transition air/vide. Cette transition correspondant au 2 vies principales d'un mécanisme spatial : développement et essais au sol et fonctionnement dans le vide spatial.

Références

- [1] G. Colas, Utilisation raisonnée de contaminants pour caractériser la rhéologie des 1ers et 3ème corps solides : Application à la tribologie en ambiances spatiales, INSA de Lyon, 2013.
- [2] G. Colas, A. Saulot, C. Godeau, Y. Michel, Y. Berthier, Decrypting third body flows to solve dry lubrication issue - MoS₂ case study under ultrahigh vacuum, *Wear*. 305 (2013) 192–204.
- [3] G. Colas, A. Saulot, E. Regis, Y. Berthier, Investigation of crystalline and amorphous MoS₂ based coatings: Towards developing new coatings for space applications, *Wear*. 330–331 (2015) 448–460.
- [4] G. Colas, A. Saulot, D. Philippon, Y. Berthier, D. Léonard, Tribochemical competition within a MoS₂/Ti dry lubricated macroscale contact in ultrahigh vacuum: a Time of Flight Secondary Ion Mass Spectrometry investigation, *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 10 (2018) 20106–20119.
- [5] S. Pajovic, G. Colas, A. Saulot, M. Renouf, T. Filleter, Work of Adhesion Measurements of MoS₂ Dry Lubricated 440C Stainless Steel Tribological Contacts, *Adv. Eng. Mater.* 1700423 (2017) 1700423.
- [6] G. Colas, P. Serles, A. Saulot, T. Filleter, Strength measurement and rupture mechanisms of a micron thick nanocrystalline MoS₂ coating using AFM based micro-bending tests, *J. Mech. Phys. Solids*. 128 (2019) 151–161.
- [7] P. Serles, H. Sun, G. Colas, J. Tam, E. Nicholson, G. Wang, J. Howe, A. Saulot, C.V. Singh, T. Filleter, Structure-Dependent Wear and Shear Mechanics of Nanostructured MoS₂ Coatings, *Adv. Mater. Interfaces*. 7 (2020).
- [8] P. Serles, E. Nicholson, J. Tam, N. Barri, J.B. Chemin, G. Wang, Y. Michel, C.V. Singh, P. Choquet, A. Saulot, T. Filleter, G. Colas, High Performance Space Lubrication of MoS₂ with Tantalum, *Adv. Funct. Mater.* 2110429 (2022) 1–10.

Une méthode pour étudier l'évolution du frottement avec un historique sévère de freinage

A method to study friction evolution with severe braking history

^{1,2}Delattre, Sylvain* ; ¹Cristol, Anne-Lise; ¹Dufrenoy, Philippe; ¹Desplanques, Yannick; ²Henrion, Michèle

¹Univ. Lille, CNRS, Centrale Lille, UMR 9013 - LaMcube - Laboratoire de Mécanique, Multiphysique, Multi-échelle, F-59000 Lille, France

²Alstom Flertex, F-92230 Gennevilliers, France

MOTS-CLÉS – baisse de frottement, tribologie, troisième corps, mécanismes de frottement et d'usure

RÉSUMÉ

Les freins à disque ferroviaires sont des composants de sécurité soumis à des normes strictes en termes de performances de freinage. Le frottement doit rester le même quelles que soient les conditions d'utilisation et d'environnement. Récemment, de nouvelles contraintes sont venues s'ajouter à ces exigences, liées à l'évolution de l'utilisation des freins à disque, et ont soulevé de nouvelles préoccupations concernant la stabilité du frottement. Tout d'abord, le développement de technologies de freinage complémentaires entraîne une prolongation de la durée de vie des freins à disque sur le matériel roulant, ce qui les expose à des problèmes de vieillissement. Ensuite, dans un effort pour alléger les trains et augmenter leur vitesse en service, des systèmes de freinage moins nombreux doivent dissiper de plus grandes quantités d'énergie. Enfin, la densité croissante du trafic entraîne des conditions de roulement inégales, avec des phases d'accélération et de décélération prononcées. Tout cela peut exposer les freins à disque à des conditions de freinage sévères et affecter la stabilité du frottement d'une manière qui est actuellement méconnue.

Les essais industriels réalisés par Alstom Flertex ont montré qu'un historique de freinage sévère peut affecter de manière significative le frottement. Un banc tribologique à l'échelle 1, équipé d'un disque en acier et de garnitures frittées métalliques à base fer-cuivre, a été exposé à des freinages d'urgence répétés. Pour étudier l'évolution du frottement en fonction de l'historique du freinage, les performances du freinage ont été caractérisées dans des conditions d'usage en service avant et après la sollicitation. Les résultats montrent que le frottement a été réduit d'environ 10 % après la série de freinages d'urgence par rapport à avant.

L'objectif de ce travail est d'établir une relation entre l'historique sévère de freinage et l'évolution du frottement. Sur un tribomètre pion-disque à l'échelle réduite, des disques et des garnitures de matériaux similaires ont été exposés soit à des freinages de service, soit à des freinages sévères. Avant et après la sollicitation, l'évolution du frottement a été caractérisée dans des conditions d'usage en service. De la thermographie infrarouge et des mesures de température en proche surface du pion et du disque ont été réalisées pour surveiller la dissipation de la chaleur et la localisation du contact. L'évolution du matériau de friction avec la sollicitation a été caractérisée, en termes de microstructure par microscopie électronique (MEB) et en termes de propriétés thermiques par Laser Flash (LFA). Les surfaces frottées à l'échelle 1 et à l'échelle réduite ont également été analysées au MEB, et leur composition déterminée par spectroscopie X (EDX), afin de caractériser les différences dans l'accommodation du glissement et les mécanismes d'usure entre les conditions de frottement nominal et de frottement réduit.

Le poster se concentrera sur l'analyse du processus de baisse du frottement, depuis les observations à l'échelle 1 jusqu'aux expériences plus approfondies à l'échelle réduite. Des niveaux de frottement et de températures similaires sont observés aux deux échelles, dans des conditions de service et de freinage sévère. Les expériences à l'échelle réduite ont produit une diminution du frottement similaire à celle observée sur le banc industriel. Une analyse plus poussée à l'échelle réduite montre que la baisse de frottement est corrélée à une surface de contact apparente plus petite, attribuée à une usure inégale de la garniture et à une déformation thermomécanique du disque lors des freinages sévères. La réduction du frottement s'accompagne également de quantités accrues de cuivre détectées à la surface de la garniture et d'une évolution du matériau de friction, en termes de microstructure et de propriétés thermiques, attribuée aux températures élevées atteintes dans le contact. Les freinages de service suivant la baisse de frottement montrent une lente augmentation de celui-ci. À la lumière de ces observations, les processus de la baisse du frottement et de sa récupération seront examinés à l'échelle réduite et à l'échelle 1 pour en déterminer les mécanismes.

Etude de la formation de tribofilm dans un contact électrique métallographitique glissant par spectroscopie Raman

T. Doutriaux^{1,2}, S. Fouvry¹, M. de Barros¹, S. Larousse² et M. Isard³

1. LTDS, CNRS UMR 5513, Ecole Centrale de Lyon, 36 av Guy de Collongue, 69134 Ecully Cedex, France

2. Everaxis Industries, 18 Rue de Montréal, BP 439, Ville la Grand, ANNEMASSE, 74108, France

3. Everaxis Aerospace & Defence, 5 Avenue Denis Papin, BP36, LE PLESSIS-ROBINSON, 92350, France

MOTS CLES

Collecteur électrique ; patine, tribofilm, spectroscopie Raman, usure, graphite

INTRODUCTION

Dans un contexte d'urgence climatique et de crise énergétique, l'intérêt croissant pour les énergies renouvelables, et en particulier l'éolien, amène à des besoins de plus en plus poussés en termes de performance et de durée de vie. La compréhension et l'optimisation des mécanismes d'usure des contacts glissants, utilisés notamment pour les collecteurs électriques, deviennent ainsi nécessaires. Les collecteurs « à contact » utilisant des balais métallographitiques glissant sur des bagues métalliques ont déjà fait l'objet d'études, et la création d'une « patine » – lit de débris transférés sur la surface de la bague – y a notamment été mise en évidence [1], [2]. Cependant, les mécanismes tribologiques amenant à la formation de cette patine ainsi que son influence sur la qualité du signal électrique transmis sont des sujets encore peu consensuels.

Dans cette optique, l'étude tribologique d'un contact électrique métallographitique glissant a été réalisée, à l'aide de moyens de caractérisation de surface tels que la microscopie optique, la Microscopie Electronique à Balayage (MEB), la spectroscopie de rayons X à dispersion d'énergie (EDX) ou la spectroscopie Raman. Ces analyses physico-chimiques de surface permettent de mieux comprendre les mécanismes tribologiques de transfert à l'échelle micrométrique, et de quantifier l'arrangement cristallin du graphite transféré.

MATERIEL ET METHODES

L'étude du contact électrique glissant a été réalisée sur un banc de test d'une structure proche de l'application industrielle (Figure 1). Le banc permet d'étudier 12 contacts en simultané. Des bagues en bronze sont empilées le long de l'axe de rotation, isolées électriquement les unes des autres. Sur chacune d'entre elles glissent deux balais, composés d'argent (majoritairement) et de graphite, montés sur l'ensemble stator. Les conditions de l'essai sont parfaitement identiques pour chacun des 12 contacts.

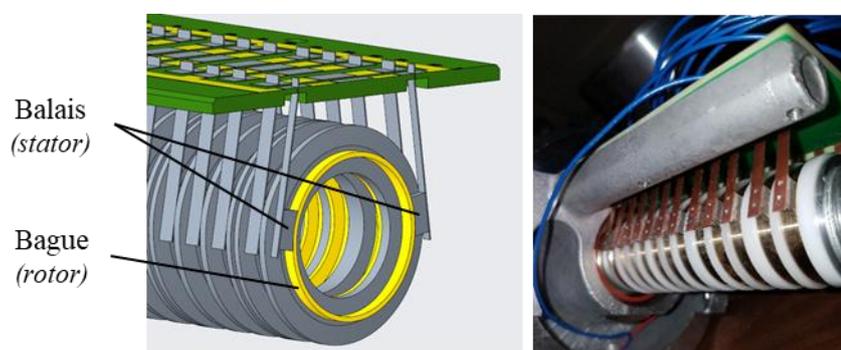


Figure 1. Vue 3D (à gauche) et photo (à droite) du banc de test

Le prélèvement d'une bague après un certain nombre de rotations permet d'obtenir un état arrêté du contact à cette durée de vie. En prélevant successivement les différentes bagues après des durées de vie croissantes, il est possible d'établir une évolution du contact, tant en termes de mécanismes de transfert que de structure et de composition de la patine.

Tout particulièrement, la spectroscopie Raman est une méthode de caractérisation qui permet d'estimer le degré d'organisation cristalline d'un graphite. Le rapport des intensités I_D/I_G des pics D et G sur le spectre d'un graphite est inversement proportionnel à l'arrangement cristallin de ce dernier. La Figure 2 montre le spectre d'un graphite HOPG (*Highly Oriented Pyrolytic Graphite*), connu pour avoir une structure graphitique très pure et très peu fautée. Le spectre présente donc un pic D très faible et donc un rapport I_D/I_G proche de 0, caractéristique de ce type de matériau. Pour des graphites moins purs et plus fautés on peut observer différentes évolutions sur le spectre, dont la plus remarquable est l'augmentation de l'intensité du pic D. Cet indicateur est l'un de ceux qui permet de quantifier l'évolution de la structure de la patine au cours de la vie du contact.

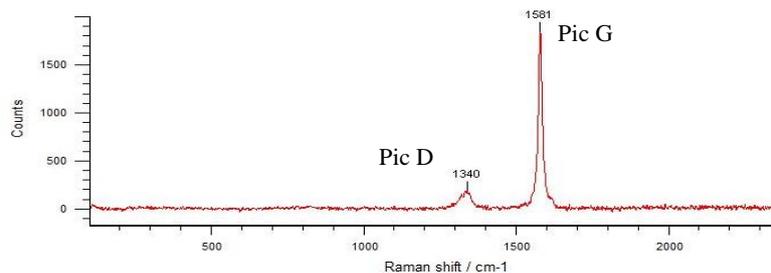


Figure 2. Spectre Raman d'un échantillon de HOPG (*Highly Oriented Pyrolytic Graphite*). Sa structure graphitique très peu fautée est caractéristique d'un rapport I_D/I_G proche de 0.

RESULTATS

La Figure 3 présente l'évolution du rapport I_D/I_G calculé à partir des spectres obtenus sur la surface des bagues après différentes durées de vie. Deux tendances claires ressortent de cette évolution :

- Entre 0 et 30 000 tours, il semble que le transfert à la surface de la bague soit dans un régime d'organisation cristalline progressive, comme le suggère la diminution du rapport I_D/I_G ;
- Après 30 000 tours, le rapport devient globalement constant et suit une asymptote jusqu'à la durée de vie maximale atteinte par nos essais (6 millions de tours).

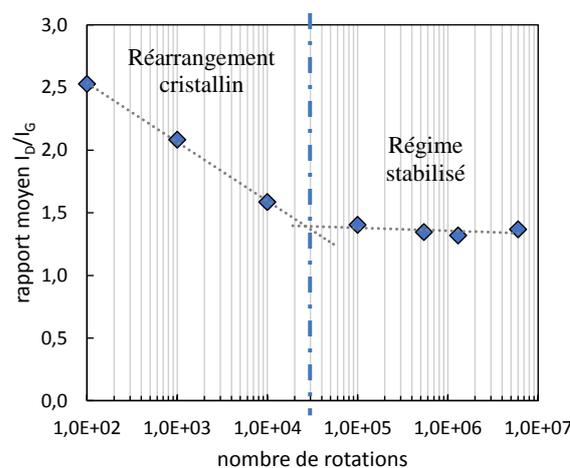


Figure 3. Evolution du rapport des intensités I_D/I_G du signal Raman du graphite sur la surface de la bague en fonction du nombre de rotations effectuées

Malgré la stabilité cristalline du graphite passés 30 000 tours, les analyses en microscopie optique montrent que les transferts continuent d'évoluer même après 5 000 000 de rotations. Sur la Figure 4 on peut voir l'homogénéité des transferts évoluer, ainsi que leur épaisseur moyenne, qui croît jusqu'à 100 000 tours puis diminue à nouveau jusqu'à 5 000 000 de tours (confirmé par des mesures en profilométrie interférométrique).

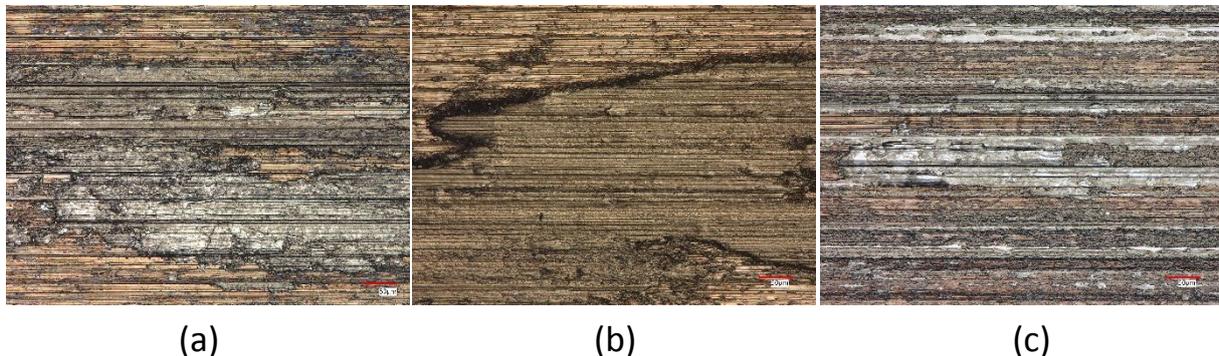


Figure 4. Images en microscopie optique de transferts sur bagues après 10 000 tours (a), 100 000 tours (b) et 5 000 000 de tours (c)

CONCLUSION

Les analyses en spectroscopie Raman de l'état de la patine à différentes durées de vies ont permis une meilleure compréhension de l'état cristallin de cette dernière au cours de la rotation. Il semble que le comportement se divise en deux phases : une étape de transfert de débris graphitiques et de réarrangement cristallin progressif entre 0 et 30 000 tours, puis une seconde phase stabilisée où la patine semble avoir atteint sa structure finale. Le passage successif des balais sur les transferts joue probablement un rôle dans le réarrangement cristallin du graphite, en compactant les débris d'usure pulvérulents déposés à la surface. Cependant l'homogénéité des transferts et leur épaisseur continuent clairement d'évoluer, même après 5 000 000 de tours. Le comportement de la patine semble donc plus complexe, et un comportement cyclique de construction-destruction est probable [3].

L'évolution microstructurale de la patine, qui est localisée au sein du contact électrique, joue probablement un rôle dans la qualité et la stabilité de ce dernier. Le suivi de la résistance de contact au cours de la rotation fait l'objet d'une étude actuellement et permettra de corrélérer l'état de la patine à l'échelle microscopique, détaillée ici, avec la performance électrique, macroscopique, du contact. Des mesures de conductivité électrique à l'échelle nanométrique par C-AFM (Conductive-Atomic Force Microscopy), sont aussi prévues pour estimer les caractéristiques électriques intrinsèques de cette patine.

Références

- [1] S. Dillich et D. Kuhlmann-Wilsdorf, « Effects of Surface Films on the Performance of Silver-Graphite (75 wt% Ag, 25 wt% C) Electric Brushes », *IEEE Trans. Comp., Hybrids, Manufact. Technol.*, vol. 3, n° 1, p. 37- 41, mars 1980, doi: 10.1109/TCHMT.1980.1135600.
- [2] J. Johnson, « Sliding Monolithic Brush Systems for Large Currents », *IEEE Trans. Comp., Hybrids, Manufact. Technol.*, vol. 10, n° 1, p. 3- 17, mars 1987, doi: 10.1109/TCHMT.1987.1134711.
- [3] M. V. R. Skov Jensen, « Long-term high resolution wear studies of high current density electrical brushes », in *Proceedings of the Fifty-First IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, 2005.*, Chicago, IL, USA: IEEE, 2005, p. 304- 311. doi: 10.1109/HOLM.2005.1518261.

Comportement électrique et tribologique des contacts glissants or/or d'un collecteur tournant type cil/bague

Corentin Ferreira^{1,2}, Aurore Brézard-Oudot¹, Manon Isard², Sophie Noel¹, Frédéric Houzé¹ et Philippe Testé¹

1. Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, CNRS – UMR 8507, Laboratoire de Génie Électrique de Paris, 91192, Gif-sur-Yvette, France

2. Everaxis Aerospace & Defence, 92350, Le Plessis-Robinson, France

MOTS CLES

Contact or/or, contact électrique glissant, tribomètre

INTRODUCTION

Les applications aéronautique et défense obligent à une grande fiabilité des collecteurs électriques tournants sur de longues durées de vies, ce qui demande une bonne compréhension du système tribologique et notamment du mécanisme d'usure en place. Le contact glissant d'un collecteur électrique tournant présenté dans cette étude permet au courant de circuler entre les structures fixe et rotative d'un système. Il est lubrifié avec une huile ester synthétique, et est composé d'un cil en alliage d'or de 0,4 mm de diamètre confiné dans un « Vé » d'une bague revêtue d'un alliage d'or dur de 40 mm de diamètre. La fiabilité du contact dans un tel système est notamment permise par la redondance des contacts cil/bague.

La majorité des essais visant à comprendre les phénomènes de contact tribologique et électrique est effectuée sur des modèles réduits de collecteurs tournants. Dans de nombreuses études [1][2], la compréhension des propriétés électriques et tribologiques du contact est obtenue en collectant la tension de contact au cours de l'essai et en analysant les états de surface après essai. Occasionnellement, le contrôle du coefficient de frottement pendant l'essai est également effectué. Par exemple, Holzapfel [3] a instrumenté un contact cil/bague permettant de suivre la résistance de contact, grâce à la méthode 4 pointes, parallèlement à la force de frottement au cours de l'essai.

Par ailleurs, de nombreux travaux ont été réalisés sur le contact électrique glissant métal-métal sans être spécifiques aux collecteurs tournants. Pour l'étude des contacts entre métaux, l'utilisation d'un tribomètre est courante. Antler [4] a étudié notamment le contact entre les métaux nobles. Dans ses travaux, il a utilisé un tribomètre pion/plan instrumenté pour suivre le coefficient de frottement et la résistance de contact pendant l'essai.

Dans cette étude, il a été fait le choix d'adapter un dispositif d'essai de type tribomètre, permettant de mesurer en parallèle les propriétés de frottement et la résistance de contact.

DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Le dispositif expérimental utilisé est le tribomètre TRB³ du fabricant Anton Paar, permettant d'étudier le contact bille/disque dans des conditions de glissement pur. Pour être représentatif du contact réel, il a été nécessaire d'adapter ce tribomètre en termes de géométrie de contact et de passage de courant dans le contact (Figure 1).

Ainsi, la face d'un « Vé » de la bague est représentée par un disque revêtu suivant le même protocole que la bague. Quant à la bille de la configuration initiale du tribomètre, elle est remplacée par un cil, identique à celui d'un collecteur tournant, incurvé et monté sur un support spécifique. Le contact initial bille/disque du tribomètre est donc remplacé par un contact cil incurvé/disque dont les matériaux sont identiques au cas réel, mais dont la géométrie de contact et les pressions diffèrent (0,59GPa pour le contact cil incurvé/disque contre 0,28GPa dans le cas réel).

Pour le passage de courant, un câble est directement relié au cil fixe grâce au design du support spécifique. Du côté du disque, l'opération est plus complexe à cause de la rotation de ce dernier. À

l’instar du frottement d’un cil dans un « Vé » de la bague, la solution adoptée consiste à utiliser le flanc du disque en y faisant frotter un pinceau constitué d’un ensemble de cils. Pour mesurer la tension de contact au cours de l’essai, la méthode 4 pointes a été mise en place en ajoutant une deuxième connexion sur chaque échantillon. La tension de contact est acquise grâce à deux appareils : le tribomètre, permettant d’avoir des mesures directement synchronisées avec les données internes de ce dernier, et un système d’acquisition rapide, permettant de mieux comprendre les soudaines augmentations de tension.

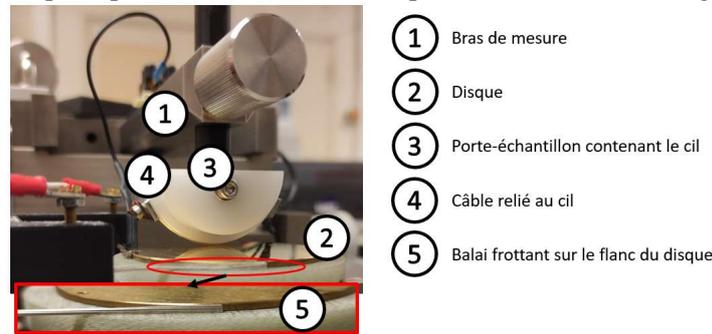


Figure 1: Photographie du tribomètre modifié

RESULTATS & DISCUSSION

Les premiers résultats de mise en place de cet appareil modifié ont permis de dresser de premières hypothèses sur le mécanisme d’usure grâce à des essais de différentes durées, illustrées ici pour les conditions suivantes : Vitesse de rotation : 500RPM ; Charge : 0,25N ; Intensité : 100mA ; Nombre de tours : 50 000 ; Fréquence d’acquisition : 100Hz.

L’analyse des états de surface au MEB-EDX souligne une différence notable sur les éléments présents dans les traces d’usure du disque et du cil. Lors des essais courts, entre 300 et 1 200 tours, les débris issus de l’usure du cil sont majoritaires dans le contact (Figure 2.A – Blanc), alors que, lors des essais longs, 50 000 tours, ces débris sont rares voire inexistant par rapport à ceux issus de l’usure du disque (Figure 2.B – Rose). Les visuels 3D du cil après 50 000 tours, obtenus avec un profilomètre optique, montrent un aplanissement de la géométrie cylindrique du cil prouvant une usure de ce dernier. De plus, l’analyse EDX du cil après 50 000 tours montrent un transfert de matière du disque vers le cil formant une couche écrouie à la surface de ce dernier. Cela met en évidence qu’il y a une transition entre une usure initialement majoritaire du cil et une usure majoritaire du disque.

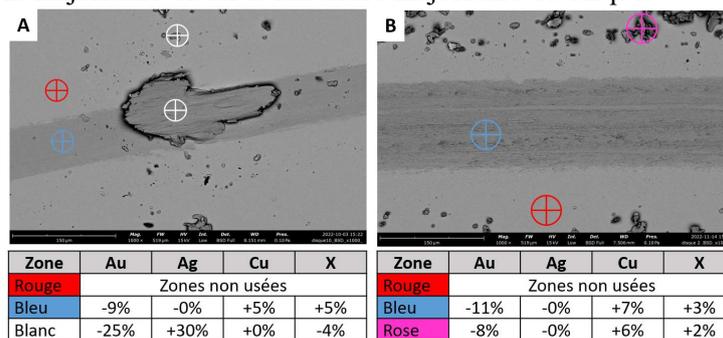


Figure 2: Observation au MEB-EDX des traces d’usure des disques – BSD – x1000 – A. Après 300 tours ; B. Après 50 000 tours

Les courbes du coefficient de frottement et de la résistance de contact en fonction du nombre de tours suivent le même type de tendance, en montrant qu’un événement se déroule dans les premières rotations (Figure 3). Une augmentation de l’amplitude du coefficient de frottement est corrélée avec la présence de pics de la résistance de contact. Cet événement peut être également lié à la transition d’usure. En effet, une forte usure du cil entraîne la formation de débris en surface. Ces débris provoquent, d’une part une double résistance de contact en série, et d’autre part une augmentation du risque de pertes de contact. C’est pourquoi l’amplitude du coefficient de frottement et de la résistance de contact augmentent. Avec le passage répétitif, ces débris issus du cil s’étalent, se fragmentent et se dispersent dans la trace d’usure du disque. L’écrouissage de la surface du cil entraîne une augmentation de l’usure

du disque jusqu'à ce qu'elle devienne majoritaire. Enfin, ces débris issus du disque se transfèrent sur le cil entraînant la formation d'une couche à la surface du cil. Ainsi, le frottement initial entre deux alliages d'or différents se transforme en un frottement entre deux alliages d'or similaires, celui du disque. Dès lors, le système tribologique a atteint un état stable.

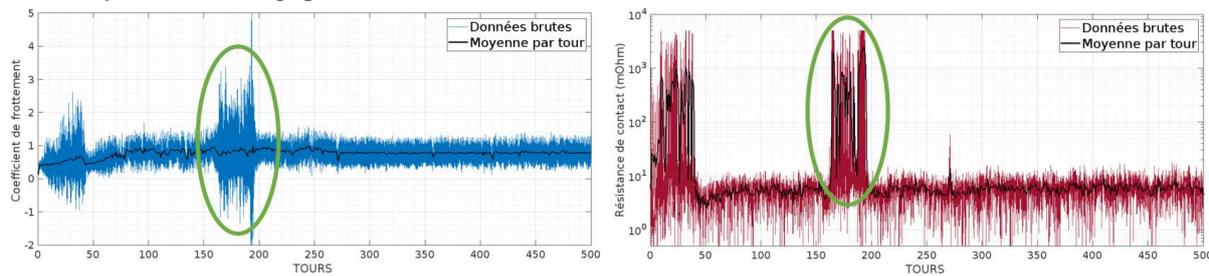


Figure 3: Coefficient de frottement et résistance de contact en fonction de la distance (zoom sur les 500 premiers tours) – Vitesse de rotation : 500RPM ; Charge : 0,25N ; 50 000 tours ; Intensité : 100mA ; Fréquence d'acquisition : 100Hz

CONCLUSION

Cet article présente un nouveau dispositif simplifié permettant d'étudier les propriétés électriques et tribologiques des contacts glissants cil/bague d'un collecteur tournant. Ce dispositif a été adapté à partir d'un tribomètre initialement configuré pour un contact bille/disque, modifié en une configuration représentative des matériaux du cas réel, mais en simplifiant la géométrie de contact et en surévaluant la pression de contact. La connexion électrique double du cil et du disque offre la possibilité de mesurer la résistance du contact par la mesure 4 pointes. Ainsi, ce dispositif permet l'acquisition simultanée du coefficient de frottement et de la résistance de contact pendant l'essai.

Les premiers résultats obtenus ont permis de dresser une hypothèse sur le mécanisme d'usure du contact qui peut être résumé comme suit :

1. Les premières rotations entraînent une usure majoritaire du cil conduisant à un transfert de matière du cil vers le disque. La formation de débris à l'interface implique une augmentation des risques de perte de contact et a une influence directe sur la résistance de contact et le coefficient de frottement.
2. Avec le frottement, les débris du cil se dispersent et se fragmentent dans la trace d'usure du disque, ce qui entraîne progressivement un écrouissage de la surface du cil.
3. L'usure majoritaire du cil se transforme en une usure majoritaire du disque, entraînant la formation de débris issus du disque.
4. Le transfert de matière du disque vers le cil implique la formation d'une couche à la surface du cil. Le frottement initial entre deux alliages d'or différents se transforme en frottement entre deux alliages similaires.

Cette hypothèse doit être maintenant développée par des investigations supplémentaires tels que des essais plus courts pour mieux comprendre la phase de rodage, et donc comprendre l'ajustement des surfaces avant d'atteindre l'état d'équilibre. D'autres essais complémentaires viseront à étudier l'impact de divers paramètres tels que la vitesse de rotation, la lubrification, la force normale ou l'intensité de courant.

Références

- [1] E. Chevallier (2014) « Définition d'indices de qualité du contact glissant métallique : Signatures électriques de l'état de surface », Thèse de doctorat, Université de Picardie Jules Verne
- [2] T. Ueno, M. Aoyagi, K. Sawa et al. (2014) « Fundamental study of electrical sliding contacts comprising a Au-coated slip ring and Au-brush », ICEC, pp. 1-6.
- [3] C. Holzapfel (2019) « Test categories for characterization of sliding electrical contacts », IEEE Holm, pp. 309-316.
- [4] M. Antler (1964) « Processes of metal transfer and wear », Wear, **58** (2), pp. 181-203.

Etude expérimentale et simulation des phénomènes fretting fatigue dans les contacts Aube/Disque de turbo réacteurs: influence de l'usure.

S. Fouvry¹, P. Arnaud², B. Berthel¹, R. Ferre^{1**}, J. Meriaux³

¹ Université de Lyon, CNRS, ECL, LTDS, UMR5513, 69130, Ecully, France

² Centre des Matériaux, Ecoles des Mines de Paris, PSL, 91000, Evry, France

³ Safran Aircraft Engines, 77550 Moissy-Cramayel, France.

** Affiliation actuelle : Technipfmc

* auteur pour correspondance : siegfried.fouvry@ec-lyon.fr

Mots clefs: Fretting Fatigue, Fissuration, Usure

INTRODUCTION

Les contacts aube/disque des turboréacteurs sont soumis à des chargements très complexes impliquant des sollicitations de fatigue et des efforts normaux variables, mais aussi des micro-déplacements de fretting induits par des perturbations aérodynamiques. Ces sollicitations dites de « fretting fatigue » peuvent induire des dégradations de fissuration ou d'usure qui restent difficiles à prédire. Différentes modélisations ont été mises en place pour tenter de formaliser ces phénomènes mais cela implique un « recalage » sur des expérimentations représentatives. L'objectif de ce travail est de présenter une expérimentation originale capable de reproduire au mieux les chargements réels (Fig. 1) et en particulier, de prendre en compte les phénomènes d'usure induits par les macro-glissements générés durant les phases LCF de décollage et d'atterrissage [1, 2].

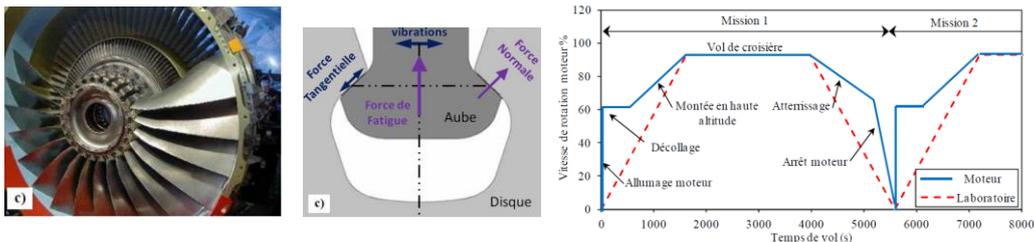


Fig. 1 : Illustration des chargements imposés dans un contact aube/disque combinant des sollicitations LCF (Décollage & Atterrissage) et des sollicitations HCF de fretting durant le vol de croisière.

1. DEVELOPPEMENT D'UNE EXPERIMENTATION REPRESENTATIVE

La figure 2 illustre l'expérimentation mise en place au LTDS pour reproduire à une échelle représentative les chargements de fretting fatigue imposés dans un contact aube/disque. Trois actionneurs asservis indépendamment permettent d'appliquer de façon découplée les chargements de fatigue (σ), les déplacements de fretting (débattement δ => force tangentielle Q) et la fluctuation de l'effort normal (P) durant les séquences LCF (atterrissage et décollage). Le montage permet aussi d'aligner des contacts dits poinçon/plan permettant de reproduire le profil de pression imposé dans le contact réel. Pour illustrer les capacités du banc expérimental, deux configurations de chargement ont été étudiées. Pour ces deux configurations on applique une même sollicitation de fatigue ($\sigma_{\max} = 400\text{MPa}$, $R = 0.01$) et des sollicitations HCF de fretting en glissement partiel durant les phases de croisière ($Q^*/P = 0.4$ soit $Q^* = \pm 700\text{N/mm}$ et $P = 1750\text{N/mm}$). La différence se situe au niveau de la simulation des séquences d'atterrissage et de décollage (séquences dites LCF). Le chargement « A » consiste à maintenir l'effort normal constant et à asservir le déplacement du vérin de fretting de façon à ce que la force tangentielle du contact (Q) reste nulle durant la séquence LCF. Le contact ne bascule jamais en glissement total de sorte que l'usure du contact est négligeable.

Le chargement « B » est lui plus représentatif de la réalité. Durant la séquence LCF, le contact bascule en glissement total induisant un glissement généralisé et l'usure de l'interface. On peut illustrer la séquence LCF du chargement « B » en traçant le cycle de fretting Q - δ (Fig. 2). Celui présente une hystérésis dont l'aire correspond à l'énergie de frottement dissipée dans l'interface qui induira l'usure.

La forme triangulaire du cycle de fretting est caractéristique d'un cycle en glissement total quand l'effort normal évolue durant le cycle de chargement [3].

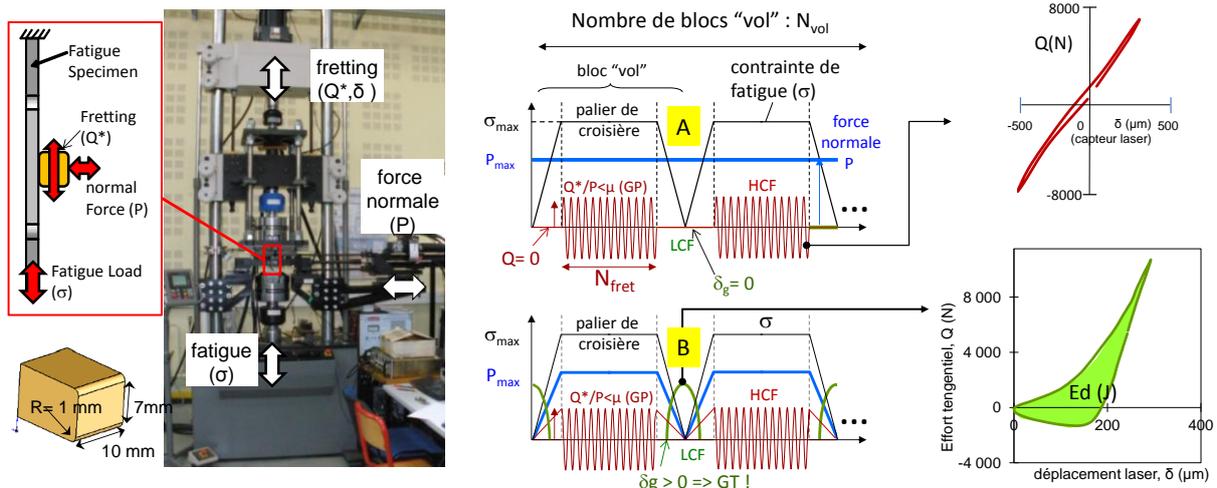


Fig. 2 : Illustration de la démarche expérimentale mise au LTDS en place pour « simuler expérimentalement » le contact aube/disque d'un turbo-réacteurs [1, 2].

2. RESULTATS

La figure 3 trace l'évolution du nombre de vol N_{vol} associé à la rupture de l'éprouvette en fonction du nombre de cycles de fretting en glissement partiel N_{fret} imposés durant les paliers de croisière ($Q^*/P = 0.4$).

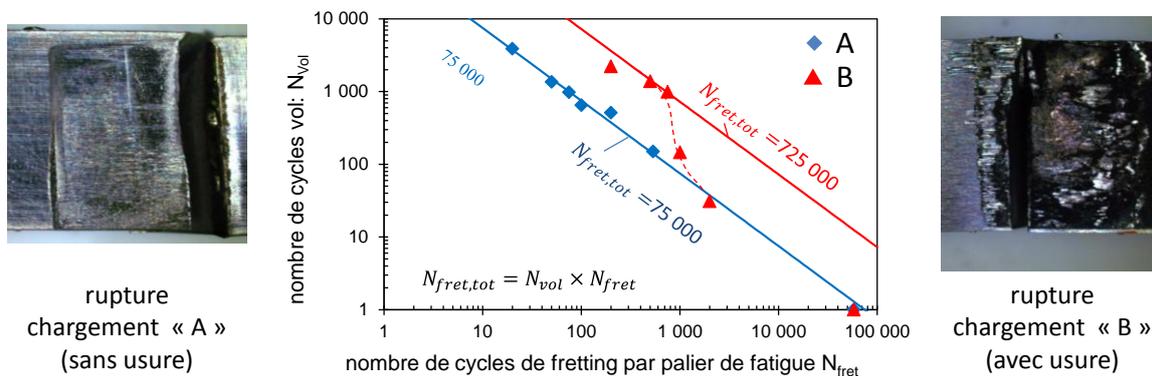


Fig. 3 : Diagramme « $N_{vol} - N_{fret}$ » illustrant la durée de vie à rupture du contact TA6V/TA6V : Evolution du nombre de vol N_{vol} admissible en fonction de la longueur du palier HCF N_{fret} [1, 2].

Il est intéressant de noter que pour les chargements « A » (sans usure) la durée de vie avant rupture est associée à un nombre total de cycle HCL constant soit $N_{fret,tot} = N_{vol} \times N_{fret} = 75\,000 \text{ cycles}$. Ceci suggère que les séquences LCF influencent peu la durée de vie en fretting fatigue pour le chargement A. En revanche, pour les chargements de type « B », qui autorisent une mise en glissement total et donc l'usure des contacts, on note une forte dépendance de la durée de vie HCF totale. Si les paliers N_{fret} sont longs, le nombre de vol N_{vol} (LCF) admissibles avant rupture est faible. L'usure du contact est limitée et la durée de vie obéit comme pour le cycle de type A à un seuil tel que $N_{fret,tot} = 75\,000$. En revanche, pour des paliers N_{fret} plus courts, le nombre de cycle de vol (N_{vol}) augmente et l'usure générée permet alors une accommodation de l'interface (réduction des pics de pression) ce qui engendre une très forte augmentation de la durée de vie HCF totale. Ainsi, l'effet bénéfique de l'usure apparaît à partir de $N_{vol} = 40$ et semble se stabiliser dès $N_{vol} = 1000$ après quoi, la durée de vie totale en LCF atteint un seuil tel que $N_{fret,tot} = 725\,000 \text{ cycles}$. Ainsi, on démontre l'effet bénéfique de l'usure vis-à-vis du phénomène de fretting fatigue qui après seulement 1000

séquences LCF permet d'augmenter la durée de vie HCF totale d'un facteur 10. Pour simuler ces phénomènes, un modèle FEM est mis en place [4]. Basé sur une approche incrémentale de cumul de dommages, celui-ci consiste à modéliser le processus d'amorçage et de propagation des fissures induits par les chargements HCF (croisière) et LCF (atterrissage & décollage). Le modèle simule aussi l'usure du contact générée par les grands glissements durant les phases LCF à partir d'une loi d'usure basée sur le concept de densité d'énergie de frottement (Fig. 4). L'usure réduit les pics de pression en bordure de contact et in fine l'intensité du risque de fissuration quantifiée à partir du critère de fatigue SWT. L'objectif de cette modélisation est de prédire à terme les courbes N_{vol} - N_{fret} générées respectivement par les chargements A (sans usure) et B (avec usure).

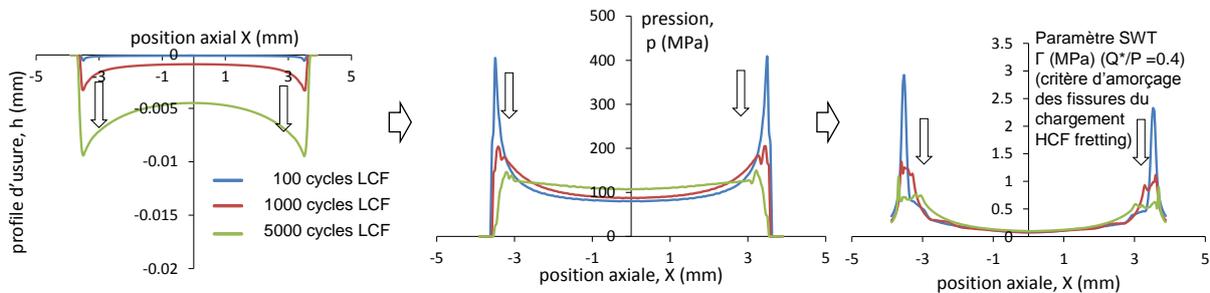


Fig. 4 : Illustration de l'effet de l'usure induit par les chargements LCF en glissement total (chargement B) sur l'évolution du profil de pression du contact poinçon/plan et in fine sur la réduction du paramètre SWT associé à l'amorçage des fissures.

3. CONCLUSION

Un banc de fretting fatigue « triple vérins » a été mis en place permettant de reproduire plus finement les processus de fretting fatigue générés dans une interface pied d'aube/disque d'un turboréacteur. Des premiers travaux réalisés sur un contact TA6V/TA6V montrent une forte différence vis-à-vis de l'endurance à rupture entre un cycle de chargement n'impliquant pas de glissement durant les phases LCF de décollage et d'atterrissage (A) et un cycle de chargement permettant de simuler cette mise en glissement (B). Un nouveau diagramme « N_{vol} - N_{fret} » est proposé pour formaliser ces phénomènes. On montre que si aucun glissement n'est généré durant les phases LCF, la durée de vie en rupture de l'interface peut être associée à un nombre total de cycle de fretting en glissement partiel (HCF) constant : $N_{fret,tot} = N_{vol} \times N_{fret} = N_{fret,th}$. Si un glissement total est activé durant la séquence LCF tel que cela est observé dans la réalité, et que l'usure générée est suffisante ($N_{LCF} = N_{vol} > 1000$), on observe alors une très forte augmentation d'un facteur 10 de l'endurance totale HCF associée ($N_{fret,tot} = 725\,000$ cycles). Ces travaux confirment la nécessité de reproduire expérimentalement les phénomènes d'usure générés durant les séquences HCF de décollage et d'atterrissage pour prédire de façon fiable l'endurance d'un contact aube/disque. Ils soulignent aussi la nécessité de développer des stratégies palliatives (traitements de surface) permettant d'accélérer l'accommodation des interfaces pour réduire les profils de pression et de cisaillement. Ils démontrent aussi la nécessité de mieux en compte l'effet de l'usure pour simuler les phénomènes de fretting fatigue.

Références

- [1] J. Meriaux, « Etude expérimentale et modélisation de l'endommagement du contact aube-disque de soufflante soumis à des chargements de Fretting Fatigue », 02/07/2010, Dir. de Thèse : S. Fouvry, N° 10 ECL 2010-14.
- [2] R. Ferre, « Etude expérimentale et modélisation de la durabilité d'un contact aube/disque de soufflante grenailé revêtu soumis à des chargements de Fretting/Fatigue/Usure », 2013, Dir. de Thèse : S. Fouvry, ECL, N° 2013-12.
- [3] B. van Peteghem, S. Fouvry, J. Petit, Effect of variable normal force and frequency on fretting wear response of Ti-6Al-4V contact, *Wear*, 2011, 271 (9-10) : 1535-1542.
- [4] P. Arnaud, S. Fouvry, S. Garcin, Wear rate impact on Ti-6Al-4V fretting crack risk: Experimental and numerical comparison between cylinder/plane and punch/plane contact geometries, *Tribology International* 108 (2017) 32-47.

INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR D'UN « FLASH » DE CUIVRE SUR LE COMPORTEMENT TRIBOLOGIQUE D'UN CONTACT ÉLECTRIQUE MULTICOUCHES NI-CU-AG SOUMIS À DES SOLLICITATIONS DE FRETTEMENT USURE

L. Goeury^{1,2}, S. Fouvry¹, S. Baydoun¹, O. Graton¹, et P. Gendre²

1. LTDS, CNRS UMR 5513, Ecole Centrale de Lyon, 36 av Guy de Collongue, 69134 Ecully, France

2. PEM - AST, Siaugues Saint Romain, 43300 Siaugues-Sainte-Marie, France

MOTS CLES

Fretting, résistance électrique de contact, revêtement d'argent, flash cuivre, adhérence

INTRODUCTION

De nos jours, les connecteurs électriques sont de plus en plus utilisés dans les composants industriels. La plupart des systèmes embarqués sont soumis à des vibrations qui engendrent des micro-glissements (fretting usure) dans les contacts. Ces sollicitations tribologiques induisent la formation de lits de débris qui une fois oxydés engendrent une augmentation de la résistance électrique et une défaillance de la transmission des signaux. Pour limiter la formation des lits de débris oxydés dans les contacts, on applique en général des dépôts de matériaux nobles (or ou argent). L'argent est souvent privilégié pour des applications dites de grandes séries telles que l'automobile en raison de son plus faible coût que l'or. Dans le cadre de cette étude nous nous focaliserons sur des dépôts Ag. Ces dépôts réalisés via des procédés électrolytiques sont appliqués sur des substrats soit en bronze soit en laiton. Un problème souvent rencontré concerne la diffusion du cuivre en provenance du substrat à travers la couche d'argent jusqu'en surface. Le cuivre réagit alors avec l'oxygène de l'air ambiant et donne lieu à des oxydes CuO très pénalisants pour la conduction électriques. Pour pallier à ce problème, on applique une sous couche de nickel qui bloque la diffusion du cuivre en provenance du substrat ce qui donne lieu au système tribologique Ni/Ag//Ag/Ni [1]. Cependant, l'adhérence entre les couches de nickel et d'argent est faible ce qui peut induire sous l'effet d'un contact frottant des phénomènes de décohésion. Pour améliorer l'adhésion entre les couches de nickel et d'argent, on applique une fine couche intermédiaire dite « flash » de cuivre. Ce flash de cuivre doit être suffisamment épais pour permettre une bonne adhésion du dépôt argent et dans le même temps pas trop épais pour éviter une diffusion importante du cuivre en surface. L'objectif de ce travail est de déterminer l'épaisseur optimale de ce flash de cuivre « $e_{Cu,opt}$ » pour une application de fretting usure.

1. DEMARCHE EXPERIMENTALE

Les connecteurs électriques dits à faible courant sont classiquement qualifiés à l'aide de tests vibratoires très peu instrumentés. L'idée étant que plus l'intensité des vibrations est importante, plus les déplacements aux contacts sont conséquents, plus l'usure des surfaces est rapide et plus l'endurance de la Résistance Électrique de Contact (ECR) se trouve diminuée. Cependant, ce type d'essai ne permet pas de quantifier l'effet de l'amplitude de glissement voire de mesurer le coefficient de frottement opérant dans l'interface. Pour étudier les phénomènes de fretting usure, on propose ici d'utiliser un essai de fretting spécifiquement développé pour les applications de contacts électriques (figure 1a). Le contact est obtenu par l'application de deux surfaces cylindres croisés à 90° (Oméga croisés) dont le rayon cylindrique est égale à $R = 2.35$ mm. Cette configuration de contact équivalente à un contact sphère/plan permet d'étudier des interfaces hétérogènes ou homogènes. Dans le cas présent, on applique un contact homogène c'est-à-dire que les deux contre corps sont similaires. Un capteur piézo-électrique permet de mesurer l'effort tangentiel Q (N) et un capteur laser le déplacement relatif δ (μ m). L'effort normal est appliqué à l'aide d'une masse morte $P(N)$. Il est ainsi possible de

tracer le cycle de fretting $Q-\delta$ (Fig. 1c). À partir du cycle de fretting on calcule l'énergie de frottement E_d (J) qui correspond à l'aire du cycle. Enfin, on détermine l'amplitude de glissement effective δ_s^* (μm) estimée sur le cycle de fretting quand $Q=0$. Dans le cadre de cette étude on applique un chargement de fretting référence qui correspond à une condition de glissement total telle que : $P = 3\text{N}$, $\delta_s^* = \pm 9\mu\text{m}$, $RH=10\%$, $T=25^\circ\text{C}$ et $f=30\text{Hz}$.

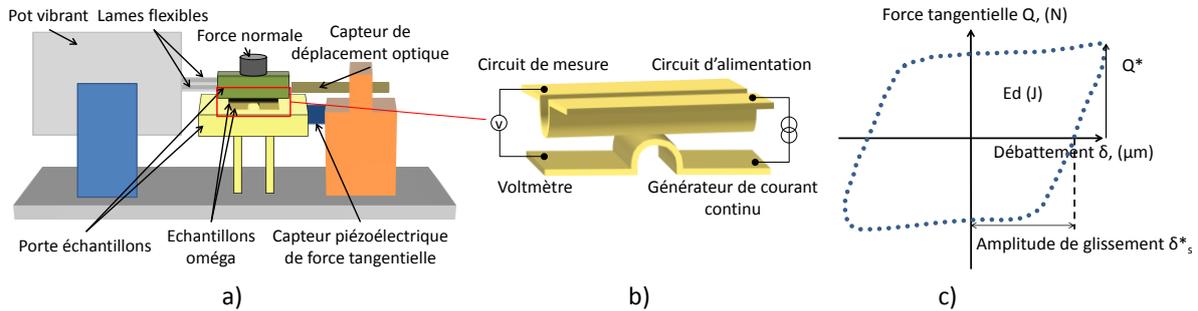


Figure 1: a) Schéma d'un montage de test de fretting ; b) Schéma de la configuration cylindres croisés et de la mesure électrique ; c) cycle de fretting.

Le suivi de la résistance électrique du contact est obtenu par une mesure 4 points. Pour cela on impose un courant constant $I = 5 \text{ mA}$ et on mesure l'évolution de la tension U ce qui permet de suivre celle de la résistance électrique du contact soit $R_c = U/I$. Dans le cadre de cette étude, les dépôts électrolytiques sont appliqués sur des substrats cylindriques (Omega) de laiton CuZn37 (Fig. 2a). On applique des épaisseurs constantes de nickel ($e_{Ni} = 2\mu\text{m}$) et d'argent ($e_{Ag} = 2\mu\text{m}$). En revanche, on fait varier l'épaisseur de la couche intermédiaire de cuivre (Flash) soit $e_{Cu} = 0, 0.02, 0.04, 0.1, 0.2, 0.4, 1.0$ et $2 \mu\text{m}$. Pour chaque configuration de dépôt on réalise deux échantillons « Omega » identiques pour établir un contact homogène.

2. RESULTATS

La figure 2b trace l'évolution de la résistance électrique pour un contact sans flash de cuivre ($e_{Cu}=0\mu\text{m}$) et un contact présentant un flash de cuivre ($e_{Cu}=0.4\mu\text{m}$). Les deux évolutions sont caractérisées par un palier initial de faible résistance électrique suivi d'une montée brusque de cette dernière qui caractérise la défaillance du contact. On note cependant que la durée de vie du contact $e_{Cu}=0.4\mu\text{m}$ est très supérieure (de l'ordre du double) de celle mesurée pour le contact sans flash de cuivre $e_{Cu}=0\mu\text{m}$.

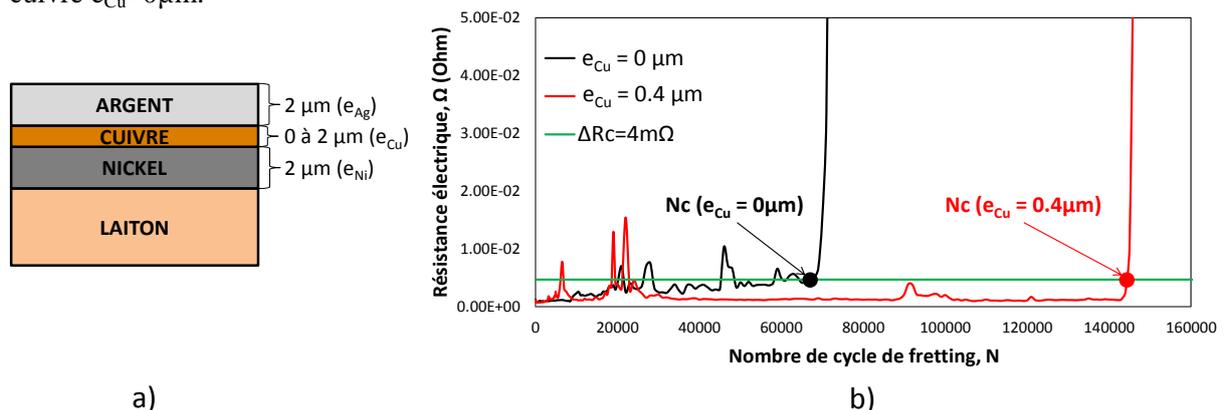


Figure 2: a) Structure des dépôts étudiés ; b) Evolution de la résistance électrique pour deux configurations flash cuivre $e_{Cu}=0\mu\text{m}$ et $e_{Cu}=0.4\mu\text{m}$ ($e_{Ag} = e_{Ni} = 2\mu\text{m}$, $P = 3\text{N}$, $\delta_s^* = \pm 9\mu\text{m}$, $RH=10\%$, $T=25^\circ\text{C}$ et $f=30\text{Hz}$).

Pour quantifier la durée de vie électrique du contact on détermine le nombre de cycles de fretting N_c tel que la variation de la résistance électrique depuis le début de l'essai est supérieure à $4 \text{ m}\Omega$ soit : N_c tel $\Delta R > \Delta R_c = 4\text{m}\Omega$. La résistance électrique peut être très fluctuante et après une montée soudaine elle peut tout aussi redescendre rapidement au-dessous du seuil $\Delta R_c = 4\text{m}\Omega$. Aussi pour

établir une défaillance « confirmée », on considère N_c tel $\Delta R > \Delta R_c = 4\text{m}\Omega$ que si la condition $\Delta R > \Delta R_c$ est vérifiée sur une durée de plus de $N_{\text{decay}} = 10000$ cycles après N_c . En appliquant ce protocole on détermine ainsi $N_c (e_{\text{Cu}} = 0\mu\text{m}) = 70000$ cycles et $N_c (e_{\text{Cu}} = 0\mu\text{m}) = 140000$ cycles. Afin d'étudier l'influence de l'épaisseur du flash de cuivre, les différents dépôts ont été testés en imposant une même condition référence ($P = 3\text{N}$, $\delta_s^* = \pm 9\mu\text{m}$, $\text{RH} = 10\%$, $T = 25^\circ\text{C}$ et $f = 30\text{Hz}$). La figure 3 trace l'évolution des durées électriques obtenues en fonction de l'épaisseur du flash cuivre (e_{Cu}).

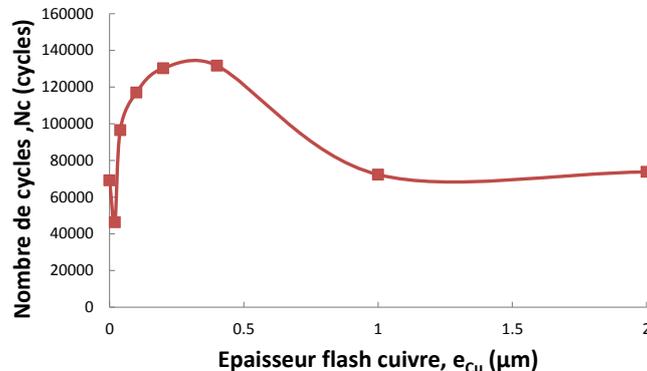


Figure 3: a) Courbe représentant l'influence de l'épaisseur de cuivre sur l'endurance de la résistance électrique ($\Delta R > \Delta R_c = 4\text{m}\Omega$ pendant $N_{\text{decay}} = 10000$ cycles).

On observe un comportement non monotone. Pour les faibles épaisseurs, l'endurance N_c augmente de façon très rapide avec e_{Cu} jusqu'à une endurance maximale $N_c = 140000$ cycles lorsque $e_{\text{Cu}} = 0.4\mu\text{m}$. En revanche, pour des épaisseurs e_{Cu} plus élevées, on observe une décroissance asymptotique autour de $N_c = 70000$ cycles. Ces travaux mettent en évidence un optimum pour l'épaisseur du flash cuivre tel que $e_{\text{Cu,opt}} = 0.4\mu\text{m}$.

CONCLUSION

La présence d'un flash cuivre entre le dépôt de nickel et d'argent a un impact bénéfique sur l'endurance des contacts électriques. On met ici en évidence deux phénomènes distincts. Pour une épaisseur comprise entre $e_{\text{Cu}} = 0$ et la valeur optimale ($e_{\text{Cu,opt}} = 0.4\mu\text{m}$), une augmentation de N_c est observée. Cette variation peut s'expliquer par une augmentation de l'adhésion de l'argent. D'un point de vue du potentiel électrochimique standard des couples argent, cuivre et nickel, un dépôt d'argent aura plus de facilité à adhérer sur du cuivre que sur du nickel. Au-delà de cette épaisseur optimale un deuxième phénomène survient. Une diminution de N_c est observée jusqu'à atteindre un palier correspondant à la valeur de la référence sans cuivre. Cela suggère un processus compétitif entre l'augmentation de l'adhérence et la diffusion du cuivre venant du flash à travers la couche d'Argent. Un processus d'oxydation engendre alors la formation d'oxydes de cuivre en surface qui pénalise la conduction électrique. Pour conclure, l'addition d'un flash cuivre permet une amélioration de l'endurance des contacts électriques en améliorant l'adhésion du dépôt argent. En revanche, il ne faut pas excéder une épaisseur optimale $e_{\text{Cu,opt}} = 0.4\mu\text{m}$ au-delà de laquelle des processus de diffusion de cuivre à travers la couche d'argent peuvent dégrader les performances électriques de l'interface.

REFERENCES

- [1] J. Laporte, O. Perrinet, S. Fouvry (2015) « Prediction of the electrical contact resistance endurance of silver-plated coatings subject to fretting wear using a friction energy density approach », *Wear* 330-331(2015) pp.170–181 (<https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.12.006>).
- [2] S. Fouvry, P. Jedrzejczyk, P. Chalandon (2011) « Introduction of an exponential formulation to quantify the electrical endurance of micro-contacts enduring fretting wear: Application to Sn, Ag and Au coatings », *Wear* 330-331(2015) pp.170–181 (<https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.12.006>).

Rayures ductiles pour atténuer des rayures aiguës et des impacts sur disques durs

D. Favier, C. Gauthier

Université de Strasbourg, CNRS, Institut Charles Sadron UPR22, F-67000 Strasbourg, France

MOTS CLES

Rayure, disque dur, portance, restauration, lecture

INTRODUCTION

Depuis le milieu du XX^{ème} siècle, le stockage des données numériques a largement recours aux disques durs. En 1956, le premier système de disque dur - l'IBM 350 - est dévoilé au public. Il est utilisé dans le RAMAC 305 (RAMAC pour « *Random Access Method of Accounting and Control* »). Sa production commerciale commence en juin 1957 et, son prix est alors de 50 000 dollars pour 5 mégaoctets. En 7 décennies la capacité de stockage des disques durs a augmenté considérablement avec des densités d'écriture qui sont passées de 10^{-6} Gb/in² à 10^4 Gb/in². Cette augmentation est corrélée à la diminution de la distance entre la tête de lecture et le disque, à l'augmentation des vitesses de rotation des disques et à une diminution de la dimension du slider. Pour illustrer la prouesse technologique réalisée, la précision de positionnement d'une tête de lecture est comparable à celle d'un Boeing 747 volant à 272 km/seconde, à moins d'un centimètre du sol, tout en étant capable de compter chaque brin d'herbe.

Le survol d'une tête de lecture à environ 10 nm de la surface du disque est assuré par la portance de la couche d'air agissant sur un slider. Un contact de la tête de lecture sur le disque en rotation a des conséquences dramatiques car la tête est en général détériorée et les impacts et rayures engendrent des modifications locales de la planéité de la surface du disque. Le remplacement de la tête de lecture ne permet pas toujours de restaurer la lecture des données, car la modification locale de la topographie de la surface du disque conduit à une rupture de la couche d'air confinée et en général à de nouveaux « crash » de la tête de lecture.

La question que nous a posé l'entreprise de restauration de données a été de rechercher la possibilité de restaurer la lecture d'un disque endommagé par un moyen micro mécanique. Environ 30% des disques HS sont des disques rayés, avec des données non récupérables. Ce sont ces 30% du marché que l'entreprise cherchait à conquérir.

METHODOLOGIE UTILISEE

Nous avons eu accès à des disques durs endommagés qui pour certains étaient encore lisibles. La topographie des endommagements de surface a permis de révéler que les pentes locales ont une criticité supérieure à la largeur des endommagements : le disque est illisible si la pente excède une valeur seuil.

Les substrats des plateaux des disques durs analysés étaient de deux types, en aluminium pour les plateaux de 3.5" et en verre pour ceux de 2.5". L'adoucissement « mécanique » des endommagements de surface pour les substrats en verre étant impossible, nous nous sommes concentrés sur les plateaux de 3.5". En effet pour les plateaux 2.5", les propriétés et comportement du substrat verre ne permettent pas la réalisation de rayures ductiles "larges" (macro-rayures) sans endommager les couches supérieures, et l'endommagement de ces couches supérieures (multicouches d'environ 100 nm

d'épaisseur) entraîne une rugosité très importante d'ordre micrométrique avec des fissurations et faïençages des couches. A contrario, les substrats aluminium permettent de réaliser des rayures de géométries contrôlées (largeur, profondeur du sillon de rayure) conservant une rugosité dans le sillon équivalente à la rugosité initiale du plateau vierge

Il a ainsi été démontré que des rayures douces avec des billes de grands rayons peuvent atténuer les pentes locales des rayures fines et permettre la relecture de disques durs (figure 1). La condition de restauration de la portance est liée aux dimensions de cette rayure douce comparée à celles de la tête de lecture. Cette dernière est composé d'un slider de grande taille (typiquement 800 μm de longueur par 600 μm de largeur). L'angle du slider par rapport à la surface du disque est de l'ordre de 100-200 μrad ($\sim 0.01^\circ$) sur les disques durs les plus récents (figure 2). Cette portance est donc peu perturbée par des rayures douces de largeurs de quelques centaines de micromètres et de profondeur de l'ordre d'une centaine de nanomètres. Il y a cependant une condition sur la hauteur des bourrelets des rayures douces : la tête de lecture écriture présente sur le slider est environ 100 nm plus bas que ce dernier, pour n'être qu'à quelques nm de la surface du disque.

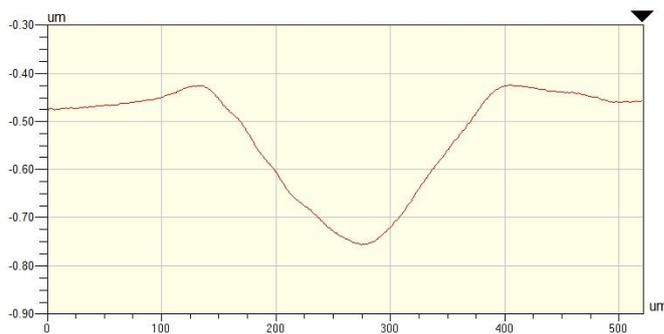


Figure 1 : section d'un macro sillon permettant de restaurer la portance

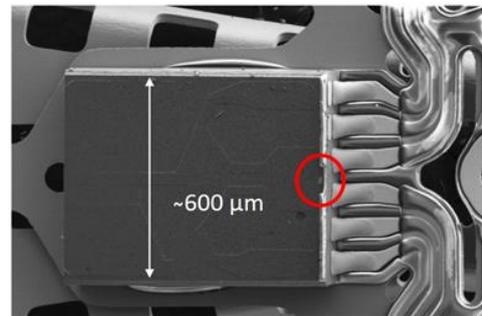


Figure 2 : tête de lecture avec un slider dont les dimensions sont de 600 μm de large par 800 μm de long et eu centre du cercle la tête de lecture.

Le lissage d'une micro rayure par une macro rayure est donc totalement possible si le défaut initial n'est pas trop sévère (concentré sur la couche contenant les informations). Dans ce cas la micro rayure peut entièrement disparaître. Si les couches supérieures du disque sont traversées par la micro rayure, le macro sillon va atténuer les pentes et le fond de la micro-rayure persistera mais est déplacé dans le fond du macro-sillon. Ce défaut résiduel est sans conséquence sur la restauration de la portance.

CONCLUSION

Les défauts de surfaces (rayures, impacts) présents sur des plateaux de disques durs ont été mesurés. Les types de défauts (rayures fines, rayures larges, rayures partielles, abrasion, impacts) sont multiples et les tailles et géométries sont très variables. Ces défauts peuvent être rédhibitoires pour la récupération de données, mais dans certains cas ces défauts peuvent être non destructifs c'est à dire permettre le survol des têtes de lecture. Les pentes locales de ces défauts semblent être le paramètre essentiel discriminant ces 2 cas.

Les micro défauts isolés sont traitables par cette méthode de macro-rayure pour les disques durs ayant des plateaux aluminium (3.5"). Le disque dur peut ainsi redevenir lisibles pour les parties non concernées par le macro sillon. La déformation ductile des substrats en verre pour les plateau 2.5" n'est pas possible.

ANALYSE MORPHOTRIBOLOGIQUE MULTIÉCHELLE D'UN CONTACT PION-DISQUE LORS D'UN FREINAGE

R. Guibert¹, M. Thevenot², J.-F. Brunel², P. Dufrénoy² et M. Bigerelle^{1,3}

1. Univ. Polytechnique Hauts-de-France, CNRS, UMR 8201 - LAMIH - Laboratoire d'Automatique de Mécanique et d'Informatique Industrielles et Humaines, F-59313 Valenciennes, France

2. Univ. Lille, CNRS, Centrale Lille, UMR 9013 - LaMcube - Laboratoire de Mécanique Multiphysique Multiéchelle, F-59000 Lille, France

3. INSA Hauts-de-France, F-59313 Valenciennes, France

MOTS CLES

Rugosité, Analyse Multiéchelle, Frottement, Usure, Contact Pion-Disque, Émissions Acoustiques

INTRODUCTION

L'étude du freinage est un sujet classique de la tribologie, en particulier sur le frottement mais également sur la compréhension des mécanismes d'usure des éléments frottants. Cependant, de nouvelles thématiques ont émergé, telles que les émissions acoustiques lors d'un freinage. Les études tribologiques récentes du freinage ne se limitent plus seulement à l'étude d'une de ces thématiques, mais bien à une étude simultanée de ces phénomènes physiques, ainsi qu'à leur couplage. A cela s'ajoute également les notions de prédiction des émissions acoustiques, dans le but de les minimiser, tout en conservant l'efficacité du freinage et en minimisant l'usure des freins. C'est donc un problème d'optimisation multi-objectif qui est étudié par la communauté des tribologues. Un des éléments centraux du freinage est la morphologie des éléments du système plaquette-disque de frein, modélisé ici par un système pion-disque, définissant les zones de contact entre les éléments frottants avec prise en compte du troisième corps. La nature multiéchelle du contact rend alors difficile la compréhension des phénomènes physiques impliqués durant le freinage.

MATÉRIAUX ET MÉTHODES

Un banc d'essai tribologique de freinage dans une configuration pion-disque a été conçu. Le pion utilisé est un pion NAO non métallique non amianté et sa surface mesure 20 mm x 20 mm. Le disque de frein est en acier. Le banc d'essai permet l'acquisition durant l'essai de freinage des efforts de contact, de l'énergie dissipée, de la température du pion en plusieurs positions, des fréquences et des intensités des émissions acoustiques. Également, des mesures topographiques de la surface du pion sont effectuées régulièrement entre deux séries d'essais de freinage, à l'aide d'un microscope à variation focale Bruker Alicona Portable RL, équipé d'un objectif X4. La résolution latérale des mesures est de 2,446 µm et la résolution verticale est de 0,001 µm. Grâce à l'utilisation du stitching [1], une technique de fusion des topographies 3D élémentaires pour obtenir des cartes haute résolution sur large champ de mesure, l'intégralité de la surface du pion en contact avec le disque est mesurée, soit 20 mm x 20 mm (environ 200 millions de points par topographie stitchée avant sous-échantillonnage). Des zones de 15 mm x 15 mm sont extraites des topographies en leur centre. Les topographies de la surface du pion sont ensuite traitées pour retirer la forme de la topographie. L'analyse multiéchelle [2] se base ensuite sur une décomposition utilisant des filtres gaussiens robustes en mode passe-bas, passe-haut et passe-bande pour isoler des gammes d'échelles spatiales successives. Le filtre gaussien robuste est utilisé car la surface du pion est hétérogène morphologiquement, et ce filtre limite les effets de bords de sous-régions homogènes. Les paramètres de rugosité et morphologiques normatifs (norme ISO 25 178-2) sont ensuite calculés pour chaque surface filtrée. Enfin, les données tribologiques et morphologiques sont fusionnées.

RÉSULTATS

L'évolution du paramètre de rugosité V_{mc} (le volume de matière du core, c'est-à-dire le volume de matière de la topographie écrêtée au-dessus et en-dessous) est tracée en fonction de l'échelle du filtre gaussien robuste en passe-haut (Figure 1). Chaque courbe se décompose en trois parties : une première phase avec une pente croissante du V_{mc} aux hautes fréquences, une seconde phase avec une pente croissante moins forte aux moyennes fréquences, puis une troisième phase avec un comportement asymptotique du V_{mc} aux basses fréquences. La valeur asymptotique du V_{mc} aux basses fréquences diminue avec le nombre d'essais de freinage jusqu'à l'essai 450. Il y a ainsi une phase de convergence du V_{mc} . Ceci s'explique par un phénomène hybride combinant baisse de la rugosité des plateaux et diminution de la profondeur des trous de la morphologie du pion causé lors de l'abrasion du pion durant l'essai. Le V_{mc} aux basses fréquences remonte à partir de l'essai 450 : de la rugosité est alors créée sur les plateaux. Le régime d'évolution aux basses fréquences change selon la phase de contact : à savoir l'état initial de la surface du pion (rond), la phase de mise en place du contact (triangle) et la phase où le contact est établi (carré). On observe également une baisse de la valeur du « *cross-over* » entre les hautes et les moyennes fréquences lorsque le nombre de freinages augmente. La pente du V_{mc} aux hautes fréquences tend vers une pente limite lorsque le nombre de freinage augmente, qui correspond à la dimension fractale de la morphologie du pion. L'usure du pion est ainsi fidèlement représentée par le paramètre de rugosité V_{mc} .

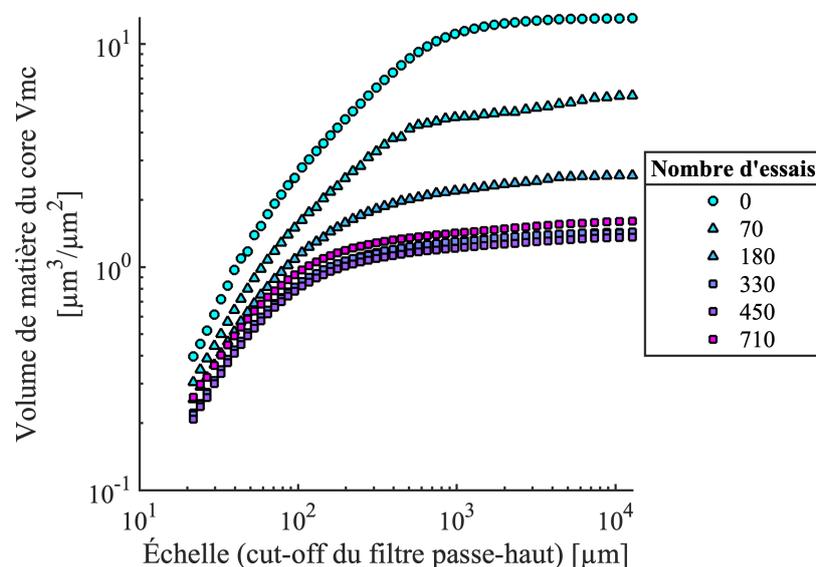


Figure 1: Évolution multiéchelle de l'usure de la surface du pion lors des essais de freinage.

Les émissions acoustiques du freinage sont également étudiées par analyse multiéchelle. L'évolution de la première fréquence de crissement F_{S1} (dont l'intensité sonore est la plus élevée) est tracée selon le paramètre de rugosité $S5p$ (hauteur moyenne des 5 pics les plus hauts) à l'échelle $48,1 \mu\text{m}$ avec un filtre gaussien robuste passe-bande (Figure 2). La première fréquence de crissement F_{S1} augmente lorsque la hauteur moyenne des pics augmente. A l'inverse, l'intensité sonore maximum relevée pendant l'essai associé diminue lorsque la première fréquence de crissement augmente. Les émissions acoustiques sont donc influencées par la rugosité des pics massifs qui portent le contact lors du freinage, qui exciterait le système de freinage.

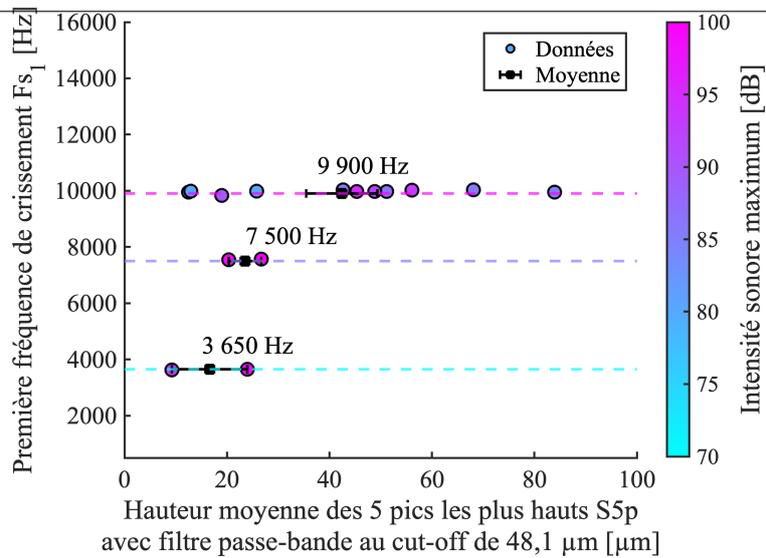


Figure 2: Liens entre hauteur des pics, première fréquence de crissement et intensité sonore maximum pendant l'essai de freinage associé.

DISCUSSION

L'analyse multiéchelle de la surface du pion a permis d'identifier l'usure du pion au cours des essais de freinage via le volume de matière du core V_{mc} . Également, l'analyse multiéchelle a permis de proposer une ébauche sur l'influence de la hauteur des pics sur la première fréquence de crissement et sur l'intensité sonore maximum de ce crissement au cours de l'essai. Cette étude met en avant les phénomènes physiques liés à l'usure du pion et aux émissions acoustiques lors d'un freinage. Toutefois, cette étude se limite à la surface du pion, bien que les morphologies du disque et du troisième corps aient une importance capitale dans le système tribologique de l'essai pion-disque [3].

CONCLUSION

Le freinage d'un système pion-disque est un processus complexe. Afin d'étudier les phénomènes physiques impliqués dans le freinage, un banc d'essai tribologique a été conçu, complété par un microscope à variation focale permettant la mesure topographique de la surface du pion entre deux essais de freinage. L'évolution de la morphologie de la surface du pion a été étudiée par analyse multiéchelle, qui a pu mettre en lumière le volume de matière du core V_{mc} comme indicateur de l'état d'usure du pion, ainsi que le lien entre les émissions acoustiques lors d'un crissement et la hauteur moyenne des pics de la surface du pion S5p. Cette étude prouve qu'une approche morphotribologique multiéchelle est pertinente pour les études de système complexe comme le freinage, en particulier vis-à-vis de l'usure des freins et des émissions acoustiques lors d'un freinage.

Références

- [1] J. Lemesle, R. Guibert, M. Bigerelle (2023) « *A Novel 3D Topography Stitching Algorithm Based on Reflectance and Multimap* », Applied Sciences, **13** (2), pp. 857.
- [2] C.A. Brown, H.N. Hansen, X.J. Jiang, F. Blateyron, J. Berglund, N. Senin, T. Bartkowiak, B. Dixon, G. Le Goïc, Y. Quinsat, J.W. Stemp, M.K. Thompson, P.S. Ungar, H.E. Zahouani (2018) « *Multiscale analyses and characterizations of surface topographies* », CIRP Annals, **67** (2), pp. 839-862.
- [3] E. Davin, A-L Cristol, A. Beaurain, P. Dufrénoy, N. Zaquem (2021) « *Differences in wear and material integrity of nao and low-steel brake pads under severe conditions* », Materials, **14** (19), article number 5531.

Caractérisation des émissions particulaires de plaquettes de frein à l'aide d'un banc Pion-Disque

M. HOFF^{1,2}, Y. CHEN³, M. MORGENEYER¹ et C. BRESSOT⁴

1. Laboratoire Transformations Intégrées de la Matière Renouvelable (TIMR, EA 4297), UTC-ESCOM, 60203 Compiègne, France

2. MAT Friction Noyon SAS, 205 rue de l'Europe, 60400 Noyon, France

3. Centre Technique des Industries Mécaniques (CETIM), Pôle MMS, 52 Av. Félix Louat, 60300 Senlis, France

4. Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS), Rue Jacques Taffanel, 60550 Verneuil-en-Halatte, France

MOTS CLES

Emission particulaire, Freinage, PM10, Pion-Disque, Fonte standard, Disque revêtu, Frottement

INTRODUCTION

Dans le secteur automobile, de nouvelles préoccupations au niveau européen sont apparues ces dernières années. L'une d'entre elles est la réduction des émissions de particules provenant des systèmes de freinage. D'après l'ADEME, 90% des émissions particulaires dues au transport automobile sont dues à des sources hors échappement telles que l'usure des systèmes de freinage, l'usure des pneus, l'usure de la chaussée et la remise en suspension des particules présentes sur la route. Parmi ces sources, les systèmes de freinage sont responsables de 25% des émissions hors échappement [1].

L'Europe s'intéresse aux émissions de particules de taille inférieure à 10 μ m qu'on appelle PM10, car elles sont mauvaises pour l'environnement, polluant l'air, les sols, les eaux,... mais également pour l'Homme puisque les particules nanométriques sont capables de pénétrer les alvéoles pulmonaires.

C'est la raison pour laquelle la Commission Européenne a dévoilé dans ses propositions pour la norme Euro VII (norme automobile applicable dès l'horizon 2025 sur tous les véhicules neufs légers), un nouveau volet concernant les sources hors échappement. Un seuil d'émission pour les systèmes de freinage de 7mg/km/véhicule a été proposé pour 2025. Pour atteindre cet objectif, la réduction a été effectuée par les fabricants de frein et leurs sous-traitants est significative.

Le moyen de mesure de particules de freinage proposé dans la norme Euro VII est le banc dynamométrique. C'est un banc très coûteux, et bien que la sous-traitance d'essais d'homologation soit possible chez les fabricants de bancs, elle reste très coûteuse et les délais sont souvent très longs. Pour étudier rapidement les émissions particulaires dues au freinage automobile, des essais de tribologie ont été réalisés sur le banc TGV (Tribomètre à Grande Vitesse de type Pion-Disque) du CETIM mis au point par F. Philippe lors de sa thèse [2]. L'objectif de cette étude est de discriminer les émissions de particules de 4 matériaux de friction, proposés par le fabricant de plaquettes de frein MAT Friction Noyon, à la fois sur des disques en fonte standard, mais également sur 2 disques de nature différente (à revêtement très dur). La compréhension des mécanismes tribologiques entrant en jeu lors des émissions particulaires est primordiale dans cette étude pour pouvoir améliorer la composition des plaquettes de frein.

CONDITIONS DES ESSAIS

Les essais ont été réalisés sur le banc Pion-Disque du CETIM (Figure 1). Chaque matériau de friction a été testé suivant le même protocole expérimental. Un rodage de 50 séquences de 10sec, chacune espacée de 60sec, à vitesse de rotation (glissement) constante et pression de contact constante, respectivement de 8,2m/s et 1,2MPa. Puis un cycle appelé « Emission » de 50 séquences de 10sec,

chacune espacée de 60sec, a été réalisé. Le cycle émission a été réalisé à pression de contact constante de 1,2MPa. En revanche, 3 vitesses de glissement différentes le composent, débutant par 25 séquences à 3,6m/s, suivi de 19 séquences à 6,1m/s, et se terminant par 6 séquences à 11,2m/s.

Ce protocole, créé pour cette étude, est inspiré de l'essai WLTP mentionné dans la nouvelle GTR proposée pour l'Euro VII (méthodologie de mesure de particules de freinage). Ce protocole expérimental a été validé en amont au CETIM par la réalisation d'essais de répétabilité (en regardant le frottement).

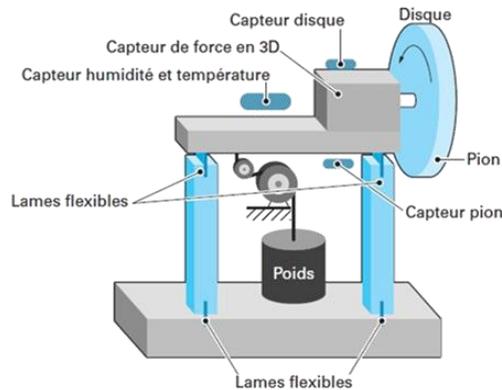


Figure 1 : Schéma du Banc TGV du CETIM.

Pour cette étude, 4 matériaux de friction ont été testés : 3 matériaux de la famille des Low Steel et 1 matériau de la famille des NAO (Non Asbestos Organic). Le Low Steel (LS) est sans amiante, et composé de fibres d'acier en quantité raisonnable. Quant au NAO c'est un matériau sans amiante, ni acier, ni fer et composé d'éléments carbonés, de fibres organiques et fibres minérales. Le LS01 et le LS02 sont les plus proches en termes de composition mais les abrasifs et les taux en abrasifs sont différents. Le LS02 possède plus d'abrasifs, ainsi qu'un abrasif très dur contrairement au LS01. Le LS03 a moins d'abrasifs que les deux autres Low Steel, et sa particularité est la possession d'un taux important de fibres synthétiques. Le dernier matériau est un NAO standard, noté NAO01.

Un pion neuf de diamètre 5mm a été utilisé pour chaque essai. Afin de déterminer l'usure des pions, ils ont été pesés avant et après essai avec une balance de précision de 0,00001g. Chaque matériau (sur un total de 4 matériaux de friction) a été testé sur le même disque en fonte standard pour faciliter les manipulations expérimentales car une enceinte est positionnée autour du système pour pouvoir effectuer les mesures de particules sans bruit de fond. Ainsi, l'usure du disque n'a pas pu être mesurée.

Le plus émissif des matériaux, en nombre de particules à haute vitesse, a été sélectionné pour effectuer des essais sur les 2 types de disques revêtus différents. Le premier revêtement est un oxyde de chrome Cr_2O_3 et le second est un carbure de tungstène $WCCoCr$.

Concernant les mesures de particules, des appareils de l'INERIS ont été utilisés. La distribution en taille (gravimétrie) est mesurée avec un SMPS (14nm-700nm), en complément d'un APS (520nm-20 μ m). Le nombre de particules [$\#/cm^3$] est mesuré à l'aide d'un CNC (10nm-1 μ m). En plus de ces appareils, des grilles MET (microscopie à balayage électronique) ont été utilisées pour capturer des particules dans le but d'analyser leur taille, leur forme et leur composition chimique. Des nanobadges ont été utilisés en complément des grilles MET pour déterminer la concentration émise en élément chimique [mg/m^3]. Enfin, des filtres pour mesurer la masse particulaire émise, de taille inférieure à 10 μ m (PM10), ont été ajoutés dans le système de mesure dans le but de déterminer un facteur d'émission pour chaque couple {matériau de friction + disque}.

PREMIERS RESULTATS

Les premiers résultats tribologiques (de frottement) du Tableau 1 montre que notre moyen de mesure permet de distinguer la sensibilité de chaque matériau de friction entre eux, mais aussi en fonction de la vitesse (excepté pour le NAO qui reste peu sensible). Les différences observées entre les matériaux LS01 et LS02 sont en adéquation avec les différences de composition qu'il existe entre ces deux matériaux. Le niveau de frottement du NAO01, le plus faible, répond aux attentes. Ces résultats montrent que la nature du disque a une influence importante sur le frottement. Un même matériau (LS03) aura tendance à frotter davantage sur une fonte standard, qu'un disque revêtu.

	LS01	LS02	LS03	LS03	LS03	NAO01
Nature disque	Fonte std	Fonte std	Fonte std	Cr ₂ O ₃	WCCoCr	Fonte std
Rodage 8.2m/s	0,41	0,51	0,41	0,33	0,37	0,31
Emission 3.6m/s	0,50	0,54	0,49	0,30	0,35	0,32
Emission 6.1m/s	0,45	0,53	0,45	0,30	0,35	0,31
Emission 11.2m/s	0,38	0,36	0,40	0,33	0,47	0,31

Tableau 1 : Frottement moyen en fin de cycle.

Ce protocole expérimental permet également de distinguer les matériaux de friction en termes d'émissions particulaires. D'après les premières observations, le matériau le plus émissif serait le LS03, suivi de près du LS01. Le matériau le moins émissif reste le NAO1 comme cela est mentionné à plusieurs reprises dans la littérature. Les émissions particulaires sont également sensibles à la vitesse : plus la vitesse augmente, plus les émissions sont importantes. A haute vitesse (11,2m/s), sur le LS03, on passe d'une émission d'environ 700#/cm³ sur disque en fonte standard à une émission d'environ 100-120#/cm³ avec les 2 disques revêtus : l'émissivité du couple {matériau de friction + disque} a donc été divisée par 7 environ avec l'utilisation d'un disque revêtu.

Quant à l'usure du pion (Tableau 2), le NAO1 est la plus faible comme attendu. Par expérience de MAT Friction, l'usure du LS02 aurait dû être la plus élevée. Enfin, le disque en oxyde de chromo a fait augmenter l'usure du pion LS03, tandis que le revêtement en carbure de tungstène l'a faite diminuer (la diminution de l'usure des plaquettes de frein a déjà été observé chez MAT Friction).

Matériau	LS01	LS02	LS03	LS03	LS03	NAO01
Nature disque	Fonte std	Fonte std	Fonte std	Cr ₂ O ₃	WCCoCr	Fonte std
Usure pion [mg]	1,596	1,096	1,328	1,748	0,938	0,982

Tableau 2 : Résultats d'usure pion.

PERSPECTIVES ET CONCLUSION

Ces premiers résultats, dont le protocole expérimental est inspiré de l'essai normalisé WLTP, sont uniquement issus d'observations de résultats à ce stade. Les prochaines étapes consisteront à des analyses plus profondes, comme la compréhension des mécanismes tribologiques (d'usure) qui ont eu lieu pendant le déroulement des essais (taux de recouvrement, analyses topographiques,...). Les résultats d'émissivité restent à détailler également (nombre de particules, gravimétrie, facteur d'émission) ; ainsi que l'analyse chimique des particules émises. A l'issue de ces analyses, il sera possible de réaliser des améliorations de composition des plaquettes de frein pour de futures campagnes.

Références

- [1] ADEME, « Emissions des Véhicules routiers - Les particules hors échappement », 2022
<https://bibliothèque.ademe.fr/air-et-bruit/5384-emissions-des-vehicules-routiers-les-particules-hors-echappement.html>

[2] F. Philippe « Mesure et caractérisation des particules issues du freinage dans l'automobile sur un banc pion-disque », HAL, Id: tel-03335037, 2021

PERFORMANCES TRIBOLOGIQUES D'UN FILM ADHESIF BIOMIMETIQUE COMBINANT DES MICROSTRUCTURES EN FORME DE SPATULE ET DE CHAMPIGNON

H. Kasem¹, D. Badler², R. Goltsberg² et A. Abu-Ammar³

1. *Department of Mechanical Engineering, Azrieli College of Engineering, Jerusalem, Israel*

2. *Department of Mechanical Engineering, Technion, Haifa Israel*

3. *Department of Pharmaceutical Engineering, Azrieli College of Engineering, Jerusalem, Israel*

MOTS CLES

Biomimétisme, Micro-champignon, Micro-spatule, Microstructure Combinée, Performances tribologiques.

INTRODUCTION

La capacité d'obtenir une adhérence et un frottement élevés, tout en garantissant passivité et réversibilité, est un sujet qui suscite un grand intérêt dans beaucoup de domaines scientifiques et techniques. Les applications comprennent, entre autres, les robots, les outils d'escalade, la manipulation et la fixation, pour n'en citer que quelques exemples. En réponse à la demande croissante, un nouveau domaine innovant et émergent de la science de l'adhérence a été développé au cours des dernières décennies, basé essentiellement sur l'imitation des mécanismes d'attachement biologiques qui ont évolué chez certains animaux [1,2]. Certains de ces mécanismes contiennent des microstructures biomimétiques sous forme de spatules qui peuvent générer un frottement particulièrement élevé mais une adhésion passive très limitée, voire inexistante [3]. Un autre mécanisme consiste en microstructures sous la forme de champignons qui peuvent générer une adhésion très élevée mais une résistance limitée au frottement [4].

EXPERIMENTALE

Dans le présent travail, nous avons étudié expérimentalement les performances tribologiques (adhérence, friction et résistance au pelage) de surfaces adhésives combinant des microstructures biomimétiques de différentes formes, soit en forme de microchampignon et de spatules. Le concept est basé sur l'observation attentive des animaux qui révèle que certaines espèces ont développé des microstructures adhésives combinant différentes formes et fonctionnalités. Ces espèces sont capables d'utiliser simultanément les différentes microstructures pour optimiser leur adhérence et leur mouvement sur des surfaces irrégulières. Pour ce faire, des échantillons combinant différentes microstructures ont été préparés en coulant de l'élastomère souple dans des gabarits négatifs préparés à l'avance. Les performances tribologiques ont été évaluées sur un banc d'essai personnalisé construit à cette fin.

CONCLUSION

Les résultats expérimentaux montrent clairement que les échantillons ayant des microtextures combinées présentent de meilleures performances en matière d'adhérence et de friction que les échantillons composés uniquement d'une forme unique de microtexture. De plus, l'arrangement biomimétique unique inspiré de la nature permet d'améliorer la résistance à la force de pelage quel que soit l'angle de pelage ou l'environnement du contact.

Références

- [1] S.N. Gorb, « *Biological and Biologically Inspired Attachment Systems* », B. Bhushan (Ed.), Springer Handb. Nanotechnol., Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, (2010), pp. 1525–1551. https://doi.org/10.1007/978-3-642-02525-9_43.
- [2] B.N.J. Persson, « *On the mechanism of adhesion in biological systems* », J. Chem. Phys. 118 (2003) 7614–7621. <https://doi.org/10.1063/1.1562192>.
- [3] H. Kasem, A. Tsipenyuk, M. Varenberg, « *Biomimetic wall-shaped hierarchical microstructure for gecko-like attachment* », Soft Matter. 11 (2015) 2909–2915. <https://doi.org/10.1039/c4sm01916d>.
- [4] M. Varenberg, S. Gorb, « *Shearing of fibrillar adhesive microstructure: Friction and shear-related changes in pull-off force* », J. R. Soc. Interface. 4 (2007) 721–725. <https://doi.org/10.1098/rsif.2007.0222>.

Perception tactile de surfaces micro-texturées : impact de l'inclinaison du doigt sur la mesure *in vivo* du frottement

E. Louyot^{1,2}, L. Carpentier¹, E. Chatelet², F. Massi³, P-H. Cornuault¹

1. Université de Franche-Comté, CNRS, Institut Femto-ST, 25000 Besançon, France

2. Univ Lyon, INSA Lyon, CNRS, LAMCOS, UMR5259, 69621 Villeurbanne, France

3. Dept. of Mechanical and Aerospace Engineering, University of Rome "La Sapienza", Italy

MOTS CLES

Tribologie tactile, Frottement, Propriétés mécaniques du doigt, Mécanique du contact, Surfaces texturées

INTRODUCTION

La tribologie tactile est source d'un intérêt croissant ces dernières années, menant à de nombreuses études expérimentales impliquant le frottement *in vivo* de la pulpe du doigt sur différentes surfaces [1-2]. Parmi elles, des études ont été réalisées à l'aide de tribomètres dédiés et des protocoles expérimentaux cherchant à reproduire plus ou moins fidèlement des conditions de contact proches d'un toucher naturel [3-5]. Cela mène fréquemment à des essais de toucher « actif » pour lesquels la position du doigt, sa vitesse d'exploration, et l'effort normal appliqué varient grandement d'une expérience à l'autre, ce qui produit des incertitudes dans les mesures effectuées lors du frottement. Cette étude vise à examiner en particulier l'influence de l'inclinaison du doigt, par rapport à la direction de glissement, sur le coefficient de frottement, quand un individu touche des surfaces micro-texturées.

MESURES EXPERIMENTALES DU FROTTEMENT DOIGT/TEXTURES

Des surfaces texturées ont été fabriquées sur wafers en salle blanche par photolithographie et gravure plasma puis répliquées en résine polyuréthane. Ces textures sont caractérisées par un réseau de plots cylindriques disposés selon un motif hexagonal, dont on a fait varier les diamètres et espacements respectivement de 20 à 797 μm et de 20 à 610 μm .

Des essais de frottement en mode « actif » sur tribomètre instrumenté (ActivTACT) ont été réalisés par un individu auquel on a demandé de tenter de maintenir une force normale F_N de 0.4 N et une vitesse de glissement V de 30 mm/s. Ces consignes ont été relativement bien exécutées après une période d'apprentissage, aboutissant à des variations de V et F_N de quelques pourcents pour l'ensemble des essais, lesquels ont été réalisés avec une inclinaison du doigt variant de 15 à 55° par rapport à la direction de glissement. L'inclinaison du doigt et sa vitesse de déplacement ont été mesurées par captures vidéo puis traitement d'images, tandis que la force normale et la force tangentielle due au frottement ont été mesurées à l'aide de capteurs résistifs et piézoélectriques, respectivement.

Les résultats présentés sur la Figure 1 montrent une baisse significative du coefficient de frottement (COF) lorsque l'angle entre le doigt et la surface augmente. On constate également que l'amplitude de la variation du COF avec l'inclinaison du doigt dépend fortement des propriétés topographiques de la surface.

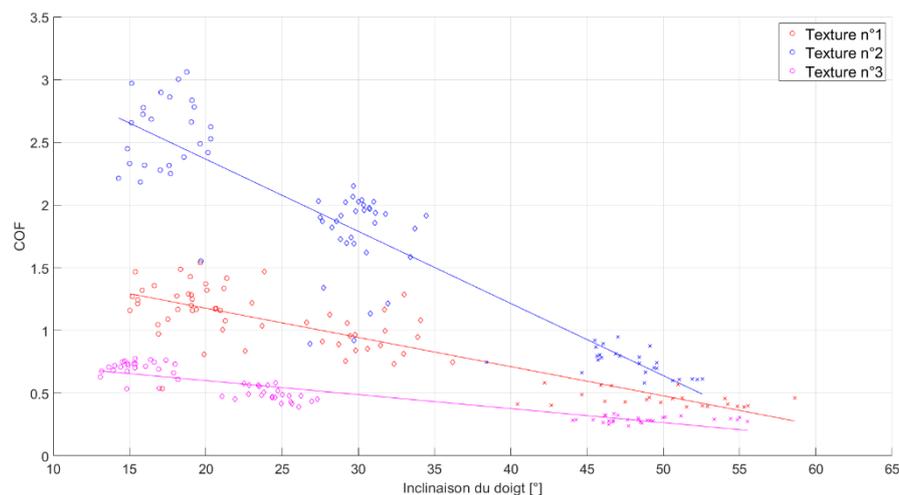


Figure 1 : Coefficients de frottement mesurés lors du contact glissant unilatéral d'un doigt sur trois surfaces texturées en fonction de l'inclinaison du doigt par rapport à la direction de glissement

SIMULATIONS NUMÉRIQUES ET MESURES *IN-VIVO* DES PROPRIÉTÉS DU DOIGT

Cette variation très significative du COF en fonction de l'angle d'inclinaison du doigt peut avoir plusieurs origines. Particulièrement, à l'échelle du contact, des variations locales des courbures principales du doigt et de ses propriétés mécaniques (module d'élasticité apparent) impliquent des champs de pression de contact variables.

A l'aide d'analyses topographiques d'une réplique du doigt de l'individu couplées à des essais d'indentation *in vivo*, nous avons caractérisé le module d'élasticité apparent de la pulpe du doigt selon diverses orientations de ce dernier par rapport à une surface plane. Ces mesures des propriétés mécaniques et topographiques du doigt ont servi à alimenter un modèle élastique par éléments frontières (ContactPlot) permettant de quantifier les aires réelles et pressions de contact. Les résultats des simulations sont alors confrontés aux mesures expérimentales de frottement.

CONCLUSION

La présente étude contribue à expliquer, par la caractérisation *in vivo* de l'élasticité du doigt couplée à une simulation numérique du contact, l'observation expérimentale de modification du COF dans un contact doigt/micro-texture lorsque l'inclinaison du doigt varie. Elle fournit en outre une justification aux importantes fluctuations des mesures expérimentales rencontrées dans la littérature.

Références

- [1] R. Fagiani, F. Massi, E. Chatelet, J.P. Costes, Y. Berthier, « *Contact of a finger on rigid surfaces and textiles: Friction coefficient and induced vibrations* », Tribology Letters., 48, **2012**
- [2] P-H. Cornuault, L. Carpentier, M-A. Bueno, J-M. Cote, G. Monteil, « *Influence of physico-chemical, mechanical and morphological fingerpad properties on the frictional distinction of sticky/slippery surfaces* », Journal of the Royal Society Interface, 12 (110), **2015**
- [3] MS. Kim, IY. Kim, YK Park, YZ Lee, « *The friction measurement between finger skin and material surfaces* », Wear, 301, **2013**
- [4] PH. Warman, A. Roland Ennos, « *Fingerprints are unlikely to increase the friction of primate fingerpads* », Journal of Experimental Biology, 212 (13), **2009**
- [5] G.P. Chimata, C.J. Schwartz, « *Investigation of friction mechanisms in finger pad sliding against surfaces of varying roughness* », Biotribology, 3, **2015**

COMPORTEMENT TRIBOLOGIQUE EN MILIEU LUBRIFIE ET NON LUBRIFIE DES BIOMATERIAUX AISI 316 L et Ti-6Al-4V

M. Labaiz¹, O. Zaiche¹

1. Université BADJI Mokhtar Annaba, Algérie

MOTS CLES

Biomatériaux, Acier AISI 316L, Alliage Ti-6Al-4V, Tribologie, Rugosité 3D

INTRODUCTION

Les alliages de titane est les aciers inoxydables sont largement utilisés dans le domaine biomédical. Ils sont des biomatériaux attractifs pour les implants orthopédiques et autres applications dentaires en raison de leurs remarquables propriétés physico-chimiques et de leur biocompatibilité élevée avec les tissus humains. L'alliage Ti6AL4V, présente une faible densité, une excellente biocompatibilité associée à une bonne résistance à la corrosion dans les fluides corporels, Cet alliage présente également un faible module d'Young proche de celui de l'os, et donc très approprié pour une implantation afin d'éviter le relâchement des implants et augmenter leurs durée de vie

L'excellente résistance à la corrosion de ces alliages est due à la formation d'un film d'oxyde passif mince et stable de quelques dizaines d'angströms. Cependant, l'utilisation de ces alliages est limitée par la faible tenue à l'usure par frottement. Les aciers inoxydables sont aussi connus pour leurs propriétés telles que la résistance élevée à la corrosion et à la fatigue ainsi que la résistance à l'usure. Outre la biocompatibilité, ces propriétés sont importantes dans la sélection et l'adaptation d'un matériau pour des applications biomédicales comme la fabrication de vis et de plaques de fixation et tige fémorale (prothèse de hanche).

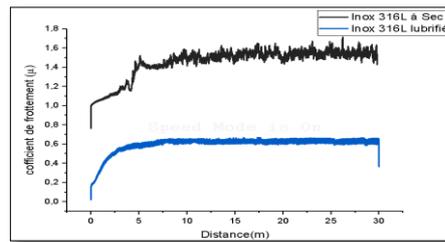
Les matériaux faisant l'objet de cette étude sont l'alliage de titane Ti-6Al-4V et l'acier AISI 316L. Après étude métallographique de la microstructure on a étudié le comportement tribologique sur un tribomètre rotatif, montage bille/plan (essais non lubrifiés) et un montage pion/disque (essais lubrifiés). Les paramètres d'essai sont 1 et 6 N pour la charge et 1 cm/ seconde pour la vitesse. Les moyens de caractérisation sont la microscopie optique, la microscopie électronique à balayage couplée à l'EDS, le profil de rugosité 3D.

RESULTATS

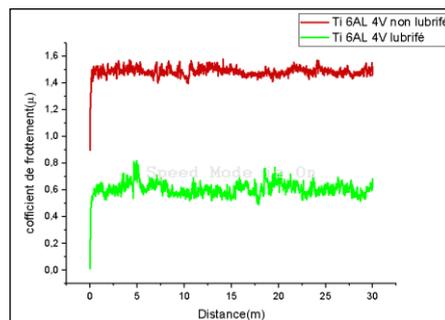
La microstructure de l'alliage Ti-6Al-4V, obtenue par microscope a permis de montrer que Ti 6Al4V est biphasique, à gros grains homogènes, de type $\alpha+\beta$. La phase β , qui possède une microstructure lamellaire, et la phase α qui possède une microstructure nodulaire claire.. Pour l'acier inoxydable AISI316L, la morphologie de la structure présente des grains d'austénite et contient une grande densité de macles.

La figure 1 montrent l'évolution du coefficient de frottement pour les deux matériaux (Ti-6Al 4V et AISI 316L) dans deux milieux différents (lubrifié et sec). On note que le coefficient de frottement en milieu lubrifié prend des valeurs faibles par rapport à un milieu sec, ce qui explique la validité des résultats par rapport aux études précédentes concernant le rôle du lubrifiant pour la diminution du coefficient de frottement. L'étude tribologique à sec et lubrifié montre que deux mécanismes d'usure ont été identifiés pour les deux matériaux, à savoir une usure abrasive et adhésive,

avec prédominance du mécanisme adhésif pour le glissement à sec. Les valeurs de la rugosité mesurées par profilométrie en 2D et en 3D respectent la norme du biomédical.

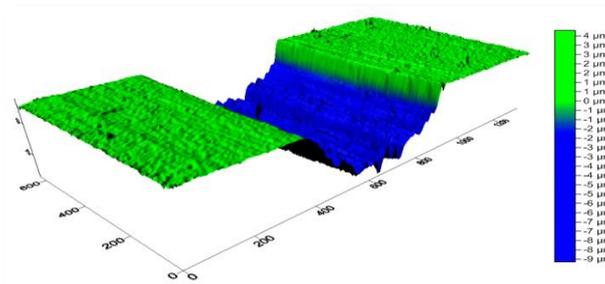


Acier 316L

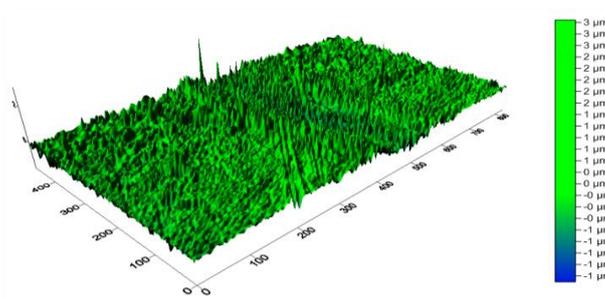


Alliage Ti-6Al-4V

Figure 1: Evolution du coefficient de frottement



Ti-6Al-4V



AISI 316L

Figure 2: Empreinte d'usure par rugosité 3D pour AISI 316L ET Ti6Al4V

La figure 2 montre le taux d'usure déterminé par profilométrie 3D. Le mauvais comportement en usure Ti6Al4V est bien mis en évidence.

CONCLUSION

Ce travail est le début d'une étude comparative tribologique et en corrosion entre différents biomatériaux (AISI 316L, Ti-6Al-4V, hydroxyapatite, corail). Ces premiers résultats montrent la bonne tenue en usure frottement de l'acier AISI 316, et parallèlement le mauvais comportement de l'alliage Ti6Al4V. Mais ce dernier est tout même le plus utilisé, pour sa meilleure résistance à la corrosion, sa biocompatibilité et sa faible densité, comparativement à l'acier AISI 316L.

Comment glisser sans frotter du régime de lubrification limite au régime hydrodynamique

D. Mazuyer and J. Caver-Barrioz

LTDS, CNRS UMR5513, Ecole centrale de Lyon, France

MOTS CLES

Contacts lubrifiés, Frottement, Formation de film lubrifiant, Multi-échelles

INTRODUCTION

La réduction des dissipations par frottement est une voie prometteuse de contribution à la transition écologique. Dans le domaine des contacts lubrifiés, une première approche consiste à utiliser des fluides peu visqueux et la seconde consiste à modifier les surfaces en contact.

Nous illustrons dans cette présentation l'approche combinée consistant à étudier les effets de surface sur le frottement dans des contacts lubrifiés avec des fluides à faible viscosité et des surfaces de topographie contrôlée, sur tous les régimes de lubrification.

IMOTEP - PLATEFORME MULTI-ÉCHELLES D'INVESTIGATION DES CONTACTS LUBRIFIÉS

Dans le cadre d'un projet financé par l'ADEME, l'agence de la transition écologique, nous avons développé une nouvelle plateforme de recherche, IMOTEP, qui permet d'analyser *in situ* les mécanismes tribologiques pour des conditions couvrant 11 décades de vitesses de glissement et de pression de contact, de 10^{-10} à 10 m/s et jusqu'à quelques GPa [1-4], en combinant des mesures simultanées des forces de contact avec la distribution d'épaisseur de film. Les outils développés permettant l'analyse multi-échelles conduite dans les différents régimes de lubrification sont présentés à la figure 1 sous forme de cartographie pression-vitesses de glissement.

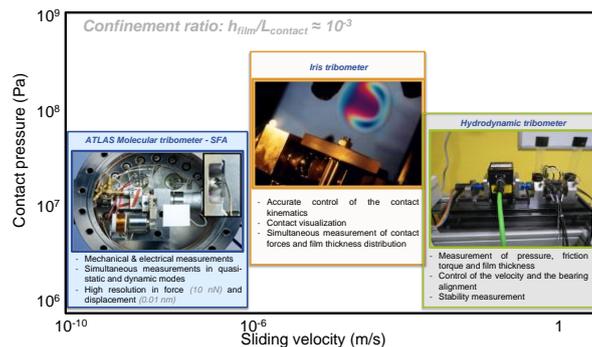


Figure 1: Analyse in situ multi-échelles des mécanismes de lubrification dans tous les régimes au sein de la plateforme de recherche IMOTEP, couvrant 11 décades de vitesse de glissement et de pression de contact.

- Le régime de lubrification limite (BL) a été simulé à l'aide d'un tribomètre moléculaire (ATLAS [1]) permettant de mesurer le comportement tribologique des couches moléculaires adsorbées, sous pression de contact modérée (de 1 MPa à 50 MPa), en fonction de la vitesse de glissement (de 0,1 nm/s à 100 nm/s) ;

- Le régime mixte (ML), le régime élastohydrodynamique (EHL) et les transitions entre régimes de lubrification ont été étudiés grâce au tribomètre IRIS [2-3] qui permet un contrôle indépendant et simultané des vitesses d'entraînement en glissement pour ainsi obtenir les courbes de Stribeck et de traction. Placées sous un spectromètre infrarouge avec le banc BASTET, les espèces chimiques passant au sein du contact peuvent également être analysées ;

- Le régime hydrodynamique (HL) a été étudié sur un banc à paliers lisses, entièrement instrumenté (diamètre de l'arbre = 5 mm, jeu radial = 5 μm) dans lequel la position de l'arbre, le couple de frottement, la température de l'huile et la rupture du film lubrifiant zone sont mesurées en fonction du temps sur une plage de vitesse pouvant atteindre 10 000 tr/min [4].

Le taux de confinement du film lubrifiant reste de l'ordre de 1 à 1000, dans ces bancs d'essais.

FORMATION DE FILM LUBRIFIANT

Nous nous concentrons ensuite sur un exemple, le comportement tribologique d'une solution de polymère, composée d'une huile de base Group III+ (BO) et de son mélange élémentaire avec un polymère PMA améliorant de l'indice de viscosité (BO + PMA) concentrée à 3% w/w.

Les interactions entre la surface métallique et l'additif polymère ont induit la formation d'un film limite de 10 nm d'épaisseur, mesurée à la fois avec le tribomètre ATLAS et le tribomètre IRIS. Cette couche limite a été caractérisée mécaniquement, son module élastique en cisaillement vaut 90 MPa sous une pression de contact de 50 MPa et ce film présente un comportement purement élastique [5]. L'analyse par interférogramme a montré que des patches de PMA adsorbé couvrent le contact hertzien en régime de lubrification limite. La présence de ce film est ainsi détectée pour des vitesses d'entraînement faibles, de l'ordre de 20 mm/s. A haute vitesse, l'épaisseur du film suit la prédiction du régime élastohydrodynamique. Afin de mieux comprendre la nature de ce film lubrifiant *in situ* et en temps réel, et d'identifier les différentes espèces chimiques entraînées dans et autour du contact, une analyse par spectroscopie infrarouge a été réalisée : l'analyse de la réponse de la liaison C=O permet de quantifier la concentration locale en polymère. En régime hydrodynamique, le film hydrodynamique de 5 μm a été établi, montrant l'influence majeure de la rhéologie du fluide [4].

MÉCANISMES DE FROTTEMENT

Le frottement de cette solution de PMA a été analysé à basse vitesse, lorsque les deux films limites sont en contact : des valeurs de frottement élevées sont mesurées, associées à une contribution viscoélastique. Cependant, l'existence de ces films limites de PMA induit une réduction des frottements par rapport à l'huile de base [5]. Pour des vitesses de glissement et une pression de contact plus élevées, une courbe de Stribeck est mesurée. Nous avons pu montrer que l'existence du film limite PMA déplaçait la transition de régime mixte/EHL vers des vitesses plus faibles par rapport à celle mesurée avec l'huile de base. Le cisaillement était également localisé dans le film hydrodynamique.

En régime hydrodynamique, pour des couches fluides de quelques μm , deux régimes sont identifiés : un régime non thermique de cisaillement du fluide, lors de l'accélération et de la décélération, et un régime thermique pendant lequel la température augmente en raison du cisaillement. Outre le changement lié à la relation viscosité-température, la présence de PMA due à l'adsorption modifie également l'extension de la zone de cavitation. Les propriétés non newtoniennes du fluide sous fort cisaillement sont discutées [4].

CONCLUSION

Cette approche multi-échelles innovante permet d'identifier les mécanismes de lubrification, en termes d'épaisseur de film et de frottement, sur 11 décades de vitesses de glissement et de pression de contact, grâce au développement de la plateforme de recherche IMOTEP. De plus, une analyse *in situ* est développée basée sur une mesure couplée optique, infrarouge et spectroscopie mécanique. Sur un exemple, nous montrons que les interactions entre la surface métallique et un additif améliorant de

viscosité induisent la formation d'un film limite protégeant les surfaces, décalent les transitions de régimes de lubrification vers des vitesses plus faibles et réduisent les mécanismes de frottement dans tous les régimes, via différents mécanismes, y compris la localisation du cisaillement, l'extension de la cavitation, etc.

Références

- [1] Crespo, A., et al. (2017), « Methodology to Characterize Rheology, Surface Forces and Friction of Confined Liquids at the Molecular Scale Using the ATLAS Apparatus », *Tribology Letters*, 65, Article number 138.
- [2] Ernesto, A., Mazuyer, D., Cayer-Barrioz, J. (2014), « The Combined Role of Soot Aggregation and Surface Effect on the Friction of a Lubricated Contact », *Tribology Letters*, 55, pp. 329–341.
- [3] Bonaventure, J., Cayer-Barrioz, J., and Mazuyer, D. (2016), « Transition Between Mixed Lubrication and Elastohydrodynamic Lubrication with Randomly Rough Surfaces », *Tribology Letters*, 64, 3, Article number 44.
- [4] Barazzutti, C. (2023) Doctorat 2023ECDL0002, Ecole centrale de Lyon, 2023.
- [5] Abouhadid, F. (2021) Doctorat 2021LYSEC48, Ecole centrale de Lyon, 2021.

Inter-comparaison de technologie de mesure sur un profilomètre multi-physique appliqué à des surfaces abrasées en TA6V

C. Moreau^{1,2}, P. Berenguer³, R. Guibert¹, F. Blateyron², C.A. Brown⁴ et M. Bigerelle¹

1. Univ. Polytechnique Hauts-de-France, CNRS UMR 8201 – LAMIH – Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique, Industrielles et Humaines, F-59313 Valenciennes, France

2. Digital Surf, 25000 Besançon, France.

3. Sensofar Metrology, 08225 Terrassa, Barcelona, Spain.

4. Surface Metrology Laboratory, Worcester Polytechnic Institute, Worcester, MA 01609, USA

MOTS CLES

Topographie, Tribologie, Multi-instrumentation

INTRODUCTION

La topographie permet de décrire avec précision une surface en quantifiant via des paramètres morphologiques divers mécanismes de frottement, de lubrification, ou d'usure. Par ce biais, les signatures topographiques sont observées et décrites via l'évolution des principaux paramètres d'amplitude, d'ondulation et hybride. Le but final étant de faire le lien entre la tribologie, les signatures topographiques et les dits paramètres. Cependant, les différentes méthodes de mesure topographique peuvent engendrer des résultats quantitatifs différents. La question se pose alors de choisir le profilomètre permettant au mieux de quantifier les processus tribologiques.

Dans le monde de la mesure des états de surface, il existe plusieurs types de profilomètre dont l'interférométrie, la focus variation et le confocal. Ces derniers sont particulièrement utilisés dans le monde de la tribologie. A ce jour, il n'existe pas de méthode pour faire un choix entre une de ces technologies avec pour objectif de caractériser au mieux une topographie de surface. Il en est de même concernant le choix de l'échelle d'observation significative. Il est donc nécessaire de se demander quelles sont les aptitudes à mesurer de chaque technologie et quelles sont leurs échelles de mesure caractéristiques face à une surface issue d'un processus donné. Autrement dit, on cherche à limiter les incertitudes de mesure en fonction de la surface observée, l'échelle d'observation afin de déterminer la technologie adéquate. Le postulat de principe est qu'une métrologie est bien adaptée pour décrire un ensemble de surfaces fonctionnelles si, après les mesures, il existe un indicateur topographique pertinent permettant de relier statistiquement la rugosité à la fonctionnalité, éventuellement après un traitement morphologique. De même, les quantifications d'incertitudes seront caractérisées par trois indicateurs basés sur un rapport signal/bruit i.e. le bruit topographique caractérisé par le paramètre morphologique discriminant divisée par l'amplitude du bruit de mesure. Le bruit de mesure est scindé en un bruit corrélé qui représente un drift de mesure et un bruit non corrélé qui représente un ensemble de fluctuations. La méthode développée ici permet de discriminer topographiquement deux niveaux d'abrasion, et ce, toujours avec la même précision et de vérifier si le système de mesure est toujours apte à estimer les paramètres morphologiques (dérive, défaillance).

MATERIAUX, MESURE ET METHODE

Partant de ce constat, une étude d'inter-comparaison sur un appareil multi-physique a été réalisé dans le but de décrire les aptitudes de mesure de l'interférométrie, la focus variation et la microscopie confocale. Des surfaces abrasées, d'état de surface voisin, ont été mesurées avec le profilomètre 3D *Sensofar SneoxTM*. Le choix d'états de surface voisins et de même nature permet de déterminer la capacité de chaque technologie à discerner deux niveaux d'abrasion proche. L'avantage de notre démarche réside dans l'utilisation d'un profilomètre incluant ces trois technologies : les variabilités des résultats sont minimisées par rapport à des mesures effectuées sur trois profilomètres indépendants (différentes conceptions hardware et software). Ce profilomètre multi-instrumenté permet d'effectuer, avec ces trois technologies intégrées, une mesure topographique en une même position avec une discrétisation spatiale identique sans manipulation de l'échantillon. De ce fait, il devient aisé de comparer localement l'influence du système de mesure et donc de dissocier la

variabilité morphologique (variation des formes) de la variabilité métrologique (bruit de mesure). C'est grâce à cette environnement qu'une discrimination la plus objective possible des technologies est rendu possible et donc un choix pertinent de la technologie retenue.

La figure 1 décrit l'alternance des mesures sur les deux échantillons d'alliage de titane (Ti-6Al-4V) polis au grade FEPA #80 et #120 et mesurés à l'aide des trois technologies. Pour chacune de ces technologies, le même monitoring de mesure a été utilisé. Une alternance de mesure est réalisée entre le grade #80 et #120, on passe donc d'un échantillon à l'autre. Pour une technologie de mesure, on effectue 30 répétitions correspondant à 30 zones de mesure d'un échantillon. Ce plan de mesure est itéré 10 fois en se repositionnant sur les mêmes zones de mesure. Puis ce monitoring est reproduit pour les deux autres technologies de mesure.

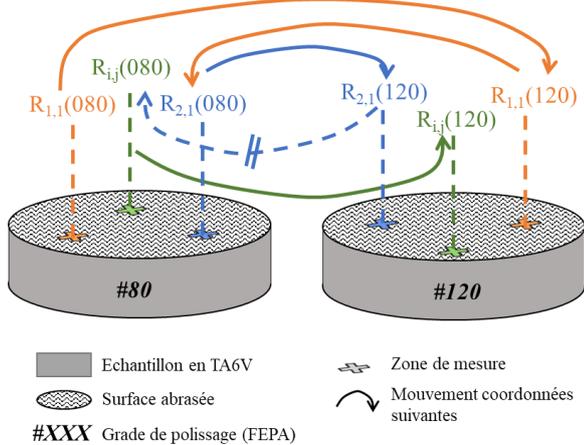


Figure 1: Plan de mesure.

La figure 1 représente, pour une technologie de mesure, la $j^{ème}$ itération du plan de mesure. La variable $r_{i,j}(Y)$ représente la cartographie r mesurée en position i à la $j^{ème}$ itération sur l'échantillon Y .

RESULTATS

Par une technique de Bootstrap, nous avons créé un indicateur, le **Quality Index**, qui montre que l'interférométrie possède un bruit de mesure 400 fois plus faible que la variabilité topographique caractérisée par le Sa (contre 90 pour la microscopie confocale et 110 pour la focus variation). Pour tester les erreurs de repositionnement, nous utilisons un modèle autorégressif d'ordre 2 (AR2) associé à la statistique de Durbin Watson qui permet de dissocier le bruit de mesure du bruit de dérive temporelle. Nous créons ainsi un indicateur (figure 2), le **Stability Index**, qui permet de montrer que la dérive temporelle ne dépend pas de la technologie de mesure et dans moins de 1 % des cas est supérieure à la moitié du bruit de mesure : cet indicateur suit une loi de probabilité exponentielle à un paramètre qui permet une modélisation statistique de la dérive pour chaque appareil. Il est ainsi montré, que les technologies utilisées dérivent peu au cours des essais et que l'interférométrie est légèrement plus sensible à la dérive que les deux autres technologies. Finalement, il est montré par une technique d'analyse de variances que le Sa discrimine les deux surfaces abrasées et nous avons créé pour cela le **Relevance Index** qui montre les trois technologies instrumentales discriminent identiquement les deux surfaces (avec un Sa de 0,43 μm pour le grade 120 et de 0,55 μm pour le grade 80) avec la même précision pour chaque grade. Il est également montré que la focus variation minimise de 0,03 μm le Sa par rapport à l'interférométrie dû à un effet de lissage de cette technologie.

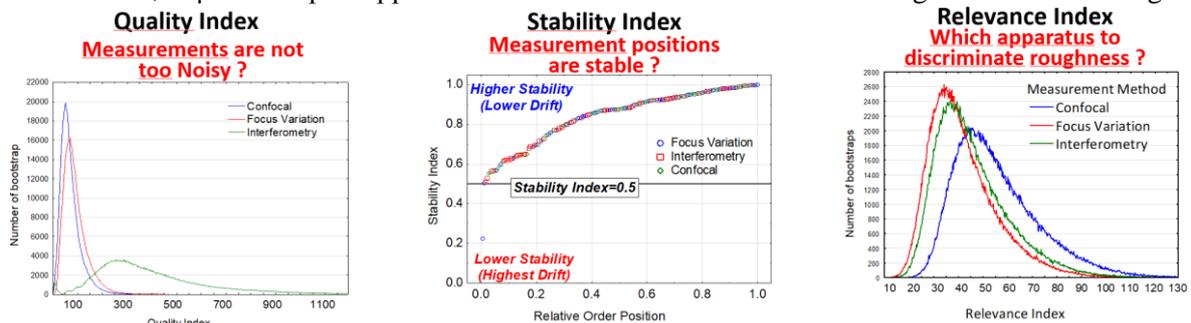


Figure 2: Description des trois indicateurs permettant une quantification des incertitudes liées aux trois technologies.

CONCLUSION

Nous avons développé une méthode qui permet de quantifier les différences topographiques et les incertitudes associés. Il ressort que les trois technologies interférométrie, focus variation et microscopie confocal discrimine identiquement les surfaces abrasées avec une précision métrologique plus marquée pour l'interférométrie.

Interet de l'analyse in situ pour l'étude des particules d'usure des implants articulaires de hanche et l'analyse de leurs effets sur les tissus biologiques

V. Massardier¹, M. Catinon², M. Vincent², A-M. Trunfio-Sfarghiu¹

1. Univ Lyon, INSA Lyon, CNRS, LaMCoS, UMR5259, 69621 Villeurbanne, France

2. MINAPATH Développement, 56 Boulevard Niels Bohr, 69603 Villeurbanne, France

MOTS CLES

Arthroplastie, Hanche, Particules, Tribologie

INTRODUCTION

Les maladies ostéo-articulaires sont des pathologies inflammatoires et dégénératives des articulations survenant pour la plupart chez des patients âgés suite au vieillissement ou à un traumatisme. Représentant environ 10% des pathologies identifiées en France chaque année, elles évoluent généralement vers une usure importante du cartilage se traduisant pour le patient par des douleurs et des incapacités fonctionnelles. Unique traitement des stades avancés de nombre de ces pathologies, l'arthroplastie est le remplacement des surfaces articulaires par une prothèse. Ce dispositif médical vise à reproduire au mieux la mécanique de l'articulation et à rétablir sa fonction, et son pronostic fonctionnel est très favorable au patient. La hanche est l'une des articulations les plus touchées par ces pathologies et la plus opérée avec près de 150000 arthroplasties par an, chiffre en constante augmentation du fait de l'allongement de l'espérance de vie et de l'amélioration de la durabilité des implants qui permet d'opérer des patients plus jeunes.

Pendant, ces prothèses étant des contacts frottants, elles restent sujettes à l'usure et émettent des particules pouvant entraîner des réactions des tissus articulaires entourant la prothèse, voir même des à distance une fois que les particules les plus fines ont diffusé jusqu'au système circulatoire. Les industriels cherchent en permanence à réduire le taux d'usure de leurs nouveaux implants pour tenter d'augmenter leur durée d'implantation potentielle, les particules émises sont donc de plus en plus petites et de moins en moins détectables par les techniques actuelles de digestion des tissus, rendant plus difficile l'estimation de leur nano-toxicité.

Le but de cette étude est d'évaluer de nouvelles techniques et de les recouper afin de comprendre le devenir des différentes particules créées dans les contacts articulaires prothétiques tout en cherchant à évaluer leurs risques pour le patient.

MATERIEL & METHODES

Afin de récupérer des implants et des tissus biologiques, un partenariat a été engagé avec les Hospices Civiles de Lyon pour collecter des déchets opératoires lors de chirurgies visant à remplacer un implant défectueux ou usé. 9 PTH de différents designs et matériaux ont pu être récupérées ainsi que les membranes et liquides synoviaux des patients pour pouvoir y rechercher des particules. La cause principale de la reprise était le descellement de l'implant (4 implants), suivie par les douleurs (3 patients), une casse de l'implant (1 patient) et une usure importante d'un composant polyéthylène (1 patient), avec une durée moyenne d'implantation de 12 ans et 4 mois. Les implants ont été répartis dans trois groupes en fonction de leur couple de frottement : métal contre polyéthylène (PE), céramique contre PE ou céramique contre céramique.

Une fois récupérée, la membrane synoviale a été incluse dans un bloc de paraffine dans lequel ont été réalisées deux coupes minces afin de permettre les analyses. La première coupe, déposée sur lame de verre, a été colorée par HES (hématoxyline, éosine, safran) puis scannée grâce à un scanner

Axio Scan.Z1 (ZEISS, Oberkochen, Allemagne) pour permettre son observation par le logiciel logiciel ZEN Lite Blue (ZEISS). La microscopie photonique a été choisie car elle permet l'observation à la fois des particules et des tissus pour établir une relation causale entre exposition et pathologie (Fig. 1a).

La deuxième coupe mince a été déposée sur disque de carbone pour être analysée grâce au microscope électronique à balayage JSM-6010LV Plus (JEOL, Tokyo, Japon) couplé à un détecteur EDS-SDD X-Max® (Oxford Instruments, Abingdon, UK) et au logiciel INCA Energy (Oxford Instruments). Le MEB permet une observation en nuances de gris en fonction de la composition élémentaire (Fig. 1b), d'où l'utilisation d'un disque carbone qui va ressortir de la même manière qu'un tissu biologique, alors qu'une lame de verre aurait masqué les particules de silicium. Cependant, la grande proximité de composition entre le PE et le tissu biologique ne permet pas de détecter ces débris avec cette technique. Une fois les particules retrouvées sur la lame, elles ont ensuite été analysées par ESM afin d'obtenir leur composition élémentaire exacte (Fig. 1c). Le rapprochement des images de microscopie photonique et électronique permet ensuite de mettre en relation la composition exacte des particules et les structures histologiques observées (Fig. 1a et 1b).

La surface des blocs de paraffine a ensuite été soumise à une analyse par spectroscopie plasma induite par laser (*laser induced breakdown spectroscopy*, LIBS) en coopération avec la société ABLATOM (Villeurbanne, France). Beaucoup moins précise que la microscopie, cette technique consiste à concentrer un laser sur un point de quelques dizaines de micromètres de diamètres à la surface d'un échantillon puis à analyser par spectroscopie les émissions lumineuses du plasma ainsi produit. Même si la limite de détection des éléments est très faible, elle ne permet pas de donner de valeur quantitative et surtout de voir les particules, le résultat est donc une carte de l'échantillon (Fig. 1d) permettant d'identifier les zones « surchargées » ou non, chaque spot correspondant à un point sur lequel a frappé le laser.

Enfin, pour mesurer la concentration ionique des éléments métalliques susceptibles de se propager dans la circulation sanguine, une analyse ICP-MS a été effectuée sur des échantillons de liquide synovial au laboratoire LGLTPE de l'ENS Lyon. Cette technique a été choisie car elle peut être effectuée sur une très petite quantité, contrairement aux techniques de digestion qui nécessitent environ 1 ml de liquide synovial. De plus, elle permet tout comme le LIBS de doser des particules ou des ions trop petits pour être visibles en microscopie.

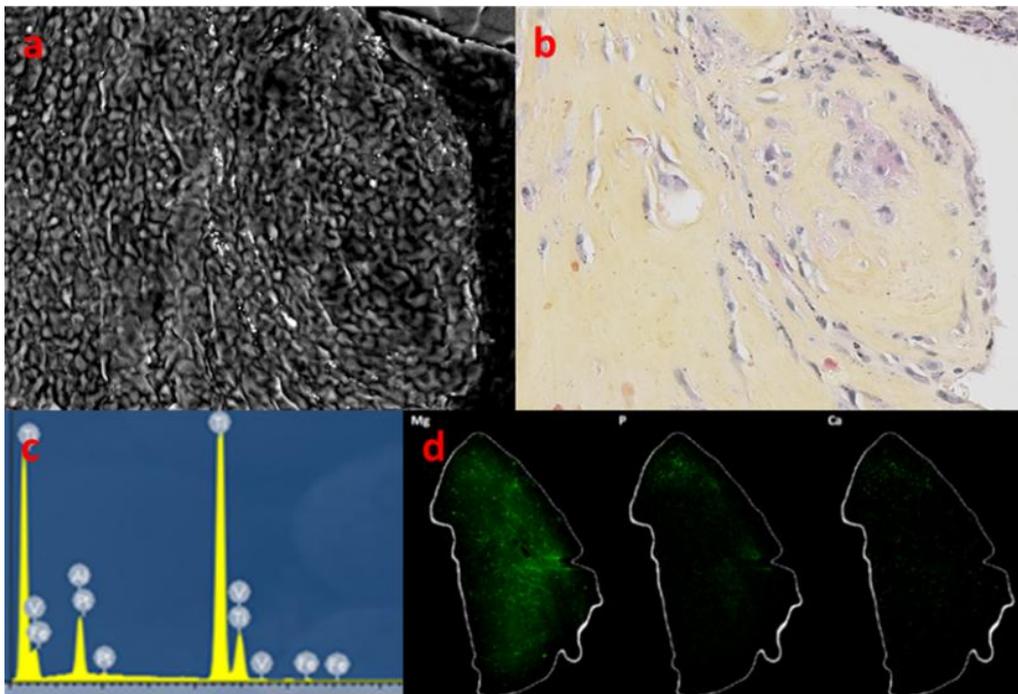


Figure 1 : exemples de résultats obtenus avec les techniques utilisées : a. microscopie électronique à balayage, b. microscopie optique, c. spectre EDS et d. LIBS

RESULTATS

Les particules de polyéthylène, qu'elles soient issues d'un couple de frottement métal/PE ou céramique/PE, peuvent être retrouvées sous trois formes : premièrement des flocons de taille micrométrique pouvant provenir d'un mécanisme d'usure adhésive ; deuxièmement des rouleaux qui semblent être des flocons s'étant enroulés sur eux-mêmes lors du frottement ; et troisièmement des particules nanométriques de forme ronde et pouvant s'agglomérer en amas, et dont la proportion augmente si le PE est plus réticulé pour augmenter sa résistance. Ces particules sont souvent retrouvées proches ou à l'intérieur de cellules du système immunitaire, voire au sein de granulomes, ce qui marque une forte réaction inflammatoire due à ces particules. Cette réaction est l'une des hypothèses les plus probables du descellement des implants articulaires.

Les particules de céramique, pour leur part, peuvent être retrouvées sous deux formes différentes. Dans le premier cas, de nombreuses particules nanométriques peuvent être retrouvées au sein de tissus très fibreux. Vu leur taille très inférieure à celle des grains d'alumine composant le matériau, il semblerait que certains d'entre eux se soient détachés par un mécanisme d'usure de fatigue avant d'être réduits en poudre au sein du contact, en étant également à l'origine de l'arrachage d'autres grains. Des particules plus grosses mais moins nombreuses peuvent également être retrouvées et mélangent de l'alumine et du titane. Il semblerait que le contact du rebord en céramique de la cupule de la prothèse avec le col métallique de sa tige entraîne un arrachement de titane qui va ensuite se mélanger avec la poudre d'alumine au sein du contact et tapisser les surfaces frottantes. La réaction d'inflammation et de fibrose tissulaire, très importante, ne semble pas être associée aussi fortement au descellement que pour les particules polyéthylène, l'épaississement de la membrane synoviale et la hausse inuite de la résistance de l'articulation à la décoaptation étant même parfois un effet secondaire recherché par le chirurgien pour certains patients à fort risque de luxation.

Les émissions métalliques, pour leur part, sont retrouvées soit sous forme de particules soit sous forme ionique. Les particules, pour commencer, sont beaucoup plus présentes dans le cas des prothèses à double mobilité possédant un contact céramique/PE. En effet, il semblerait que certains grains de céramique arrachés à ce premier contact migrent ensuite dans le deuxième contact métal/PE et provoquent une forte abrasion. Au contraire, dans le cas des contacts métal/PE seul, les particules sont très peu présentes. En plus de ces particules stoppées par la membrane, l'analyse ICP-MS montre une émission d'ions cobalt, chrome et nickel, les trois éléments entrant dans la composition de l'alliage constitutif des prothèses. Comme pour les particules, les prothèses à couple de frottement céramique/PE sont celles qui montrent le taux d'ions métallique le plus élevé, jusqu'à 20 fois plus élevé pour le chrome. Alors que les particules fixées dans la membrane causent des inflammations locales, ces contaminations ioniques peuvent déclencher des pathologies systémiques ou projetées dont les risques pour le patient dépassent largement les bénéfices, ce qui a pu conduire à des interdictions de pose de certains modèles d'implants.

CONCLUSION

Les nouvelles techniques développées dans ce travail pour l'analyse *in situ* des particules d'usure au sein des tissus périarticulaires ont montré des résultats complémentaires permettant de mieux comprendre le devenir des débris d'usure des prothèses au sein de l'articulation. Ces nouveaux protocoles d'analyse des échantillons peuvent permettre de mieux comprendre l'origine de la pathologie ayant conduit au remplacement d'une prothèse afin de mieux l'anticiper et donc d'augmenter la durée de vie des implants. Cependant, la recherche continue de l'usure la plus faible possible ne doit pas faire oublier la facilité avec laquelle les particules les plus petites diffusent à travers l'organisme. Il conviendrait donc, au lieu de chercher à réduire la valeur brute de l'usure, de chercher plutôt à créer les particules les moins nocives pour l'organisme.

USURE DE SURFACES ONDULEES REVETUES D'OR

V. Magnin¹, S. Mischler¹

1. EPFL École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Institut des Matériaux, station 12, CH-1015 Lausanne

MOTS CLES

Revêtement, Ondulation, Frottement

Les revêtements d'or sont largement utilisés dans les contacts électriques et d'autres applications en raison de leur unique combinaison propriétés électriques, thermiques, tribologiques ainsi que de leur tenue à la corrosion. L'or est couramment utilisé comme revêtement mince dans les systèmes multicouches impliquant généralement des substrats en nickel. Les performances tribologiques de tels systèmes ont été étudiées dans le passé par plusieurs auteurs. Néanmoins, les finitions de surface lisses étudiées jusqu'à présent ne correspondent pas à celles trouvées dans de nombreux dispositifs micromécaniques produits par exemple par décolletage. Par conséquent, cette étude a été initiée dans le but d'évaluer la réponse tribologique des revêtements d'or multicouches déposés sur des surfaces modèles ondulées imitant des surfaces tournées.

Les surfaces du modèle avec un profil d'ondulation spécifique ont été produites au laser d'un moule en polycarbonate. Dans une deuxième étape, le substrat en nickel a été obtenu par procédé d'électroformage sur le moule en polycarbonate. Des revêtements d'or d'épaisseurs 50, 100 et 160 nm ont été déposés par électrodéposition à partir d'un bain d'or commercial. Les tests tribologiques ont été exécutés à l'aide d'un nano tribomètre en mouvement alternatif avec une bille en alumine comme contrepièce. Les résultats montrent que la couche d'or est déformée plastiquement et s'éloigne des aspérités supérieures lors des premiers cycles de glissement. Aucune usure n'est observée mais de l'or s'accumule sur les bords des aspérités. En conséquence, la couche d'or est amincie au niveau des aspérités supérieures, et le substrat de nickel est localement exposé en surface. Un modèle mécanique simple tenant compte de la pression de contact, des propriétés géométriques et de frottement a été développé pour prédire l'épaisseur d'or minimale nécessaire pour lubrifier le système.

Impact de l'anisotropie morphologique et cristallographique sur le comportement tribologique d'un superalliage base nickel obtenu par procédé L-PBF : premiers résultats

P.-N. Parent^{1,2}, J.-Y. Paris², C. Boher¹ et J. Alexis²

1. Institut Clément-Ader (ICA); Université de Toulouse; CNRS, IMT Mines Albi, INSA, ISAE-SUPAERO, UPS; Campus Jarlard, 81013 Albi, France

2. Laboratoire Génie de Production (LGP), ENIT/INPT, Université de Toulouse, 47 avenue d'Azereix, 65000 Tarbes

MOTS CLES

Fabrication additive, anisotropie, microstructure, comportement tribologique

INTRODUCTION

Le procédé de fusion laser sur lit de poudre (L-PBF) est un procédé qui permet de fabriquer des pièces couche par couche par ajout de matière. L'ABD-900AM, un superalliage base nickel, présente la particularité de pouvoir être fabriqué avec une densité supérieure à 99% et sans fissure sur une large gamme de paramètres de lasage tout en gardant des propriétés mécaniques équivalentes voire supérieures à l'Inconel 939 et à l'alliage CM247LC. Cependant, sa microstructure et ses propriétés restent très dépendantes des post-traitements et des paramètres procédés, car il est connu qu'en fonction des choix de paramètres de fabrication, les pièces fabriquées peuvent présenter des anisotropies marquées.

Notre étude à caractère exploratoire vise à montrer le rôle de la direction de fabrication, de la stratégie de lasage (rotation entre les couches, orientation des couches afin de contrôler l'angle entre la surface frottante et la direction de lasage) sur la microstructure (anisotropies cristallographique et morphologique) et le comportement tribologique de l'ABD-900AM. Les essais tribologiques sont menés à température ambiante pendant 3600 s avec une géométrie de contact ponctuelle (bille en alumine de 10 mm de diamètre sur plan en ABD-900AM) et une cinématique alternative sous une charge de 20 N, une fréquence d'oscillation de 1 Hz et une longueur de glissement de 10 mm. La microstructure et l'évolution des paramètres tribologiques sont analysés / discutés en fonction des paramètres procédés et des conditions opératoires. Ces analyses s'appuient sur les techniques de caractérisation tels que des observations MEB, des analyses EBSD ou de diffraction X et des essais de microdureté.

ANISOTROPIES GENEREES AU COURS DE L'IMPRESSION

Des premières analyses de phases ont permis de mettre en évidence une anisotropie cristallographique en fonction des paramètres de fabrication. Les rapports d'intensité des pics de diffraction par rapport au pic le plus intense correspondant au plan (111) varient par rapport à la fiche JCPDS n° 00-047-1417. Les pièces fabriquées avec une stratégie de lasage bidirectionnelle sans rotation entre couches ont des orientations cristallines privilégiées selon l'angle de lasage : les pics les plus intenses sont respectivement pour les plans (200) et (111) pour les orientations de lasage de 90° et 45° dans le plan d'analyse (YZ). Tandis que les pièces fabriquées avec une rotation entre couches de 67° présentent une anisotropie moins marquée si l'on compare les rapports d'intensité des pics à ceux de la fiche JCPDS. Des analyses par diffraction de rayons X ainsi que des analyses plus locales par EBSD ont confirmé ces résultats. Elles ont été menées sur les faces parallèles (plan YZ) et perpendiculaires (XY) à la direction de fabrication d'un échantillon fabriqué avec une stratégie de lasage bidirectionnelle sans rotation entre couches (Fig. 1). La croissance colonnaire des grains selon la direction

cristallographique $\langle 001 \rangle$ est observée sur le plan parallèle à la direction de fabrication (plan YZ) par rapport à la direction de lasage. Cette direction cristallographique est en effet privilégiée dans la direction du gradient thermique pour les alliages cubique faces centrées (CFC). Tandis que la face perpendiculaire (XY) présente une structure bimodale composée de grains équiaxes au centre du bain de fusion et de grains colonnaires entre les bains de fusion, orientés $\langle 101 \rangle$ par rapport à la direction de fabrication. Ainsi, il est possible de générer différentes anisotropies morphologiques et cristallographiques en modifiant un paramètre procédé, ici la direction de fabrication.

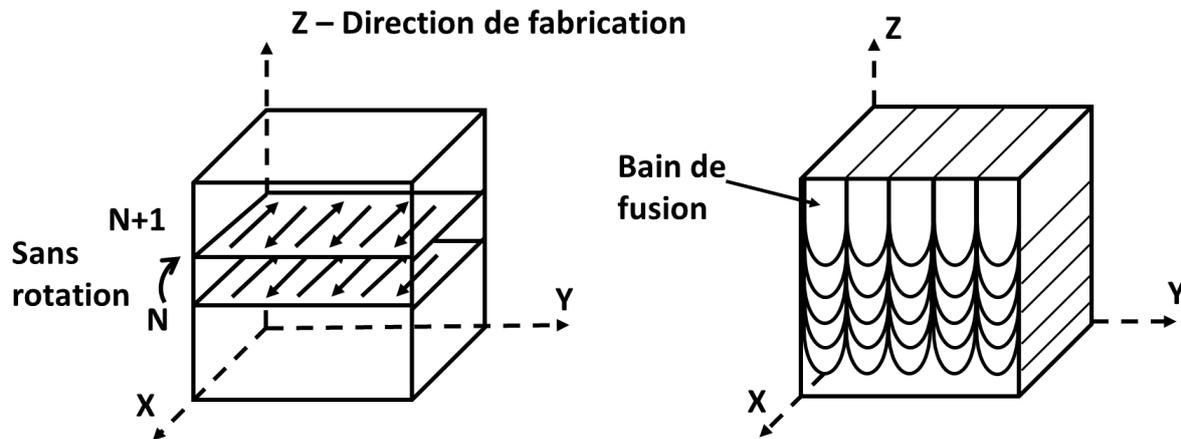


Figure 1 Représentation schématique d'une pièce fabriquée avec une stratégie de lasage bidirectionnelle sans rotation entre les couches et la macrostructure (bains de fusion) générée

IMPACT DES PARAMETRES PROCEDES SUR LE COMPORTEMENT TRIBOLOGIQUE

A l'heure actuelle, l'étude de l'influence des paramètres de fabrication (direction de fabrication, rotation entre couche et angle de lasage) sur le comportement tribologique s'appuie principalement sur le volume d'usure de la pièce fabriquée et la profondeur affectée thermo mécaniquement, déterminée par des mesures de dureté sous une charge de 25 g sous la trace d'usure. Les premiers résultats montrent qu'il existe une relation entre la rotation entre couches et l'angle de lasage vis-à-vis du volume d'usure et de la profondeur écrouie. En effet, sur le plan (YZ) pour un empilement sans rotation entre couches, une pièce fabriquée avec un angle de lasage de 45° présente un volume d'usure de $0,57 \pm 0,08 \text{ mm}^3$ contre $0,85 \pm 0,06 \text{ mm}^3$ pour une pièce fabriquée avec un angle de lasage de 90° . Tandis que sur le plan (XY), le volume d'usure de la pièce varie respectivement de $0,83 \pm 0,08 \text{ mm}^3$ à $0,64 \pm 0,03 \text{ mm}^3$ pour des empilements sans rotation et avec rotation de 67° . Des mesures de dureté en sous couche ont aussi mis en évidence que la profondeur affectée thermo mécaniquement varie de $50 \mu\text{m}$ à plus de $200 \mu\text{m}$ en fonction des paramètres de fabrication.

CONCLUSION

Les premières analyses montrent que les macrostructures et microstructures générées au cours de la fabrication et les anisotropies qui en découlent sont modulables à partir de certains paramètres de fabrication (direction de fabrication, rotation entre couches, angle de lasage). Selon les premiers résultats des essais tribologiques, ces anisotropies morphologiques ou de texture ont une influence directe sur le volume d'usure et l'épaisseur affectée thermo mécaniquement des pièces fabriquées. Cependant, l'influence des textures cristallographiques et morphologiques sur les mécanismes d'accommodation et les différents débits de matière (associés à la création, circulation et éjection des débris) reste encore à déterminer.

IMPROVEMENT OF SURFACE PROPERTIES OF 30CrMo12 STEEL USING BOROCARBONITRIDING TREATMENT

A. Rezala¹

1. Department of Mechanical and Production Engineering, Mechanical and Process Engineering Faculty, University of Science and Technology Houari Boumediene (USTHB), B.P. 32, El-Alia 16111 Bab Ezzouar, Algiers, Algeria

MOTS CLES

Borocarbonitriding, 30CrMo12 Steel, Microstructure and Microhardness

ABSTRACT

Thermochemical treatments of low alloyed steels play an essential role in improving the service life of parts under harsh conditions. Often, the treatment uses require technical significant and financial resources. For this reason, the thermochemical treatments in traditional ovens deserve consideration. In present paper, an experimental study on a 30CrMo12 steel uses the technique of borocarbonitriding process, based on the determination of the borocarbonitrided thickness layers and the kinetic constants of diffusion carried out. This nuance is used in manufacturing mechanical parts specifically solicited in fatigue as the transmission gearings in the helicopters' rotors and the rolling of in aeronautics. Borocarbonitride treatments were performed in the temperature range of 520°C for 8h. The Borocarbonitride modified surface layer samples consist mainly of γ' , ϵ , α , FeB, Fe₂B, and Fe₃C phases; according to metallographic technique analysis, it seems to be essentially a modification of the austenite matrix. High hardness values are observed in the modified layer with a sharp decrease in matrix values.

FROTTEMENT ENTRE DEUX FIBRES OU FILS DE CARBONE : ETUDE EXPERIMENTALE ET MODELE ANALYTIQUE

M. Tournalias¹, G. Arnold, M.-A. Bueno

1. Université de Haute Alsace, Laboratoire de Physique et Mécanique Textiles (LPMT, UR 4365), Mulhouse, France

MOTS CLES

Tribomètre linéaire alternatif, Renfort de composite, Cycle de frottement

INTRODUCTION

La fibre de carbone est très fréquemment utilisée en tant que renfort des matériaux composites, notamment dans le domaine de l'aéronautique. Dans ce domaine très exigeant, le simple fait de fabriquer un matériau composite à renfort de fibres de carbone n'est pas suffisant et le procédé de fabrication doit être contrôlé afin d'obtenir ces matériaux dépourvus de défauts. Une bonne connaissance du procédé est également requise pour améliorer la productivité. Il a été prouvé que de nombreux défauts sont dus au contact entre les fils de carbone ou entre ces mêmes fils et les pièces mécaniques des machines utilisées au cours des étapes de fabrication du renfort fibreux [1]. Aussi, depuis plusieurs années, des études sont menées afin d'analyser le comportement au frottement des fils et de fibres de carbone et comprendre les phénomènes en jeu [2, 3].

ETUDE EXPERIMENTALE : FROTTEMENT ENTRE FILS OU ENTRE FIBRES

Les expérimentations sont menées au moyen de tribomètres conçus (échelles fils et fibres) pour cette étude. Dans l'expérience, deux fibres de carbone (ou deux fils) sont mises en contact avec une force de contact donnée (Fig. 1-b). Un mouvement linéaire alternatif est imposé à l'échantillon inférieur et les forces de frottement sont enregistrées au cours des cycles de frottement ainsi produits. L'influence de différents paramètres est étudiée. A l'échelle du fil, il s'agit principalement de la structure du fil et en particulier de sa torsion. A l'échelle de la fibre, les forces de frottement sont influencées par l'ensimage. Aux deux échelles, l'angle de contact entre les échantillons est un paramètre commun et très important.



Figure 1: Schéma du contact entre deux fibres de carbone (en rouge et en bleu) : force normale le long de l'axe Z et force tangentielle le long de l'axe X au cours d'un test de frottement avec un déplacement le long de l'axe X, a) sans déformation et b) avec déformation des fibres.

MODELE DE FROTTEMENT ANALYTIQUE : FROTTEMENT ENTRE FIBRES

Le coefficient de frottement apparent est défini comme le rapport entre les forces tangentielle (horizontale, selon l'axe X) et normale (verticale, selon l'axe Z). Durant un essai de frottement il n'est pas rigoureusement constant et peut notablement dépendre des conditions expérimentales (Fig. 1-b). Le modèle proposé permet de prendre en compte la prétension, la force normale aussi bien que les propriétés mécaniques des fibres afin de déterminer le coefficient de frottement intrinsèque (Fig. 2). Le modèle et l'expérience montrent une très bonne correspondance. Cependant quelques écarts apparaissent après chaque changement de sens de glissement.

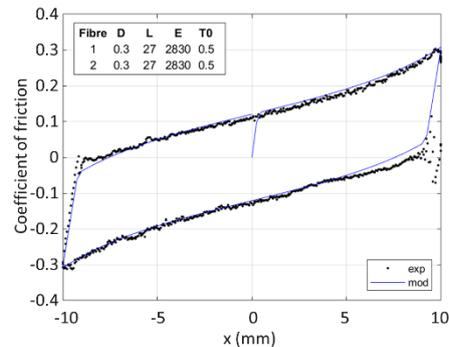


Figure 2: Exemple de courbe expérimentale d'un cycle de frottement et courbe obtenue avec le modèle analytique dans le cas d'une fibre de polyamide.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Au cours de cette étude, un modèle analytique d'un essai de frottement entre deux fibres en contact à un angle de 90° a été développé. Il montre sa pertinence par rapport à un test expérimental et permet de valider les principales hypothèses du modèle d'un point de vue des sollicitations subies par les fibres en contact. L'origine des petits écarts observés après les retournements reste à déterminer.

Par la suite, il s'agira d'enrichir le modèle afin de pouvoir prendre en compte un angle de contact quelconque (non nécessairement perpendiculaire) d'une part et des effets dynamiques d'autre part. En effet, au cours du processus de fabrication du renfort fibreux d'un composites, les sollicitations en frottement peuvent se produire selon d'autres angles de contact et à différentes vitesses. L'étude expérimentale a d'ailleurs déjà montré un effet de la vitesse [4].

Références

- [1] J. Walther, C. Bessette, M. Decrette, M. Tournalias, M.-A. Bueno, J.-F. Osselin, F. Charleux, D. Coupé (2021), « *Yarn Damage Conditions Due to Interactions During Interlock Weaving Process: In-situ and In-lab Experiments* », Applied Composite Materials, 2021.
- [2] D. M. Mulvihill, O. Smerdova, M. P. F. Sutcliffe (2017), « *Friction of carbon fibre tows* », Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, **93**, pp. 185-198, 2017.
- [3] B. Cornelissen, B. Rietman, R. Akkerman (2013), « *Frictional behaviour of high performance fibrous tows: Friction experiments* », Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, **44**, pp. 95-104, 2013.
- [4] M. Tournalias, M.-A. Bueno, D. Poquillon (2017), « *Friction of carbon tows and fine single fibres* », Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, **98**, pp. 116-123, 2017.

Tribomètre pour l'étude des contacts à très grande vitesse, haute température et incursion contrôlée

J. Vincent¹, B. Chevrier^{1,2}, S. Philippon¹

1. Université de Lorraine, CNRS, Arts et Métiers ParisTech, LEM3, F-57000, Metz, France

2. Safran Aircraft Engines, Safran Group,, F-77551, Moissy-Cramayel, France

MOTS CLES

Grande vitesse, Haute température, Incursion contrôlée, Canon à gaz, Turboréacteurs

RESUME

Le tribomètre présenté s'inscrit dans le cadre de l'étude des contacts à très grande vitesse. Il fait suite aux précédents tribomètres développés dans le cadre de l'étude des contacts aube-carter dans les turboréacteurs [1-3] mais aussi de l'usinage à grande vitesse [4]. Les contacts aube-carter peuvent avoir lieu lors du fonctionnement normal du turboréacteur (vibrations, dilatations thermiques, ...) mais aussi lors d'événement accidentels (ingestion de débris ou d'oiseaux). L'étude de ces contacts est particulièrement complexe du fait des hautes vitesses (jusqu'à 450 m/s), des hautes températures (jusqu'à 1600 °C) et des faibles incursions (inférieures à 50 µm). Ces conditions étant imposées de manière quasi-instantanée pour des durées de contact extrêmement faibles (quelques centaines de microsecondes)

Le tribomètre développé dans le cadre de cette étude permet de reproduire des essais dans des conditions représentatives de ces contacts. Lors de la conception, l'accent a été tout particulièrement porté sur la constance de ces trois paramètres tout au long du contact.

Le tribomètre permet de réaliser des essais d'interaction à incursion contrôlée entre une éprouvette mobile et un outil fixe suivant une trajectoire linéaire. Il est constitué d'un canon à gaz permettant de propulser un chariot porte-éprouvette (aussi appelé projectile) guidé linéairement par un rail contre un outil fixe positionné quelques dizaines de micromètres plus bas que l'éprouvette. L'utilisation d'un canon à gaz permet d'obtenir une vitesse quasi-constante grâce à l'importante énergie cinétique stockée dans le chariot (jusqu'à 22 kJ).

La qualité du guidage est ici primordiale afin d'assurer une profondeur d'incursion constante durant l'essai. La solution développée a ainsi permis de limiter la variation de profondeur d'incursion à quelques dizaines de micromètres pour des vitesses de glissement comprises entre 50 et 250 m/s.

De plus ce dispositif expérimental permet de réaliser des essais en température où les éprouvettes peuvent être portées à haute température (jusqu'à 750°C) en intégrant un élément chauffant dans l'ensemble chariot-éprouvette [5].

L'objectif de cette communication est de présenter l'ensemble des techniques mises en œuvre dans ce développement et de montrer en s'appuyant sur un essai à grande vitesse les mesures obtenues. Ces résultats offriront par la suite des enseignements essentiels à la compréhension de la cinématique du contact, aux échanges thermiques ou de manière plus générale au comportement du tribosystème.

CONCLUSION

Le tribomètre développé permet de réaliser des contacts à très grande vitesse (250 m/s) et haute température avec une incursion quasi-constante de l'outil dans le matériau pour des incursions faibles (50 µm). La forte instrumentation du dispositif permet selon les besoins de mesurer les efforts d'interaction suivant 3 axes, la température du matériau en amont et en aval du contact, la température au contact, l'incursion réelle ou encore le comportement du troisième corps.

Références

- [1] M. Cuny, S. Philippon, P. Chevrier, F. Garcin (2014). « *Experimental Measurement of Dynamic Forces Generated during Short-Duration Contacts: Application to Blade-Casing Interactions in Aircraft Engines* », *Experimental Mechanics*, 54 (2), 101–114.
- [2] J. Vincent, S. Philippon, A. Cappella, J. Meriaux, S. Selezneff (2017). « *Enhancement of an experimental method to measure accurately the evolution of forces during short-lived interactions: Application to blade-abradable material contacts in turbomachines* », *Measurement*, 98, 167–178.
- [3] B. Martinet, A. Cappella, S. Philippon, C. Montebello (2020). « *Effect of temperature on wear mechanisms of an aluminium - Based abrasible coating for aircraft engines after a dynamic interaction with a Ti6Al4V blade* », *Wear*, 446–447.
- [4] Y. Avezor, J. Vincent, L. Faure, A. Moufki, S. Philippon (2017). « *An ALE approach for the chip formation process in high speed machining with transient cutting conditions: modeling and experimental validation* », *International Journal of Mechanical Sciences*, 130, 546-557.
- [5] B. Martinet, S. Skiba, S. Philippon, J. Vincent (2019). « *Projectile chauffé pour un banc d'essai de reproduction d'une interaction dans une turbomachine d'aéronef* », Patent FR3098910.

CONTACT PNEU-CHAUSSEE EN TRACTION, FREINAGE OU EN VIRAGE

Efoé R. Wallace¹, Daniel Nélias¹, Thibaut Chaise¹, Arnaud Duval¹, Philippe Reynaud²,
Christophe Petit²

1 INSA Lyon, CNRS, LaMCoS, UMR5259, 69621 Villeurbanne, France

2 Université de Limoges, GC2D, EA 3178, F-19300 Egletons, France

MOTS CLES

Contact tractif, contact pneu-chaussée, multi-couche

RESUME

Les objectifs des constructeurs de pneumatiques, ceux des routes, et ceux des usagers sont différents, parfois orthogonaux. Certains privilégient l'adhérence, d'autres la durée de vie, ou l'usure et l'émission de particules associée. Le contact 'tractive' élastique entre deux massifs homogènes et isotropes est relativement bien traité depuis les travaux de Kalker (1968). Nous présenterons ici une extension de la méthode pour des massifs revêtus, et une application directe pour un contact pneu/chaussée. Pression de contact et contraintes dans la sous-couche seront discutées dans des cas extrêmes : traction, freinage, virage.

Références

- [1] Wallace, Efoe Rodrigue, Chaise, Thibaut, Nelias, Daniel (2020) 'Three-dimensional rolling/sliding contact on a viscoelastic layered half-space', *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 143 , ARTN 104067
- [2] Oubahdou, Y., Wallace, E-R., Reynaud, P., Picoux, B., Dopeux, J., Petit, C., Nelias, D. (2021) 'Effect of the tire-Pavement contact at the surface layer when the tire is tilted in bend', *Construction and Building Materials* 305 , ARTN 124765
- [3] Wallace, Efoe Rodrigue, Chaise, Thibaut, Nelias, Daniel (2022) 'Rolling contact on a viscoelastic multi-layered half-space', *International Journal of Solids and Structures* 239 , ARTN 111388
- [4] Wallace, Efoe Rodrigue, Chaise, Thibaut, Duval, Arnaud, Nelias, Daniel (2023) 'Transient tractive rolling contact between elastically dissimilar and multi-layered bodies', *International Journal of Solids and Structures* 265 , ARTN 112124

SIMULATION DU TOUCHER DE SURFACES TEXTILES A L'AIDE D'UN STIMULATEUR : CONCEPTION DES SIGNAUX DE COMMANDE

B. Weiland¹, A. Kaci², F. Leclinche¹, B. Camillieri¹, B. Lemaire-Semail² et M.-A. Bueno¹

1. Université de Haute Alsace, Laboratoire de Physique et Mécanique Textiles (LPMT, UR 4365), Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs Sud Alsace, Mulhouse, France

2. Univ. Lille, Arts et Metiers Institute of Technology, Centrale Lille, Junia ULR 2697 - L2EP, Lille, France

MOTS CLES

Tactile, textile, simulation.

INTRODUCTION

L'objectif de ce projet, nommé TacFib, est de simuler le toucher de surfaces textiles par modulation du frottement grâce à un stimulateur tactile, nommé STIMTAC [1]. Ce projet a de nombreuses applications, de la co-conception de prototype tactile au e-commerce de vêtements. Des études préliminaires ont permis de valider le concept de simulation du toucher par modulation du frottement pour quelques types d'étoffes et avec des signaux de commande générés soit qualitativement [2,3], soit en combinant des signaux provenant de différents frotteurs [4]. Dans le présent projet, la difficulté consiste à considérer une grande variété de surfaces textiles et de définir un protocole systématique pour générer les signaux de commande correspondants et ceci afin d'être utilisable dans un contexte industriel. Pour cela trois étapes principales sont abordées : i) l'acquisition de signaux tribologiques pertinents entre 6 surfaces textiles et un doigt artificiel, ii) la définition d'un traitement systématique du signal pour concevoir les signaux de commande utilisés pour générer des textiles virtuels, et iii) la validation des performances du stimulateur par l'évaluation de la perception tactile à partir d'un panel entraîné.

CARACTERISATION TRIBOLOGIQUE ET TRAITEMENT DU SIGNAL

Un doigt artificiel [5] a été frotté contre 6 étoffes, choisies pour leur diversité, selon un protocole identifié (Figure 1 (a) – Ft (noir) et Fn (gris)). Les signaux des forces normale et tangentielle sont traités pour obtenir un signal représentant le contact entre le doigt et le textile. Ce signal est alors utilisé pour commander le stimulateur (Figure 1 (b)).

PERCEPTION TACTILE DES TEXTILES REELS ET VIRTUELS

L'évaluation des performances se fait en comparant l'intensité de perception obtenue par un panel humain entraîné sur les surfaces textiles réelles et virtuelles, c'est-à-dire les étoffes simulées avec STIMTAC. La perception est évaluée au travers de trois descripteurs : lisse/rugueux (Rp), désagréable/agréable (Pp) et glissant (Sp). L'objectif est de comparer la "main" (Figure 1 (c)) obtenue avec les étoffes réelles et virtuelles.

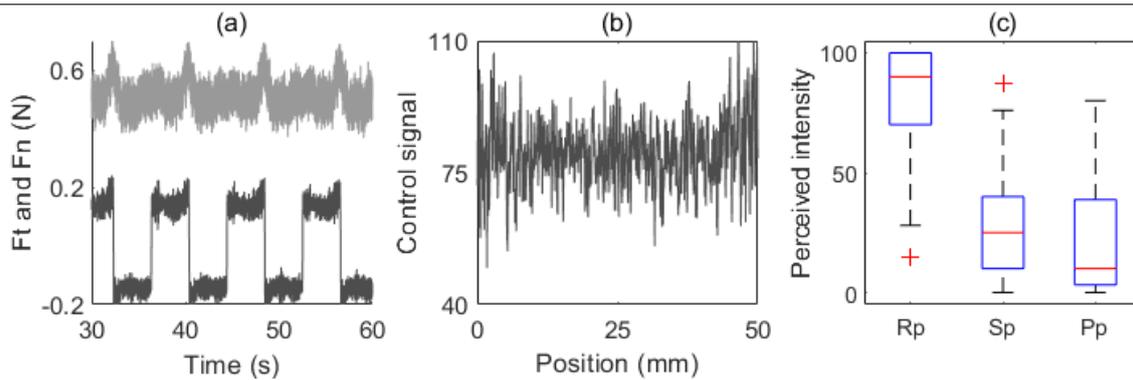


Figure 1 : Illustration des étapes de conception du signal de commande du stimulateur : a) signaux de forces normale F_n et tangentielle F_t , b) signal de commande généré et c) intensité perçue pour les trois descripteurs rugueux R_p , glissant S_p et plaisant P_p .

CONCLUSION

Un protocole systématique de génération de signaux de commande d'un stimulateur tactile par modulation de frottement a été mis en place, en vue de simuler le toucher de surfaces textiles très différentes. Les surfaces textiles virtuelles obtenues ont été évaluées par un panel humain entraîné et comparées aux surfaces textiles réelles correspondantes. Les résultats obtenus permettent de dégager des pistes d'amélioration de la simulation.

Références

- [1] Biet, M., Giraud, F. et Lemaire-Semail, B., "Interface tactile vibrante", EP1956466 (A1)/W0 2008 116980 A8 Patent 2008.
- [2] Bueno, M.-A., *et al.*, "Simulation du toucher d'un velours par un effecteur tactile", *Journées Internationales Francophones de Tribologie*, vol., 71-79, 2012.
- [3] Bueno, M.-A., Lemaire-Semail, B., Amberg, M. et Giraud, F., "A simulation from a tactile device to render the touch of textile fabrics: a preliminary study on velvet", *Textile Research Journal*, vol 84, 1428-1440, 2014.
- [4] Ben Messaoud, W., Bueno, M.-A. et Lemaire-Semail, B., "Textile Fabrics' Texture: From Multi-level Feature Extraction to Tactile Simulation", *Haptics: Perception, Devices, Control, and Applications: 10th International Conference, EuroHaptics*, vol. Proceedings, Part II, 294-303, 2016.
- [5] Camillieri, B. et Bueno, M.-A., "Artificial finger design for investigating the tactile friction of textile surfaces", *Tribology International*, vol 109, 274-284, 2017.

COMPORTEMENT TRIBOLOGIQUE A HAUTE TEMPERATURE DE L'INCONEL718 OBTENU EN FABRICATION ADDITIVE*

T. Zurcher^{1,2}, E. Charkaluk¹, V. Fridrici²

1. Laboratoire de Mécanique des Solides - Ecole Polytechnique, Institut Polytechnique de Paris, CNRS, 91128 Palaiseau, France

2. Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes, UMR CNRS 5513 ECL-ENTPE, Ecole Centrale de Lyon, Université de Lyon, 69134 Ecully cedex, France

MOTS CLES

Fabrication additive, Laser Metal Deposition, Usure, IN718, Température, Réparation

INTRODUCTION

Ce travail de recherche concerne l'étude du comportement tribologique de l'INCONEL718 fabriqué à l'aide du procédé de fabrication additive (FA) appelé Laser Metal Deposition (LMD) qui réalise l'ajout de matière couche par couche par la fusion de poudres métalliques projetées au point focal d'un laser. Ce procédé, qui fait partie de la famille des procédés de FA à dépôt d'énergie direct, offre la possibilité de réparer des pièces métalliques endommagées ou usées, ce qui permet alors d'augmenter leur durée de vie. Les travaux présentés aux JIFT 2022 à Metz ont permis d'étudier l'effet de la stratégie de lasage et de la direction de frottement sur le comportement tribologique à température ambiante. Par ailleurs, ces travaux ont montré que les pièces obtenues en FA présentaient un comportement tribologique assez proche de celui de pièces forgées, malgré une microstructure très différente. L'objectif des présents travaux est d'évaluer l'effet de la température sur le comportement tribologique de ce contact.

MATERIAUX ET METHODES

Les essais tribologiques sont réalisés dans une configuration plan / plan, avec la face plane circulaire d'un pion en 100Cr6 en contact avec une réparation plane en IN718 déposée par LMD sur une plaque en acier XC48. Un tribomètre linéaire alterné développé au LTDS est utilisé pour mettre en mouvement la plaque réparée en FA. Les effets des paramètres suivants sont étudiés : température (de 20°C à 600°C), force normale (20 N et 50 N), nombre de cycles (de 5 000 à 50 000 cycles). Les résultats sont comparés à ceux obtenus avec un échantillon en IN718 forgé.

RESULTATS ET DISCUSSION

L'augmentation de la température induit une diminution du coefficient de frottement (de près de 0.7 à 20°C, à moins de 0.5 à 600°C, en valeurs moyennes sur tout l'essai), avec une influence négligeable de la force de contact. De plus, à 600°C, après une phase initiale instable (du même type que ce qui est observé durant tout le test à 20°C et 400°C), le coefficient de frottement atteint un régime stable, à une valeur proche de 0.4. Une analyse des traces d'usure permet de relier ce caractère stable du coefficient de frottement à l'existence d'une couche homogène de débris d'usure oxydés à base d'IN718 à la surface du pion en acier, modifiant ainsi fortement l'interface de frottement. Ce régime stable n'est atteint que quand plus de 70% de la surface du pion est recouverte de débris oxydés adhérents à l'acier. Ce phénomène permet également de limiter l'usure du plan en IN718. Lorsque le nombre de cycles augmente, la présence de cette couche d'oxydes permet également de

* Recherche soutenue financièrement par le Ministère des armées –Agence de l'innovation de défense (AID) ainsi que la Société Nationale des Chemins de fer Français (SNCF).

protéger le pion en acier à 600°C, alors que celui-ci s'use fortement (par usure abrasive) à 400°C, à cause de la présence de débris oxydés abrasifs dans le contact.

La comparaison des résultats avec les essais réalisés sur de l'IN718 forgé en température montre les limites de l'utilisation de l'IN718 obtenu par FA sans traitement thermique postérieure. En effet, alors que le LMD s'use seulement 16% de plus que le forgé à température ambiante, l'usure du LMD à 600°C est près de deux fois plus élevée que celle du forgé. L'utilisation de l'IN718 en LMD en température nécessite donc de travailler sur des traitements thermiques post-fabrication.

CONCLUSION

Le but de ces travaux de recherche est d'étudier l'effet de la température sur le comportement tribologique de l'IN718 obtenu par LMD. Les essais et analyses réalisés ont permis de comprendre le comportement du contact IN718 / 100Cr6 en fonction de la température, à partir de l'étude de l'interface de frottement, en fonction de la présence ou non d'une couche de débris oxydés. La comparaison de ces résultats avec ceux obtenus sur l'IN718 forgé conclut à la nécessité de travailler sur les traitements thermiques post-fabrication additive.

LA THERMOMÉTRIE *IN SITU* DANS UN CONTACT SEC EST-ELLE POSSIBLE ?

Y. Zhou^{1,2}, Z. Zhou^{2,3}, par ordre alphabétique : S. Albahrani², L. Bois¹, S. Descartes², E. Homeyer³, C. Journet¹, G. Ledoux³, N. Ollier⁴, D. Philippon², A. Saulot², A. Tanguy²

1. Univ Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, CNRS, LMI, 69621 Villeurbanne

2. Univ Lyon, INSA Lyon, CNRS, LaMCoS, UMR5259, 69621 Villeurbanne

3. Univ Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, CNRS, Institut Lumière Matière, 69621 Villeurbanne

4. Laboratoire des Solides Irradiés, UMR 7642 CEA-CNRS-Ecole Polytechnique, Palaiseau, France

MOTS CLES

In situ, tribométrie, frottement sec, photoluminescence, thermoluminescence

INTRODUCTION

Un contact tribologique entre 2 corps est un système confiné. Il est donc peu accessible par des mesures directes locales, son comportement en fonctionnement est rendu difficilement étudiable *in situ*. Des mesures expérimentales locales thermo-mécaniques constituent un chaînon manquant dans la démarche de compréhension et de modélisation des processus thermomécaniques mis en jeu dans les contacts afin d'augmenter leurs performances énergétiques. Des travaux antérieurs réalisés au LaMCoS ont montré qu'il était possible de mesurer température et pression dans l'épaisseur sondable d'un fluide confiné dans un contact, grâce aux variations induites, respectivement de l'énergie d'émission et de la largeur à mi-hauteur du spectre de luminescence de nanoparticules [1, 2]. A contrario, ces grandeurs physiques instantanées n'ont pour l'instant jamais été mesurées en peau du matériau (solide) des corps en contact lors d'un essai tribologique. Jusqu'à présent les mesures de température sont réalisées par infrarouge ou grâce à des thermocouples, donc avec peu de précision au regard des échelles spatiales et temporelles des phénomènes tribologiques [3]. De même les pressions locales de contact en cours d'essai ne sont pour l'instant pas accessibles.

Parmi les techniques *in situ* ayant montré un potentiel intéressant pour la tribologie, on trouve les techniques spectroscopiques (Raman, fluorescence) permettant d'interagir avec l'interface ; ce qui nécessite donc des premiers corps en contact transparents aux longueurs d'ondes du rayonnement utilisées. Dans les travaux présentés ici il est proposé d'utiliser la photoluminescence afin de mesurer la température en peau des matériaux solides sous frottement. La mise en œuvre de ces mesures nécessite d'instrumenter la peau des matériaux en contact et ainsi transformer la surface en véritable capteur.

METHODOLOGIE ET MESURES LOCALES DE TEMPERATURE *IN SITU*

Le principe général est d'élaborer des surfaces « capteur » permettant de sonder le contact. A cette fin, des sondes thermo-luminescentes sont encapsulées dans une matrice solide. Deux types de sondes, permettant des analyses différentes de la réponse émissive des sondes, sont utilisées : des nanoparticules à base de terres rares afin d'obtenir des cartographies en température, ou des diamants (d50~20 µm) pour des mesures d'échauffement sous frottement.

Le premier type de sondes thermo-luminescentes sont des nanoparticules (NPs) d'orthovanadate de gadolinium (GdVO₄) dopés terre-rare, 10% Yb et 2% Er [4]. Une fois élaborées, un procédé de chimie douce (à température ambiante) permet de disperser et d'encapsuler les NPs dans des matrices de silice. Ce procédé permet d'optimiser la nature chimique du matériau composite pour atteindre des propriétés efficaces de thermo-luminescence sous conditions tribologiques. Après excitation monochromatique des NPs, le ratio d'intensité lumineuse (LIR), dépendant de la température, est mesuré [4] (figure 1a). Les calibrations en température [$< 300^{\circ}\text{C}$] sont réalisées dans

un premier temps pour les sondes seules puis pour les matériaux composites (matrices contenant les sondes) (Figure 1a). L'indépendance de la réponse par rapport à la pression [quelques MPa à 1 GPa] est vérifiée. Ces mesures *in situ* permettront d'établir des cartographies des températures des surfaces des solides en contact.

Le deuxième type de sondes sont des particules de diamants de taille micrométrique ($d_{50} \sim 20 \mu\text{m}$). Certains diamants possèdent des défauts de type S3 (V-N-Ni-N-V). Sous excitation d'un laser pulsé de quelques microsecondes et monochromatique ($\lambda = 444 \text{ nm}$), ces défauts émettent une luminescence verte. Le temps de relaxation de luminescence (temps de vie) diminue lorsque la température augmente [5]. Les diamants sont encapsulés dans une matrice borosilicate [6] en utilisant des procédés de vitrification. Des essais mesurant la décroissance de la luminescence ont été réalisés dans des conditions statiques (figure 1b) et dynamiques. Ces mesures doivent permettre d'identifier *in situ* le cycle d'échauffement dans un contact sec frottant avec des résolutions inégales ($< \mu\text{s}$, $10 \mu\text{m}$).

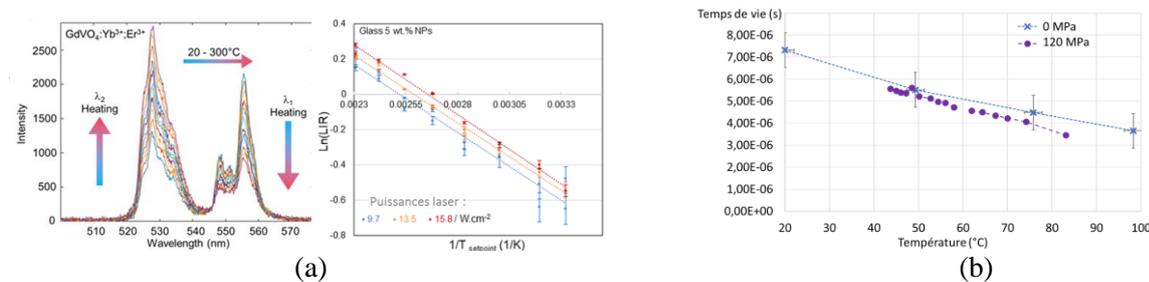


Figure 1 : Mesures de température selon deux méthodes, (a) mesures du ratio d'intensité lumineuse (LIR) de NPs à base de terres rares encapsulées [4], (b) mesures du temps de vie sur des diamants micrométriques encapsulés, pour deux pressions de contact différentes

CONCLUSION

L'élaboration de surfaces « capteur » couplée à des méthodes optiques ouvrent des possibilités de mesures inaccessibles jusqu'à présent. Ces différentes mesures devraient permettre de répondre à de nombreuses questions d'intérêt fondamental telle que l'existence ou non d'échauffements ultra-rapides sous le contact, pour le moment jamais mesurés, ou de dépasser les limites actuelles dans la connaissance des répartitions de température, à une échelle spatiale micrométrique.

Références

- [1] S.M. B. Albahrani & al (2018), RSC Adv., 8, 22897
- [2] T. Seoudi & al (2020), Tribology Letters 68, 73
- [3] F.E. Kennedy (1984) « *Thermal and thermomechanical effects in dry sliding* », Wear 100
- [4] YJ Zhou & al., « *Laser-Induced Heating in GdVO₄: Yb³⁺/Er³⁺ Nanocrystals for Thermometry* », ACS Applied Nano Materials, November 2022
- [5] E. Homeyer & al., « *Diamond Contact-Less Micrometric Temperature Sensors* », Applied Physics Letters, vol. 106, no. 24, 2015
- [6] Masters' internship reports in LaMCoS and in iLM: Diallo, T. S., « *Temperature Rise Measurement when Rubbing a Metallic Glass* », 2015 -- Ben Mohamed, J., « *In situ Instrumentation of Skin of Materials Subjected to Tribological Stresses* », 2016 -- Bonev, P., « *Modeling of Heating under Friction of Metallic Glasses* », 2020

Remerciements pour leur soutien financier

Le LABEX MANUTECH-SISE (ANR-10-LABX-0075) de l'Université de Lyon, dans le cadre du programme « Investissements d'Avenir » (ANR-11-IDEX-0007), pour la thèse de Yujiao Zhou. La Région Auvergne-Rhône-Alpes pour la thèse de Zhijian Zhou (projet NERFS).

Liste des auteurs

- Abo El-Einein Hussein, 2, 3
Abu-Ammar Aiman, 62, 63
Al Kaderi Raafa, 4
Albahrani Sayed, 90, 91
Alexis Joel, 78, 79
Alleman Laurent, 4
Arnaud Pierre, 47–49
Arnold Gilles, 81, 82
Aubert Rémi, 5, 6
- Badler David, 62, 63
Barlemont Solène, 21, 22
Barri Nima, 37–39
Baydoun Soha, 23, 24, 50–52
Bekhoucha Djamel, 7–9, 25–30
Ben Attia Malak, 10, 11
Ben Khelil Nourchene, 12–14
Berenguer Paul, 72, 73
Berthel Bruno, 47–49
Bigerelle Maxence, 55–57, 72, 73
Blateyron François, 72, 73
Boher Christine, 78, 79
Bois Laurence, 90, 91
Boubechou Choubeila, 8, 9, 25–30
Bouchot Alizée, 31, 32
Bouchoucha Ali, 7–9, 25–30
Bouguerra Kaouthar, 15–17
Briatte Mathis, 33
Brown Christopher A., 72, 73
Brunel Jean-François, 55–57
Brunetiere Noël, 18–20
Brézard-Oudot Aurore, 44–46
Bueno Marie-Ange, 81, 82, 86, 87
- Camillieri Brigitte, 86, 87
Cardey Pierre-François, 15–17
Carpentier Luc, 64, 65
Catinon Mickaël, 74–76
Cayer-Barrioz Juliette, 69–71
Chaise Thibaut, 85
Charkaluk Eric, 88, 89
Chatelet Eric, 64, 65
Chemin Jean-Baptiste, 37–39
Chen Yan-Ming, 15–17, 34–36
Chevrier Boris, 83, 84
Choquet Patrick, 37–39
Colas Guillaume, 21, 22, 37–39
Cornuault Pierre-Henri, 21, 22, 64, 65
- Daudin Rémi, 21, 22
Davin Edouard, 4
- Debayle Johan, 31, 32
Delattre Sylvain, 40
Descartes Sylvie, 31, 32, 90, 91
Desplanques Yannick, 4
Doutriaux Timothée, 41–43
Ducommun Nadège, 15–17
Dufrénoy Philippe, 55–57
Duval Arnaud, 85
- Ferre Romain, 47–49
Ferreira Corentin, 44–46
Ferrieux Amandine, 31, 32
Filleter Tobin, 37–39
Fouvry Siegfried, 23, 24, 41–43, 47–52
Fridrici Vincent, 88, 89
- Gauthier Christian, 53, 54
Gendre Philippe, 50–52
Goeury Laura, 50–52
Goltsberg Roman, 62, 63
Grappe Frederic, 5, 6
Graton Olivier, 50–52
Griga Asma, 4
Guibert Robin, 55–57, 72, 73
Guillonneau Gaylord, 23, 24
Guorui Wang, 37–39
- Hoff Marie, 58–61
Homeyer Estelle, 90, 91
Houzé Frédéric, 44–46
- Isard Manon, 41–46
- Jamar Marina, 4
Journet-Gautier Catherine, 90, 91
- Kaci Anis, 86, 87
Kasem Haytam, 62, 63
- Labaïz Mohamed, 66–68
Laffont Paul, 21, 22
Lallemand Fabrice, 5, 6
Larousse Sébastien, 41–43
Leclinche Floriane, 86, 87
Ledoux Gilles, 90, 91
Lemaire-Semail Betty, 86, 87

Lenain Alexis, 21, 22
 Louyot Etienne, 64, 65

 Massardier Valentin, 74–76
 Massi Francesco, 64, 65
 Mazuyer Denis, 69–71
 Mege-Revil Alexandre, 4
 Michel Yann, 37–39
 Mischler Stefano, 77
 Mollon Guilhem, 31, 32
 Moreau Clement, 72, 73
 Mériaux Jean, 47–49

 Nelias Daniel, 85
 Nicholson Eric, 37–39
 Noel Sophie, 44–46

 Ollier Nadège, 90, 91

 Parent Pierre-Nicolas, 78, 79
 Paris Jean-Yves, 78, 79
 Perdrix Esperanza, 4
 Pereira J.c., 23, 24
 Petit Christophe, 85
 Philippon David, 90, 91
 Philippon Sylvain, 83, 84

 Reynaud Philippe, 85
 Rezala Aicha, 80
 Richard Caroline, 15–17
 Robert Marie-Jeanne, 4
 Rocchi J., 23, 24
 Roizard Xavier, 5, 6
 Romaine Alexandre, 15–17
 Ruiz P.l., 23, 24

 Santos F., 23, 24
 Saulot Aurélien, 37–39, 90, 91
 Singh Chandra Veer, 37–39

 Tam Jason, 37–39
 Tanguy Anne, 90, 91
 Teste Philippe, 44–46
 Thevenot Maël, 55–57
 Tomas Alexandre, 4
 Turlonias Michel, 81, 82
 Trunfio Sfarghiu Ana-Maria, 74–76

 Vega J., 23, 24
 Vincent Julien, 83, 84
 Vincent Michel, 74–76

 Wallace Efoé R., 85
 Weiland Benjamin, 86, 87

 Zaidi Hamid, 7–9, 25–30
 Zhou Yujiao, 90, 91
 Zhou Zhijian, 90, 91
 Zurcher Théo, 88, 89

