



JIFT 2022

33^{èmes} Journées Internationales Francophones de Tribologie

1-3 juin 2022, Metz

PROGRAMME des PRÉSENTATIONS

RECUEIL des RÉSUMÉS





UNIVERSITÉ
DE LORRAINE



Programme des 33èmes Journées Internationales Francophones de Tribologie – 1^{er} au 3 juin 2022, ENIM

Mercredi 1 ^{er} juin 2022	
10h00-12h00	Accueil des participants Hall de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs Metz (ENIM)
12h00-13h30	Déjeuner de bienvenue 
13h30-14h00	Discours d'ouverture des 33 ^{èmes} Journées Internationales Francophones de Tribologie Philippe Kapsa, Pierre Chevrier et Sylvain Philippon
14h00-14h40	Pascal Lamesle , Directeur scientifique et Technique, IRT-M2P <i>Présentation de l'IRT M2P et de ses activités liées à la tribologie</i>
Session 1 : Usure & endommagements – Christian GAUTHIER, ICS	
14h40-15h00	Comportement tribologique de différentes nuances de fonte résistantes à l'usure et aux chocs <u>T. Malhomme</u> ¹ J-C. Abry ¹ G. Bouvard ¹ S. Collier ² J. Papillon ³ H. Villanova ⁴ G. Regheere ⁵ V. Fridrici ¹ 1. Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes, UMR CNRS 5513 ECL-ENISE-ENTPE, Université de Lyon, Ecole Centrale de Lyon, Bat. TMM23, 36 Avenue Guy de Collongue, 69134 Ecully Cedex, France 2. Fonderie GIROUD, BP39, 38530 Barraux, France 3. MATERiaux Ingénierie et Science (UMR CNRS 5510 / INSA Lyon), INSA Lyon, 345 Avenue Gaston Berger, 69100 Villeurbanne, France 4. Traitement Thermique de Terrenoire, 3 rue de Lyon, 42011 Saint Etienne, France 5. Centre Technique des Industries de la Fonderie, 8 rue Voie Lactée, 69370 Saint Didier au Mont d'Or, France
15h00-15h20	Mécanismes d'usure du contact électrique glissant laiton/acier L. Deville ¹ M. Kheirolah Hosseinabadi ² D. Bekhouche ³ A. Bouchoucha ³ <u>H. Zaidi</u> ² 1. Louisiana Solar Energy Lab. University of Louisiana- Lafayette, USA 2. Institut Pprime UPR3346-IUT, Université de Poitiers, Futuroscope,, F-86960, Poitiers, France 3. Laboratoire de Mécanique, Faculté des Sciences de la technologie, UFMCI, Algérie
15h20-15h40	Etude de la tenue à l'usure de pièces réparées avec de l'Inconel 718 par Laser Metal Deposition <u>T. Zurcher</u> ^{1,2} E. Charkaluk ¹ V. Fridrici ² B. Berthel ² B. Dodin ³ 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 3. Direction Innovation et Recherche - SNCF, 93210 Saint-Denis, France
15h40-16h20	Pause-café / Echanges 

16h20-16h40	<p>Influence de la dilution de fer sur les mécanismes de déformation plastique d'alliages base cobalt sous sollicitations tribologiques</p> <p>T. Younsi¹ A. Soveja³ M. Chaussumier³ <u>C. Boher</u>²</p> <p>1,2. Institut Clément-Ader (ICA); Université de Toulouse; CNRS, IMT Mines Albi, INSA, ISAE-SUPAERO, UPS; Campus Jarlard, 81013 Albi, France 3. Institut Clément Ader (ICA); UMR CNRS 5312, Université de Toulouse, IMT Mines Albi, INSA, ISAE, UPS; 3 Rue Caroline Aigle, 31000 Toulouse, France</p>
16h40-17h00	<p>Modélisation des phénomènes de fretting usure : Approche multiphysique couplant énergie de frottement, troisième corps et oxygénation de contact</p> <p><u>P. Arnaud</u>¹ S. Baydoun² S. Fouvry²</p> <p>1. MINES ParisTech, Centre des Matériaux, Évry, France 2. Laboratory of Tribology and Systems Dynamics, Ecole Centrale de Lyon, France</p>
17h00-18h00	<p>Visite des plateformes techniques de l'IRT-M2P et du plateau technique de l'équipe « Thermomécanique du contact rapide » du LEM3</p>
18h00-19h00	<p>Cocktail de bienvenue à l'ENIM</p> 

Jeudi 2 juin 2022	
Session 2 : Interactions – Christine BOHER, ICA	
9h00-9h20	<p>Influence de la rugosité et des paramètres de coupe sur le comportement tribologique</p> <p>H. Bouhabila^{1,2} A. Bouchoucha¹ R. Benzerga³ C. Le Paven³</p> <p>1. Laboratoire de mécanique, Département de Génie Mécanique, Faculté des Sciences de la Technologie, Université des Frères Mentouri, Constantine 1, Algérie 2. Département de Génie Mécanique, Faculté des Sciences et sciences appliqués, Université l'Arbi Ben M'Hidi Oum El-Bouaghi, Algérie 3. Département Science et Génie des Matériaux, IUT de Saint Brieuc, Université de Rennes 1, 22004 Saint Brieuc CEDEX, France</p>
9h20-9h40	<p>Modélisation numérique du contact roue-essieu ferroviaire pendant l'opération de calage à froid</p> <p><u>B. Hendrycks</u>^{1,2} V. Magnier² C. Hubert³ P. Dufrénoy² S. Salengro¹</p> <p>1. MG-Valdunes, F-59125 Trith-Saint-Leger 2. Université Lille, CNRS, Centrale Lille, UMR 9013 - LaMcube - F-59000, Lille, France 3. Université Polytechnique des Hauts de France, CNRS, UMR 8201 – LAMIH – F-59300 Valenciennes, France</p>
9h40-10h00	<p>Étude tribologique des interactions outil matière lors d'une opération de FSW</p> <p>D. Ambrosio V. Wagner <u>G. Dessen</u></p> <p>Laboratoire Génie de Production, Université de Toulouse, ENT, 65016 Tarbes, France</p>
10h00-10h40	<p>Pause-café / Echanges</p> 
Session 3 : Mesure in-situ – Vincent FRIDRICI, LTDS	

10h40-11h00	<p>Coulomb et la triboélectricité</p> <p><u>J. Frêne</u>¹ L. Deville² H. Zaidi¹ M. Arghir¹ O. Bonneau¹</p> <p>1. Institut Pprime UPR3346-IUT, Université de Poitiers, Futuroscope, F-86960, Poitiers, France 2. Louisiana Solar Energy Lab, University of Louisiana-Lafayette, USA.</p>
11h00-11h20	<p>Elaboration de nano-sondes thermométriques photoluminescentes : vers une application pour les contacts tribologiques</p> <p><u>Y. Zhou</u>^{1,2} G. Ledoux³ L. Bois¹ C. Journet-Gautier¹ S. Descartes² D. Philippon²</p> <p>1. Laboratoire des Multimatériaux et Interfaces, UMR CNRS 5615, Université Lyon1-CNRS, 69622 Villeurbanne, France 2. Université de Lyon, INSA Lyon, CNRS, LaMCoS - UMR5259, 69621 Villeurbanne, France 3. Institut Lumière Matière, UMR CNRS 5306, Université Lyon1-CNRS, 69622 Villeurbanne Cedex, France</p>
11h20-11h40	<p>Corrélation entre signaux d'émission acoustique et mécanismes tribologiques par visualisation synchrone d'une interface acier/verre</p> <p>K. Jlaïel M. Yahiaoui <u>J.-Y. Paris</u> J. Denape</p> <p>Laboratoire Génie de Production, LGP, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, France</p>
11h40-12h00	<p>Sondes thermo-luminescentes type diamant : un outil pour l'instrumentation de l'extrême surface des solides dans un contact</p> <p><u>Z. Zhou</u>^{1,2} A. Saulot¹ E. Homeyer² A. Tanguy¹ S. Descartes¹</p> <p>1. Université de Lyon, INSA Lyon, CNRS, LaMCoS - UMR5259, 69621 Villeurbanne, France 2. Institut Lumière Matière, UMR CNRS 5306, Université Lyon1-CNRS, 69622 Villeurbanne Cedex, France</p>
12h00-13h20	<p>Déjeuner</p> 
13h20-14h00	<p>Guillaume Chassaing, Adjoint métier, Division Matériaux et Procédés, Safran Aircraft Engines <i>Tribologie et Aéronautique de demain</i></p>
<p>Session 4 : Rayage / indentation – Yan-Ming CHEN, CETIM</p>	
14h00-14h20	<p>Comportement à la rayure d'une surface de polycarbonate orientée : influence de l'anisotropie des propriétés mécaniques</p> <p>M. Pecora¹ A. Egele¹ M. Solar² D. Favier¹ <u>C. Gauthier</u>¹</p> <p>1. Université de Strasbourg, CNRS, Institut Charles Sadron, Strasbourg, France 2. Université de Strasbourg, INSA de Strasbourg, CNRS, Institut Charles Sadron, Strasbourg, France</p>
14h20-14h40	<p>Effet de la température et de la teneur en talc sur le comportement au micro rayage du composite polypropylène-talc</p> <p><u>M. Teldjoun</u>¹ M. Mendas¹ S. Mezlimi² B. Bouiadjera³</p> <p>1. LRM, Faculté of Technologie, Université de Chlef, Algérie 2. LGM, Ecole Nationale d'Industrie de Monastir (ENIM), Tunisie 3. LMPM, Département de Génie Mécanique, Université de Sidi Bel Abbès, Algérie</p>
14h40-15h00	<p>Etude de l'anisotropie cristalline par indentation et rayure sur un monocristal de cuivre</p> <p>L. Pinheiro de Brito I. Lahouij K. Inal <u>P. Montmitonnet</u></p> <p>Mines Paris, PSL*, CEMEF, CNRS UMR 7635, France</p>

9h40-10h00	<p>Contact rotor/stator : le revêtement abrasable, une solution efficace et complexe</p> <p><u>L. Gicquel</u>^{1,2} J-F. Brunel² J. Vincent³ P. Dufrénoy² L. Faure³ S. Philippon³ J. Philippe¹</p> <p>1. Safran Aircraft Engines - F-77550 Moissy-Cramayel, France 2. Université de Lille, CNRS, Centrale Lille, UMR 9013 - LaMcube - F-59000, Lille, France 3. Université de Lorraine, CNRS, Arts & Métiers, UMR 7239 – LEM3 – F-57070, Metz, France</p>
10h00-10h20	<p>Développement de revêtement PVD pour transmissions de puissances</p> <p>T. Maerten¹ <u>M. Millot</u>² A. Bonnini³ F. Deloye⁴</p> <p>1. Oerlikon Balzers France, 16, avenue James de Rothschild, 77164 Ferrières en Brie, France 2. SAFRAN Tech, Rue des Jeunes Bois, 78117 Chateaufort, France 3. Airbus Helicopters SAS, Aéroport International Marseille-Provence, 13725 Marignane Cedex, France 4. IRT-M2P, rue Augustin Fresnel, 57070 Metz, France</p>
10h20-10h50	<p>Pause-café / Echanges</p> 
<p>Session 7 : 3^{ème} corps, lubrification – Noël Brunetière, Pprime</p>	
10h50-11h10	<p>Etude des propriétés tribologiques des particules issues de la pyrolyse d'algues sargasses</p> <p><u>A. Molza</u>¹ P. Bilas^{1,2} T. Cesaire¹ P. Thomas¹ Y. Bercion²</p> <p>1. Groupe de Technologie des Surfaces et Interfaces, Université des Antilles : EA2432, France 2. Centre Commun de Caractérisation des Matériaux des Antilles et de la Guyane – Université des Antilles : FED4132, France</p>
11h10-11h30	<p>Formation de tribofilms en tribométrie oscillante</p> <p><u>J. Perret-Liaudet</u>¹ A. Hriouech¹ M.-I. de Barros¹ M. Belin² P. Charles²</p> <p>1. Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes, UMR CNRS 5513, École centrale de Lyon, 36 avenue G. de Collongue, 69134 Écully cedex, France 2. PSA, Centre Technique de Vélizy, F-78140, Vélizy, France</p>
11h30-11h50	<p>Tribocorrosion de fer en présence de tryptamine en tant qu'inhibiteur de corrosion</p> <p>A. Bouchez <u>C. Bénier</u> Y. Bao S. Mischler</p> <p>Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne – Groupe de Tribologie et de Chimie d'Interface (TIC), Suisse</p>
11h50-12h10	<p>Lubrification électrochimique des aciers inoxydables de type 316L/316L dans une solution d'hydrogencarbonate de sodium</p> <p><u>K. Bouguerra</u>¹ C. Richard¹ Y-M. Chen² J. Delgado² P-F Cardey³ A. Romaine³ N. Ducommun³</p> <p>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</p>
12h10-12h30	<p>Discours de clôture</p>
A partir de 12h30	<p>Repas à emporter</p> 



JIFT 2022

33^{èmes} Journées Internationales Francophones de Tribologie

1-3 juin 2022, Metz



SESSION 1

USURE ET ENDOMMAGEMENTS

INFLUENCE DE LA DILUTION DE FER SUR LES MECANISMES DE DEFORMATION PLASTIQUE D'ALLIAGES BASE COBALT SOUS SOLLICITATIONS TRIBOLOGIQUES

Tarek YOUNSI¹, Adriana SOVEJA³, Michel CHAUSSUMIER³, Christine BOHER²

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

3. Institut Clément Ader (ICA); UMR CNRS 5312, Université de Toulouse, IMT Mines Albi, INSA, ISAE, UPS; 3 Rue Caroline Aigle, 31000 Toulouse, France

MOTS CLES

Frottement, usure, alliage base cobalt, dilution fer, transformation de phase, défaut d'énergie d'empilement

INTRODUCTION

Il est connu dans la littérature que la composition chimique et la microstructure de pièces métalliques sont des paramètres qui affectent les mécanismes d'accommodation de la déformation plastique sous sollicitations de frottement [1 - 4].

L'objet de cette étude expérimentale est de déterminer l'influence de la teneur en fer, dans des alliages base cobalt, sur les mécanismes d'accommodation de la déformation plastique des transformées tribologiques de surface. La teneur en éléments d'addition impacte l'énergie de faute d'empilement, la déformation plastique et donc le comportement tribologique. En particulier, selon la teneur des éléments d'addition et les niveaux de sollicitations mécaniques, la déformation plastique d'alliages base cobalt obtenus dans des conditions hors équilibre peut se produire par différents mécanismes comme le glissement parfait et/ou le glissement partiel de dislocations et la transformation de phase.

PROCEDURE :

L'étude de la déformation plastique sur le comportement tribologique est étudiée en engageant volontairement des teneurs en fer différentes dans des revêtements base cobalt pour :

- activer le mécanisme de déformation plastique par transformation de phase,
- déterminer le taux d'écrouissage seuil pour lequel la transformation de phase est possible.

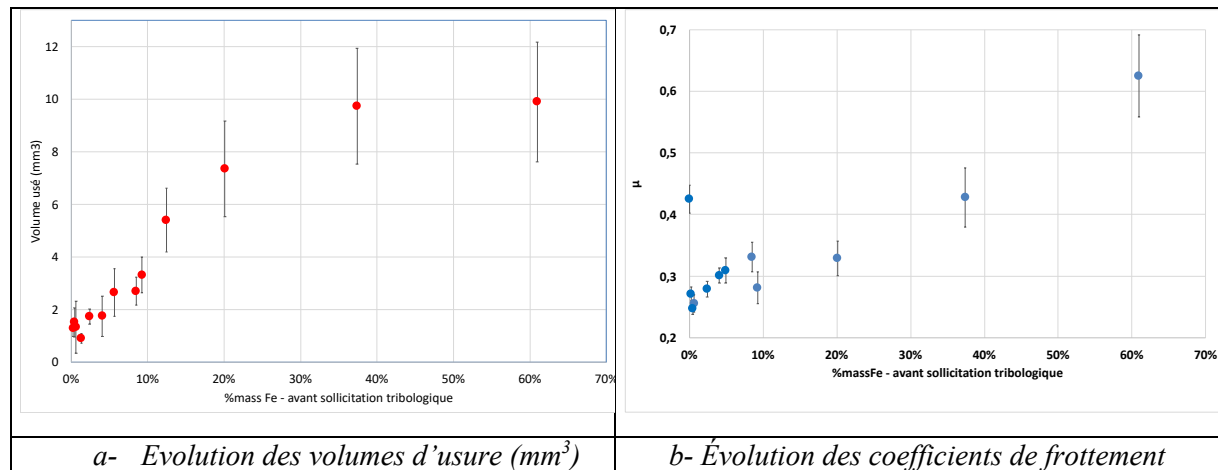
Pour des contraintes de fabrication, les revêtements base cobalt sont réalisés sur un substrat en acier non allié en utilisant le procédé de fabrication additive appelé procédé en lit de poudre ou Selective Laser Melting (SLM). Les interactions "poudres/faisceau laser" par technologie en lit de poudres peuvent être considérées comme exploratoires par rapport aux procédés par projection de poudre et ainsi conduire à des revêtements présentant des particularités microstructurales.

La teneur en fer diluée dans le revêtement base cobalt est établie en fonction du nombre de couches de poudre lasée qui varie de 4 à 20 et non en faisant varier les paramètres du procédé SLM. Les essais tribologiques sont réalisés pour un contact bille sur disque (la bille est en alumine et le disque représente le revêtement) et tous les revêtements sont testés avec les mêmes paramètres tribologiques. Les teneurs en fer diluée dans les surfaces des revêtements sont estimées par EDS. Les techniques d'analyses comme la DRX et l'EBSM sont employées pour identifier les modifications microstructurales observées dans les TTS du fait de sollicitations tribologiques.

RESULTATS :

Selon la teneur de fer dilué, l'analyse DRX des surfaces montre que les microstructures sont composées d'une seule phase $\text{CFC}_{\text{métastable}}$ ou d'un système biphasé $\text{CFC}_{\text{métastable}}+\text{CC}$. La dureté élevée du revêtement (de l'ordre de 700HV) conduit à penser que la phase CC indiquée par les spectres DRX peut être attribuée à la martensite $\alpha'\text{CC}$. Ainsi, quand la teneur en fer est inférieure à 30%, le système se comporte comme une base cobalt, et la présence de fer diminue la dureté de la phase $\text{CFC}_{\text{métastable}}$ du cobalt. Quand la teneur en fer est supérieure à 40%, il y a présence de martensite $\alpha'\text{CC}$ et plus il y a de fer plus la dureté moyenne du revêtement est élevée.

On montre que les volumes d'usure mais également les coefficients de friction sont fortement influencés par la teneur en fer dans les revêtements (figures 1), à partir du moment où celle-ci induit des phases $\text{CFC}_{\text{métastable}}$ ou $\text{CFC}_{\text{métastable}} \& \alpha'\text{CC}$ en surface des revêtements. On montre également que l'évolution du coefficient de frottement rend compte de l'évolution des mécanismes de déformation plastique activés pour accommoder le contact. En particulier, en plus des phénomènes d'écrouissage, des transformations de phase sont possibles, à savoir $\text{CFC}_{\text{métastable}}$ donne HCP et $\text{CFC}_{\text{métastable}}$ donne $\alpha'\text{CC}$ sous sollicitations tribologiques. Ces deux types de transformations peuvent se produire, individuellement ou simultanément, selon la teneur en fer dans le revêtement et donc selon que le revêtement est considéré comme base fer ou base cobalt.



Figures 1 : Evolutions des volumes d'usure et des coefficients de frottement en fonction de la teneur de fer dilué dans le revêtement base cobalt

CONCLUSION

Cette étude à caractère purement exploratoire a montré que suivant la teneur massique en fer, les phases en présence en surface des revêtements base cobalt obtenus à partir de la fusion de poudre base cobalt sur un substrat en acier non allié ne sont pas les mêmes. L'hétérogénéité de la microstructure et l'hétérogénéité chimique dans les revêtements base cobalt sur substrat acier obtenus par SLM ont été prises en compte pour étudier le comportement de l'alliage sous sollicitations tribologiques avec un intérêt porté sur les transformations de phase induites par plasticité dans les TTS. L'analyse des résultats tribologiques montrent que les transformations de phase sont différentes selon la teneur en fer dans l'alliage du revêtement.

Références

- [1] A. Kusmoko, D. Dunne, H. Li, et D. Nolan, (2014) *Procedia Materials Science*, vol. 6, p. 26-36,
- [2] E. Cabrol, C. Boher, V. Vidal, F. Rézaï-Aria, et F. Touratier, (2015), *Wear*, vol. 330-331, p. 354-363,
- [3] E. Cabrol, C. Boher, V. Vidal, F. Rézaï-Aria, et F. Touratier, (2019) *Wear*, vol. 426-427, p. 996-1007,
- [4] Š. Houdková, Z. Pala, E. Smazalová, M. Vostřák, et Z. Česánek, (2017) *Surface and Coatings Technology*, vol. 318, p. 129-141,

MODELISATION DES PHENOMENES DE FRETTEING USURE : APPROCHE MULTIPHYSIQUE COUPLANT ENERGIE DE FROTTEMENT, TROISIEME CORPS ET OXYGENATION DE CONTACT

Pierre Arnaud^{1*}, Soha Baydoun², Siegfried Fouvry²

1. MINES ParisTech, Centre des Matériaux, Évry, France

2. Laboratory of Tribology and Systems Dynamics, Ecole Centrale de Lyon, France

*. pierre.arnaud@minesparis.psl.eu

MOTS CLES

Energie dissipé, modélisation du fretting usure, 3^{ème} corps, oxygénation de contact

INTRODUCTION

La modélisation de l'usure par frottement dans les assemblages de contact est devenue un aspect essentiel dans de nombreuses applications industrielles. L'objectif de ce travail de recherche est de développer une approche étendue de l'usure par friction-énergie prenant en compte la présence d'une couche de débris et l'usure par adhésion en simulant la pression partielle di-oxygène interfaciale à l'aide d'une approche Advection-Dispersion-Réaction. Cette modélisation multiphysique estime localement si l'interface frettée fonctionne dans des conditions d'usure adhésive ou abrasive. Pour chaque situation, un coefficient d'usure énergétique spécifique est considéré, ce qui permet finalement de simuler la trace de fretting composite adhésif-abrasif (en forme de W). Le modèle prédit la transition d'une réponse purement abrasive à une réponse abrasive-adhésive et, pour la première fois, des profils d'usure de fretting en forme de W et de U.

DEMARCHE EXPERIMENTALE

Ce travail de recherche a pour but de simuler l'effet de la fréquence sur la réponse à l'usure par fretting de l'interface Ti-6AL-4V dans des conditions de glissement. Pour cela des essais ont été obtenues de la littérature [1]. Le contact est un contact cylindre/plan TA6V de rayon 80 mm de force normale de 1066 N/mm et d'amplitude de glissement de 75 μm . Ces essais présentent une évolution du coefficient d'usure pour une fréquence qui varie de 0.1 Hz à 5 Hz (fig. 1) et également du profil d'usure allant d'une forme en U a une forme en W.

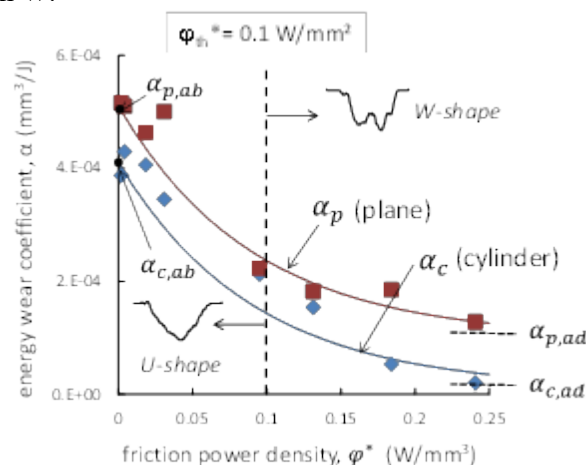


Figure 1 : Évolution du coefficient d'usure énergétique des éprouvettes en fonction de la densité de puissance de frottement.

MODELISATION MULTIPHYSIQUE

L'équation de continuité du processus d'advection-dispersion-réaction d'un constituant gazeux "i" est donnée par :

$$a \frac{dP_i}{dt} = -\nabla \cdot (J_i) + R_i = -\nabla \cdot (J_{a,i} + J_{d,i}) + R_i = -\nabla \cdot (-D_i \nabla P_i + v P_i) + R_i \quad (1)$$

Ensuite, une méthode Runge-kutta d'ordre 4 (RK4) est utilisée pour résoudre l'équation différentielle partielle de l'ADR [2]. La modélisation de l'usure de surface est directement dérivée d'un développement précédent entièrement détaillé dans [3] et les coefficients d'usure abrasif et adhésif sont extraits des essais expérimentaux. Cette modélisation est basée sur une résolution aux travers des éléments fini

La figure 2 présente une comparaison plus détaillée des profils d'usure du plan, du cylindre et total en fonction de la fréquence de glissement appliquée. L'approche couplée permet pour la première fois de prédire les profils de fretting en forme de U et de W en fonction de la fréquence de glissement appliquée.

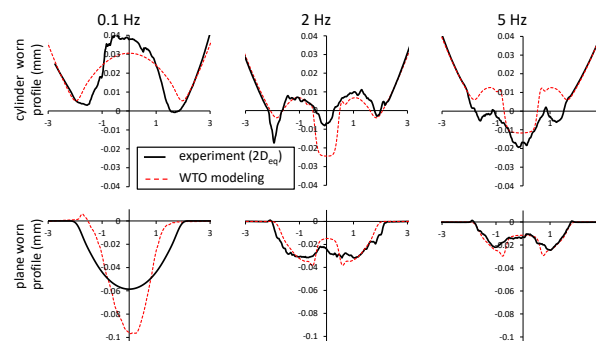


Figure 2 : Comparaison entre les profils usés simulés et expérimentaux

CONCLUSION

La morphologie en forme de U est bien prédite bien que les simulations aient tendance à surestimer l'extension latérale et à sous-estimer la profondeur d'usure maximale. En ce qui concerne les fréquences plus élevées $f=2$ et 5 Hz. Le profil de pression partielle di-oxygène montre une chute de la frontière vers le centre du contact, ainsi une partie de l'interface reste sous l'oxygénation et ne permet pas d'activer l'abrasion. L'usure adhésive est activée dans ce domaine alors que l'usure abrasive opère sur les zones latérales.

Références

- [1] S Fouvry, P Arnaud, A Mignot, P Neubauer (2017), Contact size, frequency and cyclic normal force effects on Ti-6Al-4V fretting wear processes: An approach combining friction power and contact oxygenation, Tribology International 113, pp. 460-47.
- [2] S Baydoun, P Arnaud, S Fouvry (2020), Modelling adhesive wear extension in fretting interfaces: An advection-dispersion-reaction contact oxygenation approach, Tribology International 151, 106490.
- [3] P Arnaud, S Fouvry, S Garcin (2018), 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, pp. 32-47.

COMPORTEMENT TRIBOLOGIQUE DE DIFFERENTES NUANCES DE FONTE RESISTANTES A L'USURE ET AUX CHOCS

T. Malhomme¹, J.-C. Abry¹, G. Bouvard¹, S. Collier², J. Papillon³, H. Villanova⁴, G. Regheere⁵, V. Fridrici¹

1. Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes, UMR CNRS 5513 ECL-ENISE-ENTPE, Université de Lyon, Ecole Centrale de Lyon, Bat. TMM23, 36 Avenue Guy de Collongue, 69134 Ecully Cedex, France

2. Fonderie GIROUD, BP39, 38530 Barraux, France

3. MATÉriaux Ingénierie et Science (UMR CNRS 5510 / INSA Lyon), INSA Lyon, 345 Avenue Gaston Berger, 69100 Villeurbanne

4. Traitement Thermique de Terrenoire, 3 rue de Lyon, 42011 Saint Etienne

5. Centre Technique des Industries de la Fonderie, 8 rue Voie Lactée, 69370 Saint Didier au Mont d'Or

MOTS CLES

Usure, Abrasion, Impact, Fonte

RESUME

L'objectif de cette étude est de caractériser et comprendre le comportement tribologique et la résistance à l'endommagement de différentes nuances de fonte, présentant des compositions chimiques, microstructures et propriétés mécaniques différentes, avec l'ambition de permettre la fabrication de pompes industrielles avec une durée de vie améliorée, vis-à-vis des sollicitations d'abrasion et d'impact. Dans ce projet, le LTDS a réalisé la caractérisation tribologique des matériaux.

Deux bancs d'essai ont été sélectionnés pour caractériser ces fontes à partir de l'analyse des modes de défaillances (abrasion, érosion, choc) des pompes. Un premier banc d'essai permet d'évaluer la résistance à l'abrasion et le coefficient de frottement des fontes testées et un second permet d'évaluer la résistance de celles-ci à des sollicitations de type d'impact/glissement. Des mesures de dureté et des observations au MEB ont été réalisées pour expliquer les résultats obtenus.

Les travaux menés ont permis de caractériser et de comparer les mécanismes d'usure de différents types de fontes en lien avec leurs propriétés mécaniques, leurs microstructures et les défauts présents.

MECANISMES D'USURE DU CONTACT ELECTRIQUE GLISSANT LAITON/ACIER

L. Deville¹, M. Kheirolah Hosseinabadi², D. Bekhouche³, A. Bouchoucha³, H. Zaidi²

1. Louisiana Solar Energy Lab. University of Louisiana- Lafayette (USA)

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

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

MOTS CLES :

Contact électrique, Usure, Abrasion, Déformation plastique, Film d'oxyde, Arc électrique, Adhésion.

RESUME :

Le but de ce travail est d'étudier le comportement tribologique et thermique du contact laiton/acier, en utilisant un tribomètre de type bi-pion-cylindre sous l'influence de la charge normale, de la vitesse relative de glissement, de l'intensité et de la polarité du courant électrique à travers le contact.

Le dispositif expérimental utilisé pour réaliser les essais tribologiques est un tribomètre de type bi-pion-cylindre dont les pions ne sont pas sur la même piste d'usure (Fig.1). Les expériences ont été réalisées à l'air ambiant. Pour le passage du courant électrique, une alimentation électrique assure la circulation d'un courant continu à l'interface pion-cylindre. Cette configuration bi-pion sur deux pistes différentes nous permet le passage du courant électrique à travers le contact, elle nous permet de relever les températures des pions anode et cathode et d'analyser les pistes d'usure du disque anode et cathode.

Afin de connaître l'ordre de grandeur de la température atteinte durant le fonctionnement du couple tribologique ; nous avons utilisé des thermocouples de type K (Fig.1). Les thermocouples proches de la surface de contact ont été placés à l'intérieur du pion, à 1 mm du contact. La température relevée n'est pas exactement celle de la surface de contact, mais elle donne une bonne indication.

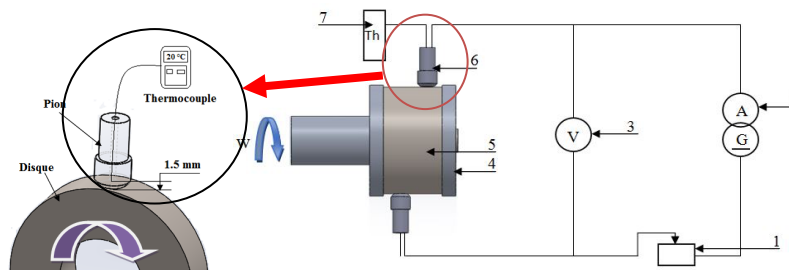


Figure 1 : Schéma du circuit électrique et de la chaîne de mesure, 1 rhéostat, 2 alimentation en courant continu, 3 voltmètre, 4 isolant porte-cylindre en téflon, 5 cylindre, 6 pion, 7 thermocouple.

La discussion des résultats obtenus est basée sur des observations et des analyses en utilisant le microscope électronique à balayage (MEB), le profilomètre à 3D et le microscope optique des surfaces usées et des phénomènes interfaciaux issus du frottement.

Dans un contact tribologique, sous l'effet de la charge normale, de la vitesse relative de glissement et du passage du courant électrique à l'interface des contacts glissants, une élévation importante de la température interfaciale peut se produire. En effet, en plus de la chaleur dissipée par frottement mécanique, s'ajoute la dissipation par effet Joule et dans certaines conditions celle des arcs électriques. D'autre part, il faut signaler aussi, que le processus d'oxydation intervient, le film d'oxyde évolue, son épaisseur croît selon la polarité du contact et suivant une fonction qui dépend des caractéristiques

thermiques et mécaniques des matériaux antagonistes. Quand il atteint son épaisseur critique, il est rompu sous l'action mécanique et /ou électrique. Les conditions de sa rupture et les phénomènes qui en résultent jouent un rôle majeur dans le comportement thermique des couples.

Les températures des pions sont mesurées en fonction de la vitesse de glissement et de la charge normale avec et sans passage du courant électrique. En effet, l'augmentation des paramètres P, V et I, engendrent une augmentation importante de la température interfaciale et atteint des valeurs maximales.

Les paramètres électromécaniques jouent un rôle important dans le comportement tribologique et thermique du contact. En effet, en présence du courant électrique, la température de contact augmente de façon significative. Ceci entraîne l'accroissement du degré d'oxydation, la croissance de la couche d'oxyde et le taux de recouvrement de la surface oxydée. Cette couche s'adhère bien aux irrégularités de la surface pour constituer une couche protectrice du substrat. L'évolution du taux d'usure W en fonction de la charge normale appliquée, de la vitesse de glissement et du passage du courant électrique seront reportés et les différents phénomènes d'usure seront discutés.

Les principaux mécanismes d'usure développés lors des différentes expériences effectuées sont l'adhésion, l'abrasion, l'oxydation et la déformation plastique. Avec des charges et des vitesses de glissement élevées la déformation plastique sévère est le mécanisme d'usure le plus dominant. En effet, le frottement et l'usure sont largement affectés par les films interfaciaux. En revanche, contrairement au frottement, l'usure est un processus sensible qui peut varier d'un facteur de deux ou plus, pour des faibles changements dans les conditions expérimentales.

Le passage du courant électrique, à travers le contact laiton-acier, réduit le taux d'usure. En effet, pour des vitesses et des charges élevées, le mécanisme de transfert de laiton sur le cylindre augmente. Ceci entraîne la formation du troisième corps qui affecte sensiblement le comportement tribologique du couple.

ETUDE DE LA TENUE À L'USURE DE PIÈCES RÉPARÉES AVEC DE L'INCONEL IN718 PAR LASER METAL DEPOSITION*

T. Zurcher^{1,2}, E. Charkaluk¹, V. Fridrici², B. Berthel² et B. Dodin³

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

3. Direction Innovation et Recherche - SNCF, 93210 Saint-Denis, France

MOTS CLES

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

INTRODUCTION

L'effervescence de la recherche sur les procédés de fabrication additive (FA) n'a jamais été aussi importante que ces dernières années. À l'heure où les enjeux environnementaux sont au cœur des préoccupations, ces procédés pourraient beaucoup apporter grâce à leur capacité à produire des pièces complexes tout en minimisant notamment la quantité de matière utilisée ainsi que l'étape de post-traitement d'usinage des pièces. Parmi tous les procédés utilisés pour les métaux, la famille des procédés de FA à dépôt d'énergie direct offre en plus la possibilité de réparer des pièces métalliques endommagées ou usées ce qui permet alors d'augmenter leur durée de vie. Au sein de cette famille, on trouve le procédé 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. La littérature semble s'accorder sur la bonne tenue mécanique de ces pièces réparées lorsqu'elles sont soumises à des essais de traction et de fatigue [1][2]. Cependant, encore très peu d'articles ont traité de la tenue à l'usure de pièces réparées par un tel procédé. Onuik et al.[3] ont réussi à mettre en évidence que la stratégie de réparation pouvait avoir un impact sur le taux d'usure sans, cependant, donner de concrètes explications à ce résultat. L'objectif de ces travaux est donc de mieux comprendre la réponse à l'usure de pièces réparées par LMD en fonction de leurs paramètres de fabrication et des conditions de sollicitation tribologique.

MATERIAUX ET METHODES

L'objectif de ce travail est de savoir si le choix de stratégie de réparation ainsi que la direction de frottement jouent un rôle critique sur la tenue à l'usure de pièces réparées dans le cas d'un contact plan/plan à sec. Nous nous intéressons pour cela au comportement à l'usure d'une réparation en IN718 déposée sur une plaque en acier XC48. Le choix de l'utilisation de la face plane circulaire d'un pion en 100Cr6 comme contre-corps permet de reproduire un contact plan/plan. Un tribomètre linéaire alterné est utilisé pour mettre en mouvement la plaque réparée. Plusieurs échantillons ont été fabriqués avec différentes stratégies de réparation illustrées sur la Figure 1 a-d). Le tribomètre utilisé permet également de contrôler la direction de frottement dans trois directions différentes (0°, 45° et 90° par rapport à l'axe Y de la référence de l'échantillon). Des caractérisations complémentaires des échantillons (microstructure, densité, rugosité, dureté) ont été systématiquement conduites avant et après les essais tribologiques. Ceux-ci ont été réalisés pour différentes valeurs de force de contact et une comparaison de la résistance à l'usure avec une pièce fabriquée par un procédé conventionnel (forgeage) a également été effectuée.

* 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).

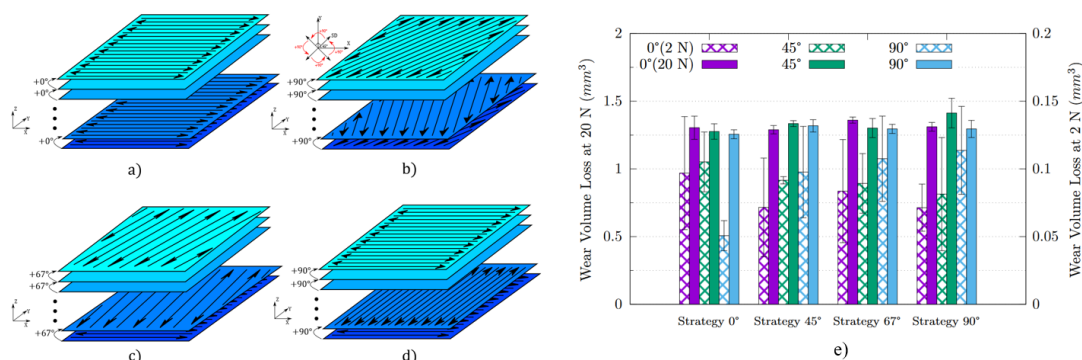


Figure 1 : Illustrations des différentes stratégies de réparation : a) Stratégie 0° ; b) Stratégie 45° ; c) Stratégie 67° ; d) Stratégie 90° e) Volume d'usure en fonction de la stratégie de réparation, de la direction de sollicitation et du chargement

RESULTATS ET DISCUSSION

Comme l'illustre la Figure 1 e), il a été constaté qu'avec une force normale de 20 N, la stratégie de réparation ainsi que la direction de frottement n'avaient aucun impact sur la tenue à l'usure de la zone réparée ce qui est un résultat encourageant pour l'éventuelle mise en place d'une méthodologie de réparation en industrie. Lorsque la force normale est réduite à 2 N, le comportement tribologique des échantillons est moins constant. L'évolution du coefficient de frottement montre une stabilisation après un certain nombre de cycles. L'usure a principalement lieu pendant la phase transitoire initiale. L'apparition de la stabilisation est expliquée à travers l'analyse des modifications de surface sur le pion et la zone réparée. Il a également été constaté qu'une pièce fabriquée par forgeage présentait un volume d'usure 14% moins important qu'une pièce réparée par LMD (pour des conditions d'essais similaires et une force normale de 20 N). Ces résultats sont prometteurs car cette différence de volume d'usure reste relativement faible si l'on prend en compte le fait que, contrairement à la zone réparée, la pièce forgée a subi également un traitement thermique lui permettant d'avoir ses propriétés mécaniques optimales.

CONCLUSION

Le but de ces travaux de recherche est donc de comprendre les mécanismes d'usure des pièces réparées par un procédé de fabrication additive en fonction des conditions de sollicitation qui leur sont imposées ainsi que de leur méthodologie de réparation. Ces résultats sont comparés avec la réponse à l'usure d'une pièce fabriquée par un procédé conventionnel afin d'évaluer la pertinence de réparer des pièces métalliques par le procédé LMD. Les premiers résultats montrent que la stratégie de réparation ne semble pas avoir d'impact sur la tenue à l'usure. De plus, l'usure semble se comporter de manière isotrope car elle ne semble pas sensible à la direction de frottement. Des essais complémentaires sont en cours, ainsi que des analyses des contraintes résiduelles ; ils viendront compléter les premiers résultats obtenus.

Références

- [1] Y. Balit, C. Guévenoux, A. Tanguy, M. V. Upadhyay, E. Charkaluk, and A. Constantinescu, “High resolution digital image correlation for microstructural strain analysis of a stainless steel repaired by Directed Energy Deposition,” *Mater. Lett.*, vol. **270**, p. 127632, 2020
- [2] Y. Balit *et al.*, “Self-heating behavior during cyclic loadings of 316L stainless steel specimens manufactured or repaired by Directed Energy Deposition To cite this version : HAL Id : hal-02563296 Self-heating behavior during cyclic loadings of 316L stainless steel specime,” 2020.
- [3] B. Onuiké and A. Bandyopadhyay, “Additive manufacturing in repair: Influence of processing parameters on properties of Inconel 718,” *Mater. Lett.*, vol. **252**, pp. 256–259, 2019



JIFT 2022

33^{èmes} Journées Internationales Francophones de Tribologie

1-3 juin 2022, Metz



SESSION 2

INTERACTIONS

MODÉLISATION NUMÉRIQUE DU CONTACT ROUE-ESSIEU FERROVIAIRE PENDANT L'OPÉRATION DE CALAGE

B. Hendrycks^{1,2}, V. Magnier², C. Hubert³, P. Dufrénoy² et S. Salengro¹

1. MG-Valdunes, F-59125 Trith-Saint-Leger

2. Univ. Lille, CNRS, Centrale Lille, UMR 9013 - LaMcube – F-59000, Lille

3. Univ. Polytechnique des Hauts de France, CNRS, UMR 8201 – LAMIH – F-59300, Valenciennes

MOTS CLES

Assemblage fretté, Éléments finis, Modélisation du contact, lubrifiant

INTRODUCTION

Dans une rame de TGV, les voitures sont supportées par des bogies, composés d'un châssis reposant sur deux essieux-montés et des éléments assurant entre autres motricité et freinage. Un essieu-monté désigne l'ensemble essieu-axe et les divers organes de roulement (roues, disques de frein, boîtes de roulement par exemple). Les organes sont montés par frettage à la presse sur l'essieu-axe (Figure 1). Ce dernier est une pièce ayant une symétrie de révolution et dont le diamètre de la section n'est pas constant. On peut alors identifier deux parties que sont les portées de calage, et le corps. Les portées de calage ont un diamètre supérieur au reste de l'axe (le corps) et sont le siège des organes de roulement. Les extrémités sur lesquelles sont montées les boîtes de roulements sont appelées fusées.

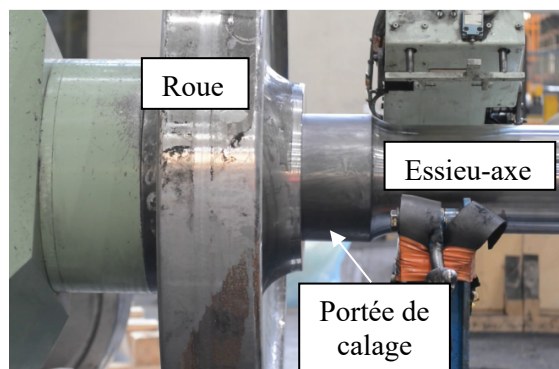


Figure 1: Opération de « calage » roue-axe

Le serrage est défini comme la différence entre les diamètres de la portée et de l'alésage. Du serrage dépend le couple maximal transmissible entre l'axe et l'organe qui doit être supérieur aux couples moteurs et résistants. Durant l'opération de calage, une presse applique un effort axial sur le moyeu de la roue jusqu'à la fin de course désirée alors que l'essieu-axe est maintenu en position. Les surfaces de la portée de calage et de l'intérieur du moyeu sont lubrifiées. L'effort fourni par la presse est mesuré et la courbe de calage obtenue permet de valider ou non l'assemblage d'après des critères normatifs.

Cet emmanchement à force introduit des contraintes résiduelles non-négligeable dans la structure. L'objectif ici est de mettre en place une simulation numérique permettant d'estimer ces contraintes.

MODÈLE NUMÉRIQUE

Le calcul des contraintes est réalisé à l'aide de la méthode des éléments finis. La symétrie de révolution de la géométrie et du chargement permet l'hypothèse d'un problème axisymétrique. La vitesse

de calage étant faible, on choisit d'ignorer les effets d'inertie. Le maintien en position de l'essieu est traduit par un blocage axial des déplacements à ses extrémités. La roue est pilotée en déplacement à l'aide d'une surface analytique infiniment rigide représentant la presse en contact avec le flanc du moyeu de la roue. On permet ainsi un déplacement axial relatif entre les deux pièces, impossible à avoir si la roue était directement pilotée.

Une attention particulière est portée au maillage dû au cisaillement très localisé en surface lors du calage. De plus, une singularité géométrique est présente à l'entrée de la portée. Il s'agit d'un chanfrein sur quelques mm et d'une hauteur du même ordre de grandeur que le serrage afin de guider la roue en début de course. Un maillage affiné est donc utilisé dans cette zone.

Le comportement des matériaux des deux pièces modélisées est élastoplastique. Pour l'acier EA1N (proche XC38) de l'essieu, les paramètres du modèle ont été identifiés à partir d'essais de traction monotone issues des travaux de Yameogo [1] et Baudoin [2]. Pour l'acier ER7 (proche XC52) de la roue, on utilise le modèle identifié par Langueh [3].

Enfin, la difficulté majeure du modèle réside dans la modélisation de l'interaction entre la roue et l'essieu, notamment dans la direction tangentielle au contact. À partir de courbes d'effort mesurés, un facteur de frottement du modèle de Coulomb avec dépendance à la pression de contact a été identifié.

RÉSULTATS

À l'issue du calage, le modèle prédit une pression de contact similaire à un calcul analytique d'un assemblage fretté sur une grande partie de la portée. On observe des pressions plus élevées aux extrémités du contact que l'on retrouve aussi dans un calcul où le frottement est réalisé par rétractation de la roue. Néanmoins, en comparant les deux résultats on peut voir que le maximum de pression à l'entrée de la portée se décale dans le sens du calage. En fait, lorsqu'on observe les déformations on remarque la création d'un bourrelet de matière en début de course qui s'étale ensuite sur une courte distance. Il en résulte une géométrie d'entrée de la portée différente de celle considérée lors du frottement par rétractation. De plus, l'étude des contraintes tangentielles en surface de la portée met en évidence la création d'une zone de traction en amont du maximum de pression, dû au bourrelet précédemment évoqué.

L'obtention de l'évolution de l'effort de calage (figure 2) nécessite d'introduire une variation du coefficient de frottement au cours de cette opération de calage. Il est montré que cette variation correspond à une dépendance à la pression de contact du frottement qui est cohérente avec la lubrification introduite dans l'opération (figure 3).

Enfin, l'influence de paramètres géométriques a été mesurée. En comparant les efforts de calage et les contraintes superficielles à la portée pour plusieurs simulations avec des positions et épaisseurs de toile (partie intermédiaire de la roue liant moyeu et jante) différentes, on a pu mettre en évidence une importance du premier ordre de la rigidité radiale de la roue.

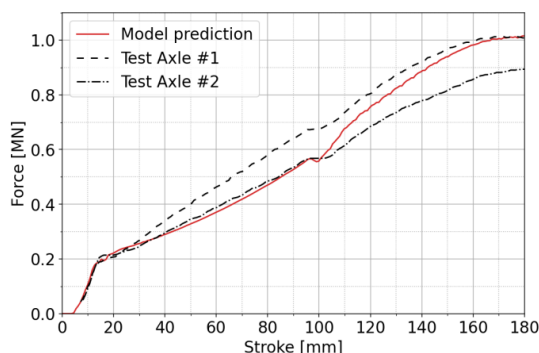


Figure 2: Evolution de l'effort axial au cours de l'opération de calage

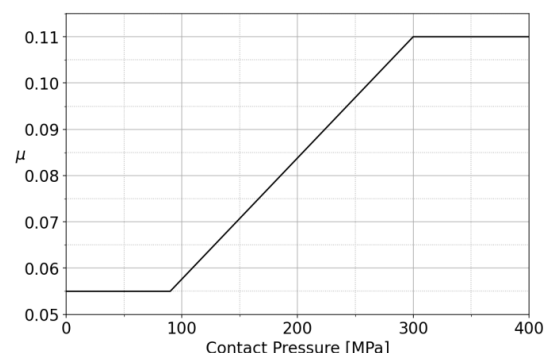


Figure 3 : Dépendance du frottement à la pression de contact

Références

- [1] A. Yameogo (2004), *Étude expérimentale et numérique de l'amorçage et de la propagation de fissure de fretting dans un assemblage roue-essieu ferroviaire*, Thèse de doctorat, École Centrale de Paris
- [2] P. Baudoin (2015), *Caractérisation et identification de propriétés de matériaux métalliques à gradients de microstructure*, Thèse de doctorat, Université de Lille I
- [3] A. Langueh (2013), *Contribution au dimensionnement des roues ferroviaires issus d'un procédé de forgeage*, Thèse de doctorat, Université de Lille I

ÉTUDE TRIBOLOGIQUE DES INTERACTIONS OUTIL MATIERE LORS D'UNE OPERATION DE FSW

D. Ambrosio¹, V. Wagner¹, G. Dessein¹

1. Laboratoire Génie de Production, Université de Toulouse, ENIT, 65016 Tarbes, France

MOTS CLES

FSW, Tribologie en conditions sévères, Démarche expérimentale

Depuis quelques années, le procédé FSW (Friction Stir Welding) (Figure 1) s'est fortement démocratisé et il est à présent utilisé dans de nombreux domaines d'application (automobile, aviation, informatique, énergie...). Ce succès s'explique, en partie, par la possibilité de générer des soudures à l'état solide et des propriétés mécaniques quasiment identiques au matériau de base.

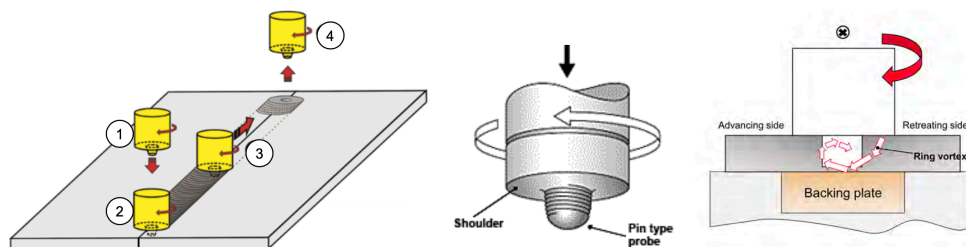


Figure 1 : Procédé FSW / Outil / Interaction outil-matière

Cependant et bien que la température de soudage ne dépasse pas la température de fusion des alliages, l'assemblage des pièces en FSW résulte d'un processus thermomécanique sévère. Les études montrent des températures proches de 80% de la température de la fusion du matériau soudé et des contraintes importantes.

Le malaxage de la matière résulte de l'action du pion de l'outil tournant et avançant dans la matière (Figure 1). Afin de restreindre le volume de matière malaxée, un effort normal est appliqué à la plaque à souder à travers l'épaulement de l'outil, favorisant l'action de confinement du matériau malaxé. Les différentes surfaces de contact engendrent alors un mouvement dans la matière créant le cordon de soudure (Figure 2).

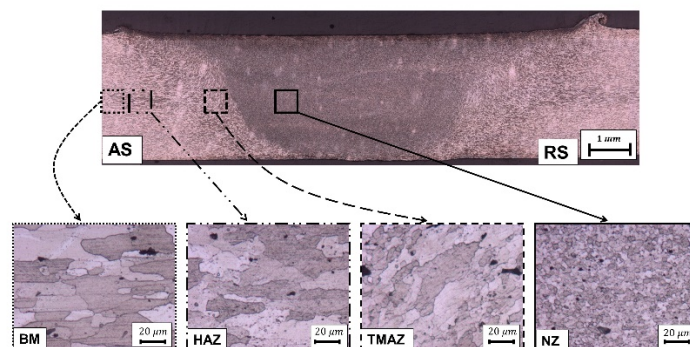


Figure 2 : Cordon de soudure résultant

L'obtention d'un joint sain dépend des paramètres opératoires choisis (vitesse de rotation et d'avance) et du contact outil-matière résultante qui peut être de type glissant, collant ou mixte. La maîtrise des phénomènes de frottement à l'interface outil-matière est alors une des clefs dans la gestion du procédé tant dans la qualité du joint que pour sa modélisation dans les simulations numériques. Néanmoins, le problème reste l'inaccessibilité de la zone de contact, ce qui rend très complexe l'étude du contact outil-matière alors que celle-ci est fondamentale pour une compréhension approfondie du procédé.

Cependant, les phénomènes tribologiques sont peu étudiés dans ce procédé. Cette difficulté s'explique par la faible accessibilité à ces données. Les travaux se consacrent souvent à des études globales d'un outil frottant sur une pièce et rarement dans des conditions comparables (température et vitesse de glissement) à celles du FSW. Le contact concerne alors plusieurs surfaces (pion et épaulement) sur de larges surfaces. Une analyse fondamentale et élémentaire de chacune des surfaces de l'outil est alors impossible.

L'objet de cet article est de proposer une étude des phénomènes tribologiques en FSW. À cet effet, un dispositif expérimental spécifique a été développé. Ce dernier se base sur l'utilisation d'une machine-outil afin d'assurer les mouvements d'avance et de rotation. Le banc d'essai permet ainsi de recréer les conditions de contact (température, vitesses de glissement et pression) d'une opération de FSW. Le frottement se fait entre le matériau à souder et un pion en acier (matériau des outils). Le choix de cette géométrie de contact (bille / cylindre) permet d'obtenir un contact élémentaire et la variation des conditions d'avance autorise l'étude des différentes surfaces de l'outil. Au bilan, il est alors possible de comprendre les interactions outil-matière en vue de mieux appréhender le comportement de l'outil lorsque ce dernier est soumis à des contraintes thermomécaniques sévères. Aussi l'instrumentation développée permet d'établir des bilans énergétiques. Enfin, des lois d'usure essentielles dans la gestion de process sont extrapolables.

INFLUENCE DE LA RUGOSITE ET DES PARAMETRES DE COUPE SUR LE COMPORTEMENT TRIBOLOGIQUE

H. Bouhabila^{1,2}, A. Bouchoucha¹, R. Benzerga³, C. Le Paven³

1 Laboratoire de mécanique, Département de Génie Mécanique, Faculté des Sciences de la Technologie, Université des Frères Mentouri, Constantine 1, Algérie

2 Département de Génie Mécanique, Faculté des Sciences et sciences appliqués, Université l'Arbi Ben M'Hidi Oum El-Bouaghi, Algérie

3 Département Science et Génie des Matériaux, IUT de Saint Brieuc, Université de Rennes 1, 22004 Saint Brieuc CEDEX, France

MOTS CLES

Rugosité, Coupe des métaux, DOE, Tribologie, Frottement, Usure.

INTRODUCTION

En productique, l'objectif est d'obtenir une qualité meilleure lié directement à la méthode d'exécution et à l'état de surface nommé rugosité [1]. C'est nécessaire de choisir le métal le plus adéquat et de modéliser théoriquement l'influence des différents facteurs impliqués (vitesse de coupe (V_c), vitesse d'avance (f) et rayon de bec (R_c)) dans le processus de la coupe afin de choisir les plus appropriés qui permettent d'atteindre la qualité des surfaces désirées [2].

Le contact de deux pièces sec et permanent, de qualité plus ou moins bonne, engendre une usure sévère qu'il faut l'étudier. Les travaux investigués par les chercheurs, comme l'approche d'Archard [3], qui a défini le taux d'usure d'un couple de matériaux, dépend de nombreux facteurs intrinsèques au matériau et relatifs aux conditions de contact comme la charge appliquée, la vitesse de glissement et la présence ou non de lubrifiant. Kerridge et Lancaster [4], ont montré la possibilité de transfert du matériau à partir du disque dur au pion ce qui pourrait augmenter la dureté de la surface de contact du pion, et par conséquent réduit le taux d'usure. Ainsi J. Ayel [5] a présenté deux actions, le cisaillement et formation de microcopeaux ou par déformation plastique qui provoquent le déplacement de matière.

Dans ce papier, notre contribution est de spécifier le comportement tribologique (sec ou lubrifié) du couple acier-acier (dur-tendre): 42CrMo4-20MnCr5, en fonction de la rugosité (R_a) résultat de la coupe du même cylindre, monté sur le mandrin d'un tour en mouvement rotatif, en contact permanent avec un pion sans mouvement (contact sphère-cylindre) à l'aide d'un tribomètre. Le coefficient de frottement μ (sec ou lubrifié) est déterminé grâce à un dispositif d'acquisition; en revanche pour le taux d'usure W (perte de masse du pion) nous procédons à un nombre comparatifs de pesés, après chaque essai.

ETUDE EXPERIMENTALE

Notre étude, consiste à faire apparaître le contact tribologique (sec ou lubrifié) dans un système utilisant deux pièces mécaniques en acier, de nuances différentes, en contact permanent (tel que : arbre à came et doigt culbuteur dans les moteurs thermiques) afin d'évaluer le coefficient de frottement et le taux d'usure en fonction de l'état de surface. Le principe est de réaliser dans la surface du cylindre des rugosités différentes (en variant les paramètres de coupes : vitesse de coupe (V_c), vitesse d'avance (f), rayon de bec de l'outil (R_c)) [6-7], reparties en plusieurs pistes, en contact permanent chacune avec un pion, afin d'étudier le comportement tribologique en frottement et en usure. L'ensemble pion-disque est monté sur un dispositif (tribomètre) pour effectuer l'essai tribologique. L'étude tribologique du couple acier-acier, de nuances (42CrMo4 et 20MnCr5), a été effectuée sur ce dispositif réalisé au laboratoire

(tribomètre pion-cylindre) équipé d'un dispositif d'acquisition et un logiciel (CASSY Lab) d'enregistrement des coefficients de frottement, ainsi les efforts engendrés. Les essais secs ont permis d'obtenir des valeurs du coefficient de frottement (μ_{sec}) entre (0.6 à 0.9). C'est la raison pour laquelle, on a utilisé de l'huile commerciale (10W40) pour lubrifier le contact dynamique [8-9]. Dans ces conditions, μ diminue ($\mu_{lubrifié} = 0.3$ à 0.5) figure 8 (b).

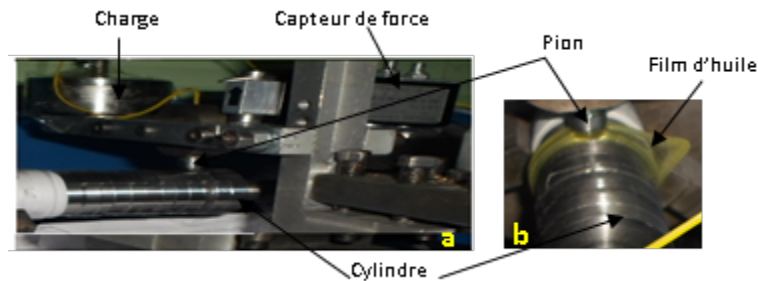


Figure 3: Tribomètre monté sur un tour parallèle, (b) Contact sec, (c) Contact lubrifié.

CONCLUSION

Notre étude nous a permis de constater et de concrétiser certains phénomènes à savoir :

- Une diminution de la valeur maximale de la rugosité (R_a) (issue de l'usinage) après tribologie, suite à la disparition des pics dues aux fortes contraintes de cisaillement au niveau des aspérités, qui se forment et se rompent de façon continue provoquant ainsi une usure complète de la surface en contact du disque.
- Nous avons abouti à un résultat connu par les chercheurs, la rugosité du disque influe positivement sur le taux d'usure (W) (perte de matière du pion de dureté inférieure).
- Présence des microfissures (le long des surfaces usées) et des débris d'usure sous formes de particules ou grains abrasif sur les surfaces du pion après contact sec, ce qui explique la facilité d'enlèvement de matière par abrasion due à la présence du troisième corps (les grains abrasifs).
- L'usure oxydative est régie par la charge appliquée pour les pions de faible dureté, utilisés dans des conditions de frottement spécifiques, des particules d'oxyde compactées provenant du pion, peuvent être déformées plastiquement pour former une couche d'oxyde métallique.
- Un mécanisme de cisaillement a été constaté sur la surface usée du disque, qui présente des microsillons et une surface lisse avec des signes de labourage, présence de déformations plastiques et des arrachements de matières,
- Un transfert de matière du pion au disque, détecté par la présence des particules qui sont le résultat du micro-écaillage et de la fragmentation du matériau du pion de faible dureté induit par le cisaillement cumulatif.
- Action des oxydes, dus à l'augmentation de la température pendant la déformation plastique.
- Afin de faciliter le glissement des surfaces en contact, nous avons utilisé du lubrifiant pour stabiliser la température, d'évacuer les grains abrasif et de diminuer les vibrations dues au bruit mécanique.

Références

- [1] J.Cecha et al (2013), *Surface roughness reduction using spray-coated hydro-gen silsesquioxane*, Applied Surface Science, **vol** (280), pp. 424-430.
- [2] A. Boryczko et al (2013), *Effect of waviness and roughness components on trans-verse profiles of turned surfaces*, Measurement, **vol** (46), pp. 688–696.
- [3] J. F. Archard (1953), *Contact and rubbing of flat surfaces*, Appl. Phys, **vol** (34), pp. 981-988.
- [4] M. Kerridge., J.K. Lancaster (1956), *The stages in a process of severe metallic wear*, Proc. Roy. Soc. Lond. A. (236), pp. 250 - 264.
- [5] J. Ayel (1976), *Les différentes formes tribologiques d'usure des surfaces métalliques*, Rev. IFP, **vol** (31), No. 4, pp.703-728.
- [6] H.Aouici, M.A.Yallese, B.Fnides, K.Chaoui, T.Mabrouki (2011), *Modeling and optimization of hard turning of X38CrMoV5-1 steel with CBN tool: Machining parameters effects on flank wear and surface roughness*, Jour of Mech Science and Tech, **25** (11) pp. 2843-2851.
- [7] G.Kibria et al (2013), *Experimental investigation and multi-objective optimization of Nd: YAGlaser micro-turning process of alumina ceramic using orthogonal array and grey relational analysis*, Optics & Laser Technology, (48), pp. 16–27.
- [8] T. Leppert (2011), *Effect of cooling and lubrication conditions on surface topo-graphy and turning process of C45 steel*, Inter Jour of Mach Tools & Manuf, **vol** (51), pp. 120–126.
- [9] P. Lepasant., Boher.C, Berthier.Y and Rezai-Aria.F (2013), *A phenomenological model of the third body particles circulation in a high temperature contact*, Wear, **vol** (298-299), pp. 66-79.



JIFT 2022

33^{èmes} Journées Internationales Francophones de Tribologie

1-3 juin 2022, Metz



SESSION 3

MESURE IN-SITU

CORRELATION ENTRE SIGNAUX D'EMISSION ACCOUSTIQUE ET MECANISMES TRIBOLOGIQUES PAR VISUALISATION SYNCHRONISÉE D'UNE INTERFACE ACIER/VERRE

K. Jlaïel¹, M. Yahiaoui¹, J.-Y. Paris¹ et J. Denape¹

1. Laboratoire Génie de Production, Université de Toulouse, École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, 47 avenue d'Azereix, 65000 Tarbes, France

MOTS CLES

Glissement réciproque, émission acoustique, observation in situ, fissures de Hertz, tribofilm, mécanismes d'endommagement et d'usure

INTRODUCTION

L'étude des interfaces glissantes constitue un défi constant en tribologie en raison du caractère masqué et dynamique des phénomènes qui s'y déroulent. En effet, l'essentiel de la compréhension des phénomènes tribologiques en frottement sec provient d'études *ex situ* de contacts séparés et figés. Pour observer directement l'évolution des éléments interfaciaux circulant dans un contact frottant, un tribomètre a été modifié, afin d'assurer une synchronisation du suivi en temps réel à travers l'observation *in situ* des interfaces dynamiques par caméra rapide couplée à la technique d'émission acoustique (EA) [1]. L'étude des signaux d'EA a montré, lors d'études antérieures, qu'ils sont sensibles non seulement aux différents modes d'accommodation interfaciaux mais également aux différents débits de matière susceptibles de contribuer à la portance du contact [2-4].

Cette étude s'intéresse à la réponse tribologique d'un contact semi-transparent acier/verre en glissement sec. L'objectif principal est d'isoler les signatures acoustiques des mécanismes élémentaires d'usure et d'endommagement ainsi que des mécanismes d'accommodation intervenant au sein du contact en se basant sur l'observation en temps réel de la zone de contact.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les essais sont réalisés sur un tribomètre équipé d'une caméra rapide (observation de la zone de contact en temps réel) et couplé à un système d'acquisition des signaux d'émission acoustique. Le couple de matériaux étudiés est constitué d'une bille en acier 100Cr6 (6 mm de diamètre) et d'un plan en verre sodocalcique, soumis à une sollicitation de glissement réciproque d'amplitude $\pm 50 \mu\text{m}$.

La première partie de cette étude expose l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus dans des conditions d'essai constantes en fréquence d'excitation (10 Hz) et en charge normale (5 N).

L'évolution temporelle du coefficient de frottement a montré l'existence de trois phases différentes en cours d'essai. La synchronisation de l'activité acoustique a confirmé l'existence de ces trois régimes à travers les paramètres acoustiques les plus pertinents à savoir l'amplitude acoustique, l'énergie absolue et le barycentre fréquentiel. Ces régimes correspondent ainsi à :

- Un régime de frottement bas où le coefficient de frottement est faible et aucun signal acoustique n'a été détecté au-delà du niveau du seuil de détection expérimental.
- Un régime transitoire où le coefficient de frottement augmente rapidement pour atteindre un pic maximal. L'amplitude acoustique et l'énergie absolue montrent une évolution importante. Le barycentre fréquentiel s'étend sur une large gamme de fréquences.
- Un régime permanent où le coefficient de frottement se stabilise. L'amplitude acoustique ainsi que l'énergie absolue enregistrent des valeurs moins importantes par rapport au régime transitoire, et la gamme de fréquences caractérisant le barycentre fréquentiel est ainsi moins étendue.

L'observation directe du contact frottant a permis de relier les signaux acoustiques avec l'évolution spatiale et temporelle des mécanismes d'endommagement et d'usure. Ces résultats ont mis en lumière trois principaux mécanismes qui apparaissent dès le début du régime transitoire de l'essai :

- Création d'un troisième corps et plus généralement activation des débits sources (premiers corps).
- Extension / développement du troisième corps qui met en jeu un mécanisme de remplissage du convergent par des débris de matière (zone d'entrée du contact) pour partie recirculés dans le contact ou repoussés hors du contact (débit d'usure).
- Amorçage et propagation de fissures hertziennes.

Ces mécanismes ont été corrélés à des classes de salves d'EA (clusters), c'est-à-dire selon leur signature acoustique, notamment grâce à des identifications synchrones (temporelles et spatiales) directes sur les signaux mécaniques et l'observation *in situ* ou à l'aide d'une analyse en composantes principales.

La synchronisation de l'observation a aussi permis de décrire quantitativement l'évolution de ces mécanismes par des mesures en continu de l'aire de portance du contact, des dimensions du tribofilm et de la hauteur maximale du remplissage du convergent ainsi que du nombre et de la taille des fissures apparaissant à l'arrière du contact.

La deuxième partie de l'étude a porté sur l'influence des paramètres opératoires, telles que la charge normale (5 N et 15 N) et la fréquence d'excitation (10 Hz et 20 Hz), sur la réponse tribologique et acoustique du contact acier/verre. Les différents essais ont montré que les trois régimes sont conservés mais le niveau de frottement est influencé par la charge normale appliquée. Concernant le mécanisme de fissuration, l'observation directe a montré que les dimensions des fissures hertziennes dépendent également de la charge normale appliquée mais aussi de la fréquence d'excitation.

Enfin, la classification des salves acoustiques a confirmé l'existence des trois mécanismes identifiés dans la première partie de l'étude (établissement d'un film interfacial, rôle du convergent, fissuration du verre). Les caractéristiques acoustiques de ces classes sont fortement liées au développement des modes d'accommodation et à la taille des sites d'accommodation qui représentent les sources d'émission acoustique.

CONCLUSION

L'étude a permis d'identifier trois principaux mécanismes d'endommagement et d'accommodation dans le contact, corrélés à des classes de salves d'émission acoustique associées à des observations / mesures en continu des débits (source, interne et externe) et aux caractéristiques des fissures. Les caractéristiques acoustiques sont liées à la taille des sources et à l'intensité des mécanismes associés :

- Établissement d'un film interfacial : la génération d'un tribofilm épais s'accompagne d'une augmentation de l'énergie absolue et d'une diminution du barycentre fréquentiel.
- Remplissage du convergent : lien entre la quantité de débris piégés, le nombre de salves générées et l'intensité de l'énergie absolue.
- Fissuration du verre : lien étroit entre la longueur des fissures, le barycentre fréquentiel et l'énergie absolue.

Références

- [1] K. Jlaiel, M. Yahiaoui, J.-Y. Paris, J. Denape (2020), *Tribolumen: a tribometer for a correlation between AE signals and observation of tribological process in Real-Time-Application to a dry steel/glass reciprocating sliding contact*, *Lubricants*, 8, 4, pp. 47-58.
- [2] V. Baranov, E. Kudryavtsev, G. Saryche, V. Schavelin (2007), *Acoustic Emission in Friction*, Elsevier, vol. 53.
- [3] A. Hase, H. Mishina, M. Wada (2012), *Correlation between features of acoustic emission signals and mechanical wear mechanisms*, *Wear*, 292-293, pp. 144-150.
- [4] M. Yahiaoui, F. Chabert, J.-Y. Paris, V. Nassiet, J. Denape (2019), *Friction, acoustic emission, and wear mechanisms of a PEKK polymer*, *Tribology International*, 132, pp. 154-164.

SONDES THERMO-LUMINESCENTES TYPE DIAMANT : UN OUTIL POUR L'INSTRUMENTATION DE L'EXTREME SURFACE DES SOLIDES DANS UN CONTACT

Z. Zhou^{1,2}, A. Saulot¹, E. Homeyer², A. Tanguy¹, S. Descartes¹

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

2. Institut Lumière Matière, UMR CNRS 5306, Université Lyon1-CNRS, 69622 Villeurbanne Cedex

MOTS CLES

Frottement, Luminescence, Verres métalliques

INTRODUCTION

Les alliages métalliques amorphes (AMA) [1] obtenus par thermoformage [2] sont de bons candidats pour le design de surfaces à des fins tribologiques. Leur potentiel intérêt a été mis en évidence dans différentes applications tribologiques : par exemple, des alliages base Zirconium utilisés dans des roulements à rouleaux présentent une résistance à l'usure de l'ordre de 2 fois plus importantes que pour des roulements GCr15 [3] ; la durabilité de micro-engrenages en AMAs base Nickel est plus de 300 fois supérieure à celle des micro-engrenages réalisés en SK Steel, avec un volume d'usure beaucoup plus faible [4] ; des AMAs base Cu-Zr ont montré une résistance à l'usure 60 % supérieure à celle des aciers à haute performance dans des applications de type engrenages [5]. Le contrôle de la composition des AMAs permet d'ajuster leur comportement plastique ou leur sensibilité à l'oxydation. Cependant, leurs propriétés mécaniques deviennent très sensibles à la température au voisinage de la température de transition vitreuse T_g , qui, selon la composition peut varier de 150 à 800 °C [6-9]. Ainsi dans le cas de contacts avec AMAs, la température locale sous frottement est une mesure expérimentale nécessaire.

Les contacts entre deux corps est un système confiné, donc peu accessible par des mesures directes locales *in situ*. Jusqu'à présent les mesures de température sont réalisées par infrarouge ou grâce à des thermocouples. Mais la résolution est encore trop faible par rapport aux échelles de temps et de longueur des phénomènes physiques mécaniques dans un contact. De plus, les mesures par infrarouge dépendent de l'émissivité qui varie selon l'état de surface, les mesures par thermocouples placés à différentes profondeurs supposent de connaître le comportement thermique local des corps en contact... ce qui n'est pas toujours le cas. Nous proposons de mettre en œuvre une méthode originale de mesure de température par spectrométrie optique de fluorescence [10]. Cette méthode sans contact permet une mesure locale *in situ* de température avec une résolution temporelle inférieure à la μ s.

La méthode optique et la calibration en température des marqueurs luminescents seront décrites. Les essais préliminaires tribologiques avec deux AMAs différents seront présentés. Des perspectives au travail seront dressées.

MÉTHODE ET MATÉRIAUX

Principe de la mesure optique - Des micro-diamants (~20 μ m) sont utilisés. Ils sont obtenus à l'aide de précurseurs de Ni sous haute pression et température. Certains diamants dopés Ni contiennent des défauts de type S3 (V-N-Ni-N-V). Sous excitation d'un laser pulsé et monochromatique ($\lambda_{exc}=444$ nm), ces défauts émettent une luminescence verte. Le temps de relaxation de luminescence (temps de vie) dépend de la température. Afin de réaliser des mesures d'échauffement sous frottement les diamants sont encapsulés dans une matrice en verre borosilicate via un procédé de vitrification.

Paramètres tribologiques - Des essais de frottement sont réalisés en cinématique alternative, à une vitesse linéaire de 4 mm.s^{-1} sur 20 cycles. La course par cycle est de 10mm. L'éprouvette bombée est en acier 100C6, de rayon 70 mm. Le plan est un AMA, base Nickel ou base Zirconium. Les pressions maximales de Hertz initiales sont : 170 et 310 MPa. Les forces normale et tangentielle sont mesurées. Après essai, les morphologies de surfaces sont analysées en combinant microscopie optique, microscopie électronique à balayage, et spectrométrie de rayons X.

RÉSULTATS

Le procédé de vitrification implique d'atteindre des températures de l'ordre de 1500°C . Des essais de calibration sont donc réalisés pour mesurer le temps de vie des sondes lumineuses encapsulées, à différentes températures [20°C - 400°C]. Le temps de relaxation (temps de vie de luminescence) diminue lorsque la température augmente (figure 1).

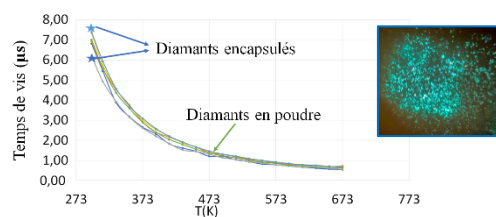


Figure 1: Mesures du Temps de Vie de la luminescence des micro-diamants sous $\lambda_{exc}=444 \text{ nm}$ (en encart : luminescence des défauts type S3 présents dans les diamants sous éclairage UV)

Le coefficient de frottement dépend de la composition du verre métallique et des conditions d'essai (Figure 2).

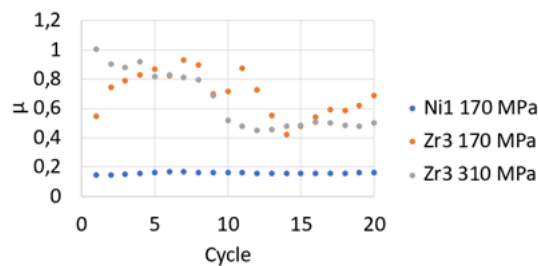


Figure 2 : Coefficient de frottement moyen par cycle (μ), sur 20 cycles

CONCLUSION

Après avoir relevé quelques défis techniques, le couplage du tribomètre instrumenté avec la méthode optique devrait permettre d'accéder à la température locale *in situ* en condition de frottement pour un couple tribologique constitué d'un verre métallique et d'un verre borosilicate. Le cycle d'échauffement au contact pourra être identifié avec une précision jamais égalée jusqu'à présent ($< \mu\text{s}$, $\sim 10 \mu\text{m}$).

Remerciements

G. Ledoux (ILM, UCBLI) et N. Ollier (Polytechnique) pour les discussions scientifiques. La Région Auvergne-Rhône-Alpes pour le soutien financier (projet NERFS).

Références

- [1] M.F. Ashby, A.L. Greer (2006), *Metallic Glasses as structural materials*, Scripta Materialia 54, pp. 321–326.
- [2] S. Gravier et al. (2012), *Thermoplastic Forming of Bulk Metallic Glasses*, International Journal of Applied Glass Science 3, pp. 180-187.
- [3] M.Z. Ma et al. (2004), *Resistance of Zr-based bulk metallic glass applied in bearing rollers*, Materials Science and Eng. A386, pp. 326-330.
- [4] M. Ishida et al. (2007), *Wear resistivity of super-precision microgear made of Ni-based metallic glass*, Materials Science and Engineering A 449–451, pp. 149–154.
- [5] D. Hofmann et al. (2016), *Optimizing Bulk Metallic Glasses for Robust, Highly Wear-Resistant Gears*, Adv. Eng. Materials, pp. 1-10, doi: 10.1002/adem.201600541
- [6] J. Qiao et al. (2014), *Dynamic mechanical relaxation in bulk metallic glasses: a review*, J. Mater. Sci Tech., 30, 523-545.
- [7] V. Keryvin et al. (2008), *Elastic moduli of a ZrCuAlNi bulk metallic glass from room temperature to complete crystallisation by in situ pulse-echo ultrasonic echography*, J Ceram. Soc. Japan, 116, pp. 851-854
- [8] M. Idriss et al. (2015), *Evolution of the elastic modulus of Zr-Cu-Al BMGs during annealing treatment and crystallization: Role of Zr/Cu ratio*, J. Non-Cryst. Sol., 421 35.
- [9] T. Rouxel et al. (2015), *Elastic properties and atomic bonding character in metallic glasses*, J. App. Phys., 118, 044901.
- [10] E. Homeyer et al. (2015), *Diamond contact-less micrometric temperature sensors*, Appl. Phys. Lett., 106, 243502.

COULOMB ET LA TRIBOELECTRICITE

J. Frêne¹, L. Deville², H. Zaidi¹, M. Arghir¹ et O. Bonneau¹

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

2. Louisiana Solar Energy Lab, University of Louisiana-Lafayette (USA)

Résumé:

En 1600, Gilbert établit la première liste de classement des matériaux triboélectriques et écrit ses mémoires sur la triboélectricité et sur le magnétisme. Par la suite plusieurs machines triboélectriques se développent (machine d'Otto de Guericke, Machine de Ramsden, de Nairne, de Van Marum,...). Le potentiel électrique de la machine augmente avec la vitesse de rotation de la machine et son débit électrique est proportionnel à la surface frottée. Les deux grandeurs ne dépendent pas de la pression de contact au-delà d'une pression limite. La découverte des bouteilles de Leyde ou des condensateurs a permis de stocker le fluide électrique. Un électroscope à feuilles métalliques permettait de mesurer le potentiel triboélectrique généré.

Coulomb (1736-1806) tribologue a construit un tribomètre pour mesurer le frottement entre les matériaux et particulièrement celui du cordage des navires. Le tribomètre permettait de mesurer la force tangentielle de frottement pour une charge normale imposée. Puis, Membre de l'académie des sciences, Coulomb a été chargé d'étudier et de concevoir une boussole suspendue à fil. Ces boussoles sont très sensibles aux variations du champ magnétique terrestre qu'une boussole flottante ou posée sur un axe. Elles permettent aussi de mesurer la composante horizontale du champ magnétique terrestre en comptant le nombre d'oscillations que l'aiguille effectue avant de se stabiliser en direction du méridien magnétique. Pour ceci Coulomb conçoit et fabrique une balance de torsion de haute précision et détermine la loi de torsion des fils.

Le fil de suspension pour mesurer la torsion de la tige horizontale portant l'aiguille magnétique ou les micro charges triboélectriques est la pièce essentielle de la balance de torsion de Coulomb. Un de ceux que Coulomb employa était en argent très fin de longueur 1m et de poids 0,01g ou de diamètre 35 μm .

La balance est capable de mesurer une force de l'ordre de cinquante-deux milliardième de Newton, ce qui correspond au poids de 5 μgramme . Il a établi les lois d'interaction entre deux aimants en fonction des masses magnétiques et de la distance qui les sépare. Puis, au moyen d'une balance de torsion équivalente, Coulomb a mesuré les forces d'interactions entre des charges triboélectriques en remplaçant les masses magnétiques par des boules isolantes de sureau. Les charges électriques ont été produites par une machine triboélectrique.

Pour la mesure des forces électrostatiques la tige horizontale doit être légère et isolante. Coulomb l'a réalisée en paille enduite de cire d'Espagne pour la rigidifier. Contrairement à la facilité des expériences faites pour établir l'attraction magnétique en fonction de la distance entre deux masses magnétiques, la mesure des forces électrostatiques entre deux micro charges triboélectriques était très difficile à réaliser. En effet, La mesure de la force d'attraction entre deux charges d'électricité contraire est quasi impossible à réaliser car les deux charges s'attirent et se collent. La mesure de la force de répulsion entre deux boules d'électricité commune a été possible mais avec beaucoup de précautions expérimentales. Car les forces électriques sont très faibles et les corps perdent leurs charges électriques notamment en milieu humide. Coulomb était obligé de dessécher l'intérieur de la balance pendant des heures par la chaleur puis de réaliser l'expérience en moins d'une minute pour réduire la déperdition de l'électricité par le contact de l'air.

La triboélectricité a permis la compréhension de l'électrostatique des matériaux et puis le développement électrique.

ELABORATION DE NANO-SONDES THERMOMETRIQUES PHOTOLUMINESCENTES : VERS UNE APPLICATION POUR LES CONTACTS TRIBOLOGIQUES

Y. Zhou^{1,2}, G. Ledoux³, L. Bois¹, C. Journet-Gautier¹, S. Descartes², D. Philippon²

1. Laboratoire des Multimatériaux et Interfaces, UMR CNRS 5615, Université Lyon1-CNRS, 69622 Villeurbanne Cedex

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

3. Institut Lumière Matière, UMR CNRS 5306, Université Lyon1-CNRS, 69622 Villeurbanne Cedex

MOTS CLES

Thermométrie, Nanoparticules, Mesures *operando*

INTRODUCTION

Au cours des 20 dernières années la recherche expérimentale en tribologie veut dépasser les limites de la mesure, confinée à des analyses post-mortem, par le développement de techniques dites *in situ* ou *operando*. L'objectif est de réaliser des mesures au niveau de l'interface, dans son état « naturel », c'est-à-dire sous pression et cisaillement, au cours du fonctionnement du contact. Parmi les techniques *in situ* ayant montré un potentiel intéressant pour la tribologie, les techniques spectroscopiques (Raman, fluorescence) permettent d'interagir avec l'interface ; ce qui nécessite des premiers corps en contact transparents aux longueurs d'ondes du rayonnement utilisées. Alors que des premiers travaux ont permis de sonder et réaliser des premières mesures de pression et température dans des liquides confinés entre deux solides en contact soumis à des sollicitations tribologiques [1], il n'est pas possible actuellement, de sonder directement l'extrême surface des solides, contributrice à la dissipation d'énergie dans les contacts.

L'objectif est de mettre au point de nouveaux matériaux adaptés permettant la mesure locale de pression et de température indépendamment, en extrême surface. Considérées comme un capteur efficace, non destructif et de haute précision, les sondes photoluminescentes à conversion ascendante (« Up-Conversion » : UC) ont un grand potentiel pour la thermométrie [2] ou la mesure de pression [3]. Dans un premier temps des particules fluorescentes sensibles à des variations thermiques sont sélectionnées et élaborées. La pression, paramètre variant dans le contact, l'indépendance de la photoluminescence à la pression est également importante.

MATERIAUX et METHODE

Dans cette étude, les sondes choisies sont des nanoparticules (NPs) d'orthovanadate de gadolinium (GdVO₄) dopées 10% Ytterbium (Yb) et 2% Erbium (Er) [4, 5]. Ces sondes photoluminescentes sont synthétisées par méthode de chimie douce. Des analyses par microscopie électronique à transmission (MET) montrent une morphologie d'ellipsoïdes homogènes, de taille inférieure à 50 nm. Grâce à la transformation d'énergie UC entre Yb et Er, ils émettent une lumière verte de forte intensité sous une longueur d'onde d'excitation λ_{exc} de 970 nm (proche infra-rouge).

RESULTATS

Les étalonnages de ces sondes thermométriques sont effectués dans la gamme de température [25-300°C], à pression ambiante (Figure 1). Le rapport d'intensité de luminescence (LIR) des pics d'émission couplés thermiquement varie linéairement avec la température, et cette variation est réversible. Ensuite, leur indépendance vis-à-vis de la pression (jusqu'à 1 GPa) est vérifiée à 4 températures, à l'aide de cellules à enclumes en diamant (DAC) entourées d'un anneau chauffant pour un environnement isotherme sous pression (Figure 2). Le rapport d'intensité de luminescence (LIR) des pics d'émission couplés thermiquement est indépendant de la pression.

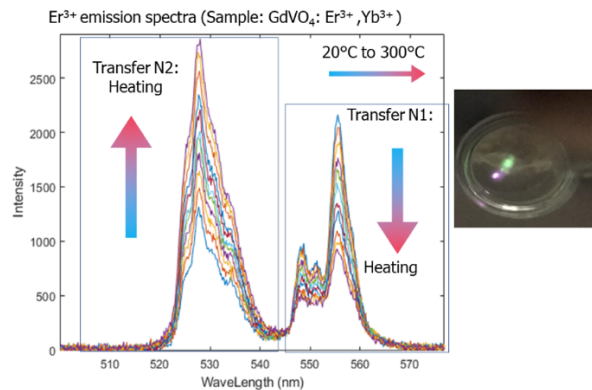


Figure 1 : Spectre d'émission de NPs {GdVO₄, Yb; Er} sous laser de 970 nm (2,5 W/cm²). Encart: photo de NPs {GdVO₄, Yb; Er} excité par un crayon laser de 980 nm

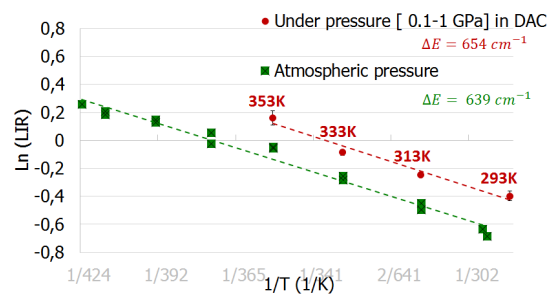


Figure 2: Calibration en température, NPs {GdVO₄, Yb; Er} 0,5% wt en suspension (huile Nycobase 5750), sous laser 970 nm (13,5 W/cm²) à pression atmosphérique et pression [0,1-1 GPa]

CONCLUSION

Ces résultats analytiques permettent de valider les NPs {GdVO₄, Yb ; Er} comme sondes thermométriques, indépendantes de la pression. Pour les futures mesures *operando* dans un contact, elles seront mélangées dans un fluide lubrifiant, ou dispersées dans les solides en contact par un procédé sol-gel, qui est un procédé de chimie douce (à température ambiante) pour des mesures de température en extrême surface.

Remerciements

Ce projet est soutenu par 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).

Références

- [1] S. M. B. Albahrani, T. Seoudi, D. Philippon et al. (2018), *Quantum dots to probe temperature and pressure in highly confined liquids*, RSC Adv., **8** (41), pp. 22897–22908.
- [2] M. Runowski et al. (2019), *Upconverting Lanthanide Fluoride Core@Shell Nanorods for Luminescent Thermometry in the First and Second Biological Windows: β -NaYF₄:Yb³⁺ - Er³⁺@SiO₂ Temperature Sensor*, ACS Appl. Mater. Interfaces **11** (14) pp. 13389–13396.
- [3] C. A. McLellan et al. (2022), *Engineering Bright and Mechanosensitive Alkaline-Earth Rare-Earth Upconverting Nanoparticles*, J. Phys. Chem. Lett., **13** (6), pp. 1547–1553.
- [4] T.V. Gavrilović et al. (2016), *Multicolor upconversion luminescence of GdVO₄:Ln³⁺/Yb³⁺ (Ln³⁺=Ho³⁺, Er³⁺, Tm³⁺, Ho³⁺/Er³⁺/Tm³⁺) nanorods*, Dye. Pigment., **126**, pp. 1–7.
- [5] F. Paz-Buclatin et al. (2019), *GdVO₄:Er³⁺/Yb³⁺ nanocrystalline powder as fluorescence temperature sensor. Application to monitor the temperature of an electrical component*, Sensors Actuators, A Phys., **299**.



JIFT 2022

33^{èmes} Journées Internationales Francophones de Tribologie

1-3 juin 2022, Metz



SESSION 4

RAYAGE ET INDENTATIONS

EFFET DE LA TEMPERATURE ET DE LA TENEUR EN TALC SUR LE COMPORTEMENT AU MICRORAYAGE DU COMPOSITE POLYPROPYLENE-TALC

M. Teldjoun¹, M. Mendas¹, S. Mezlini², B. Bouiadjera³

1. LRM, Faculté of Technologie, Université de Chlef, Algérie, m.teldjoun@univ-chlef.dz

2. LGM, Ecole Nationale d'Industrie de Monastir (ENIM), Tunisie

3. LMPM, Département de Génie Mécanique, Université de Sidi Bel Abbes, Algérie

MOTS CLES

Polypropylène, talc, endommagement, coefficient de frottement, température.

ABSTRAIT

Ce travail traite le comportement tribologique du composite Polypropylène-talc nano-chargé (PP-talc) sous des tests de microrayage à température ambiante et contrôlée. Quatre échantillons de PP-talc avec 0, 5, 10 et 50 % de proportions de talc d'environ $\sim 1 \mu\text{m}$ ont été utilisés. Les essais ont été réalisés à l'aide d'un indenteur conique en diamant et sous quatre charges normales : 2, 5, 10 et 15 N et quatre températures : 20, 36, 53 et 65 °C. Les résultats ont été examinés et discutés via la visualisation optique et de l'évolution du coefficient de frottement (COF) en fonction des deux paramètres : la proportion de talc et la température. Les micrographies ont montré certaines formes d'endommagement tel que : des écailles de poisson, des écoulements-glissements et de l'enlèvement de matière. Des endommagements insignifiants et des faibles valeurs de coefficient de frottement sont obtenus lors du rayage avec une proportion de talc de 50 % pour toutes les forces normales et les températures utilisées. D'une manière générale et pour le matériau étudié, les résultats obtenus montrent que la proportion de talc (50%) améliore la résistance à la rayure en termes d'endommagement. Plus la force normale est faible, plus le COF est grand et vice-versa est observé pour toutes les températures utilisées.

TEMPERATURE AND TALC CONTENT EFFECT ON MICROSCRATCH BEHAVIOR OF POLYPROPYLENE-TALC COMPOSITE

KEYWORDS

Polypropylene, talc, damage, coefficient of friction, temperature.

ABSTRACT

This work deals with the tribological behavior of the nano-filled Polypropylene-talc composite (PP-talc) under microscratch tests at room and controlled temperature. Four samples of PP-talc with 0, 5, 10 and 50% talc proportions of approximately $\sim 1 \mu\text{m}$ were used. The tests were carried out using a conical diamond indenter and under four normal loads: 2, 5, 10 and 15 N and four temperatures: 20, 36, 53 and 65°C. The results were examined and discussed via optical visualization and the evolution of the coefficient of friction (COF) as a function of two parameters: the proportion of talc and the temperature. The micrographs showed some forms of damage such as: fish scales, stick-slips and material removal. Insignificant damage and low coefficient of friction values are obtained when scratching with a talc content of 50% for all normal forces and temperatures used. In general and for the material studied, the results obtained show that the proportion of talc (50%) improves the scratch resistance in terms of damage. The lower the normal force, the greater the COF and vice versa is observed for all the temperatures used.

ETUDE DE L'ANISOTROPIE CRISTALLINE PAR INDENTATION ET RAYURE SUR UN MONOCRISTAL DE CUIVRE

L. Pinheiro de Brito, I. Lahouij, K. Inal, P. Montmitonnet

Mines Paris, PSL*, CEMEF, CNRS UMR 7635

MOTS CLES

Anisotropie plastique, indentation, rayure

INTRODUCTION

L'anisotropie du frottement a été étudiée de longue date et reliée à la plasticité anisotrope, par exemple par Bowden et Brookes pour les monocristaux non-métalliques [1]. Nous décrivons ici des essais d'indentation et rayure par un cône d'angle 120° terminés par une sphère de rayon $20\ \mu\text{m}$, sur les faces (001) et (111) de monocristaux de cuivre. Ils sont réalisés in situ par un dispositif Alemnis In-SEM [2] dans un microscope électronique à balayage (MEB) Tescan MAIA3 pour visualiser en continu la formation et l'évolution de la rayure et des bourrelets latéraux et frontaux.

ETUDE EXPERIMENTALE

En régime stabilisé, le bourrelet se forme sur l'avant lorsqu'on raye dans la direction [110] alors qu'il se dédouble de part et d'autre de la direction de rayage dans le cas [010], donnant des bourrelets latéraux bien plus hauts et bien plus étendus dans la direction transverse (figure 1a). Cela conduit à une force de rayage plus élevée en [110] qu'en [010] (figure 1c) alors que l'enfoncement est moindre (figure 1b). On fera aisément le rapprochement avec les résultats de Bailey et Gwathmey [3].

Il est à noter que les positions des bourrelets frontaux et latéraux coïncident avec ce que montre la simple indentation normale qui initie la rayure.

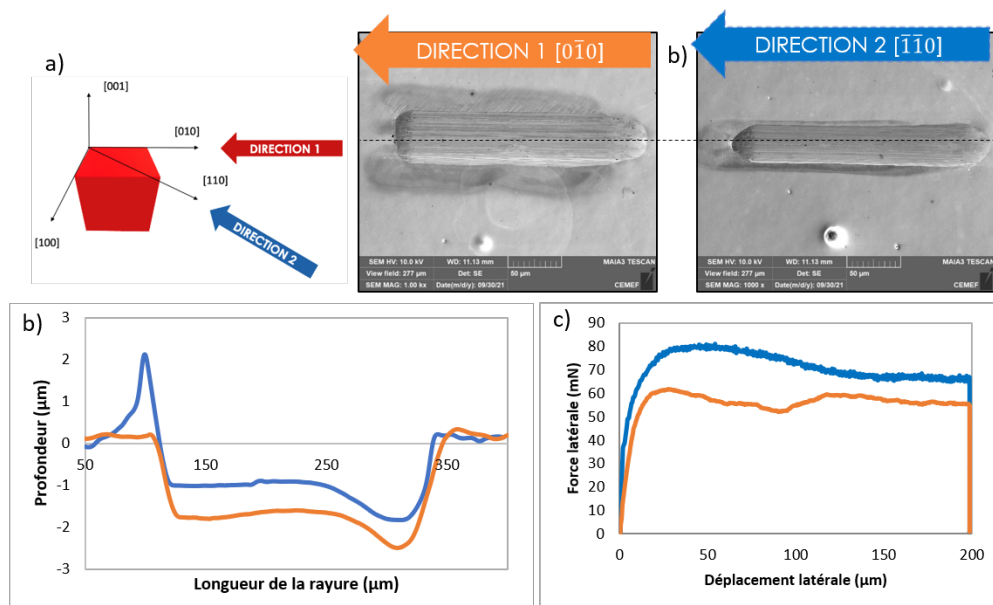


Figure 1: (a) Observations MEB des rayures sur un monocristal (001) de cuivre dans les directions cristallines [010] et [110]. Comparaison entre les deux directions (b) de la profondeur de la rayure (mesure rugosimétrique), (c) de la force longitudinale. Courbe bleue : [110] ; courbe orange : [010].

La figure 2 met en évidence deux champs d'écoulement bien différents sous la surface des deux coupes par Focused Ion Beam (FIB).

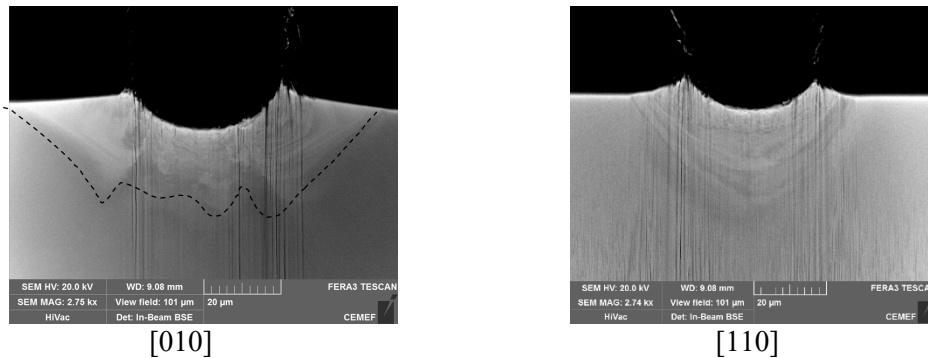


Figure 2: Observations MEB (mode BSE) de coupes FIB des deux rayures.

MODELISATION DES ESSAIS

En parallèle, les essais d'indentation normale et de rayure ont été simulés par la méthode des éléments finis (FEM) avec le logiciel Abaqus®. Les coefficients du critère de Hill 1948 ont été identifiés pour le plan (001) à partir de mesures de compression de micro-piliers et d'indentation, en utilisant simultanément la courbe force-enfoncement et la géométrie des bourrelets. Appliquée à la rayure, la simulation présente alors une bonne corrélation avec les résultats expérimentaux (figure 3). Les champs de déformation en coupe (non montrés ici) retrouvent bien les morphologies suggérées par la figure 2.

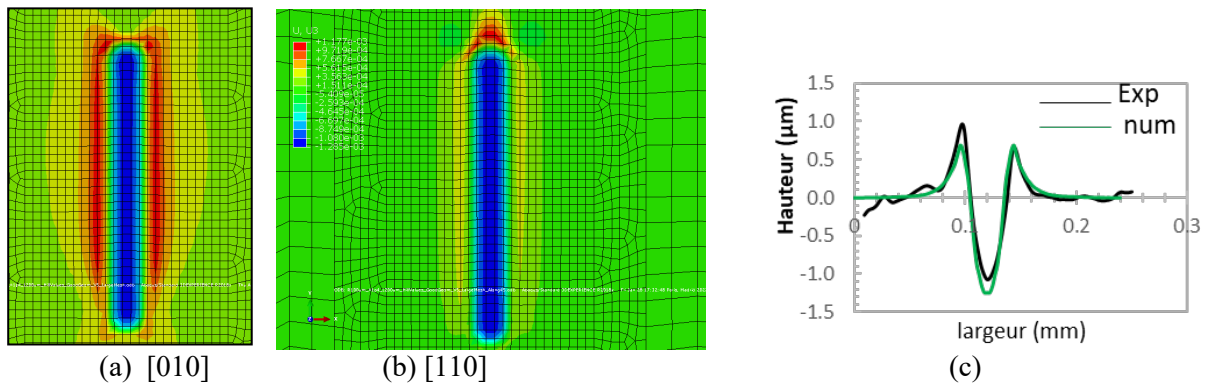


Figure 3: Modélisation des rayures. (a), (b) : composante verticale du champ de déplacement (= forme des bourrelets) ; (c) comparaison des profils calculé et expérimental du cas [110].

CONCLUSION

Les observations montrent une grande influence de l'anisotropie, ici simplifiée par l'utilisation de monocristaux, sur l'écoulement au voisinage de la surface lors d'interactions de contact tout autant que sur les forces. Un des objectifs de long terme est donc de tester la capacité de la combinaison d'essais d'indentation, de rayure et de compression de piliers pour identifier les détails de l'anisotropie d'un matériau de surface quelconque.

Références

- [1] F.P. Bowden, C.A. Brookes (1966), *Frictional anisotropy in nonmetallic crystals*, Proc. Roy. Soc London **A295** (1442), pp. 244-258.
- [2] <https://alemnis.com/in-sem/> (accès : 02/05/2022).
- [3] J.M. Bailey, A.T. Gwathmey (1962), *Friction and surface deformation during sliding on a single crystal of copper*, ASLE Trans. **5**, pp.45-56

COMPORTEMENT A LA RAYURE D'UNE SURFACE DE POLYCARBONATE ORIENTEE : INFLUENCE DE L'ANISOTROPIE DES PROPRIETES MECANIQUES

M. PECORA¹, A. EGELE¹, M. SOLAR², D. FAVIER¹, C. GAUTHIER¹

1. Université de Strasbourg, CNRS, Institut Charles Sadron, Strasbourg, France

2. Université de Strasbourg, INSA de Strasbourg, CNRS, Institut Charles Sadron, Strasbourg, France

MOTS CLES

Polymère, orientation structuration, rayure, simulation numérique, anisotropie

INTRODUCTION

Les polymères amorphes et semi-cristallins ont la capacité d'avoir leurs structures moléculaires orientées par étirage ou biétirage mécanique. Ce mécanisme d'amélioration des propriétés mécaniques est connu et largement utilisé dans la mise en œuvre par des techniques de soufflage pour des films plastiques et des bouteilles. Les études mécaniques portent alors sur le lien entre orientation structurale et propriétés de traction, et à cause des faibles épaisseurs obtenues il est impossible de réaliser des mesures de compression. Les bases de l'étude expérimentale et de l'analyse du comportement de surface de différents polymères semi-cristallins étirés ont été établies à partir de travaux antérieurs réalisés au laboratoire [1][2]. Des essais de rayure réalisés sur des films minces de polypropylène (iPP) et de polyéthylène haute densité (PEHD) orientés, ont permis d'observer in-situ les écoulements plastiques frontaux autour du contact et, post-mortem, les bourrelets plastiques latéraux des sillons. Ces bourrelets présentent une dissymétrie de géométrie selon la direction de la rayure, par rapport à la direction d'étirement. Le champ des contraintes sous et autour d'un objet qui raye plastiquement une surface de polymère est une complexe combinaison de traction, de cisaillement et principalement de compression, et ce champ de contrainte est piloté par la forme de l'objet et par le frottement interfacial. La compréhension du lien entre orientation structurale et propriétés tribologiques est encore lacunaire, car le lien entre orientation et propriétés mécaniques de compression est elle-même lacunaire.

PRESENTATION DES ESSAIS

Des plaques de polycarbonate (PC) épaisses ont été orientées par traction, pour d'obtenir des échantillons suffisamment épais afin de permettre l'étude des comportements en compression dans les différentes directions par rapport à la direction d'étirage. Ce matériau a été retenu par sa facilité à être orienté de par sa ductilité et pour sa transparence. Le taux d'étirage obtenu était de 1.8. Des pions cylindriques ont été usinés et testés en compression dans les différentes directions. La figure 1 illustre ces essais et les résultats.

En parallèle, le comportement surfacique de ces PC orientés a été étudié avec notre dispositif de micro visio scratch qui permet d'observer in-situ la forme et l'aire de contact pendant la rayure [3], possibilité permise par la transparence du PC. Des tests de rayure ont été réalisés en enregistrant in-situ la surface de contact réelle avec une pointe sphérique de 500 μ m de rayon et une charge normale croissante de 0.5N à 15N à différentes orientations par rapport à la direction de l'étirement (0°, 45° et 90°). Les images in-situ des rayures correspondantes avec les zones de contact pour une force normale de 15N sont présentées figure 2. La rayure obtenue sur un échantillon isotrope ($\lambda=1$) est également donnée. L'anisotropie plastique affecte la déformation autour de la pointe de glissement. En particulier,

les bourrelets plastiques frontaux et latéraux ont une forme différente pour chaque angle d'orientation. De plus, alors que les bourrelets latéraux du sillon sont symétriques par rapport à l'axe de rayure pour les directions de rayure parallèles et normales à la direction d'étirage, une asymétrie est observée sur la rayure obtenue à 45°.

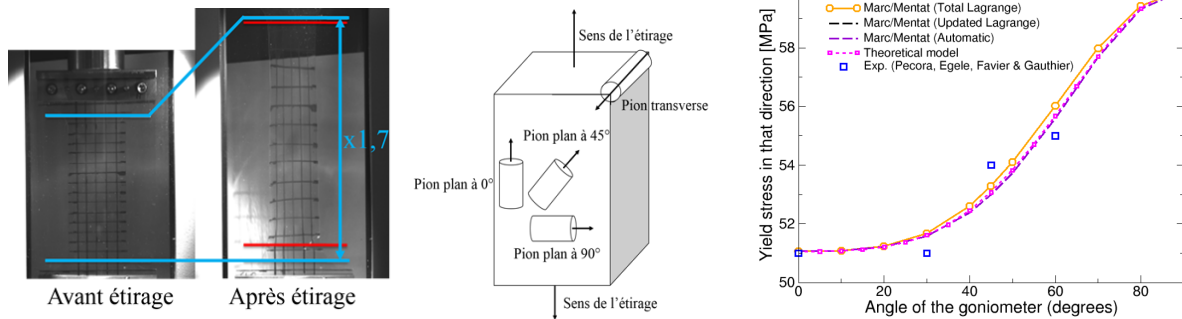


Figure 1 : à gauche exemple d'une orientation structurale du PC. Au centre principe d'extraction des pions de compression. A droite, description de la plasticité de Hill non isotrope [4] calibrée sur des expériences de compression (limite d'élasticité = 82 MPa, $Yrdir1 = 0.6226$, $Yrdir2 = 0.7313$, $Yrdir3 = 1$, $Yrshr1 = 0.5923$, $Yrshr2 = 1$ et $Yrshr3 = 1$). Les paramètres matériaux ont été calibrés sur la base d'essais de compression expérimentaux jusqu'à 15% de déformation.

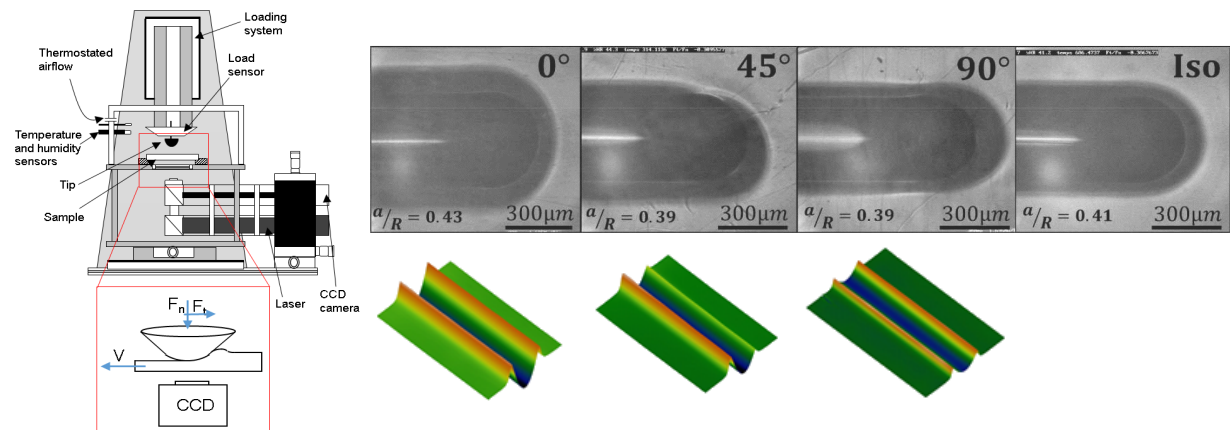


Figure 2 : à gauche, principe du banc de test. A droite, observations in-situ des aires de contact pour une force normale de 15N obtenues sur du polycarbonate (PC) isotrope ($\lambda=1$) et anisotrope ($\lambda=1.8$) à différents angles d'orientation par rapport à la direction d'étirage, et relevés profilométriques.

ANALYSE NUMERIQUE

Un modèle numérique de rayure a été développé et sera présenté oralement. Comme il existe de nombreuses possibilités d'analyser l'asphéricité des contraintes et des déformations dans l'environnement de la pointe, il a été décidé d'observer d'abord les évolutions de la déformation plastique équivalente totale (TEPS). Cette quantité est définie à partir du tenseur de déformation plastique et fournit une indication de l'intensité de la déformation plastique, mais est également un indicateur pour évaluer la zone plastique, en particulier la région sous le contact où les déformations plastiques se développent. La figure 3 représente les bandes de contour pour le TEPS dans trois orientations. L'échelle va de 0 à 3,5 pour chaque cliché. Le volume plastique est similaire dans toutes les situations, mais l'intensité maximale est plus forte pour la rayure à 0 degrés sur le PC anisotrope (pour lequel la limite d'élasticité est la plus faible). De plus, la distribution spatiale de cette même quantité est non symétrique dans les deux sens par rapport au plan sagittal pour la rayure à 45 degrés.

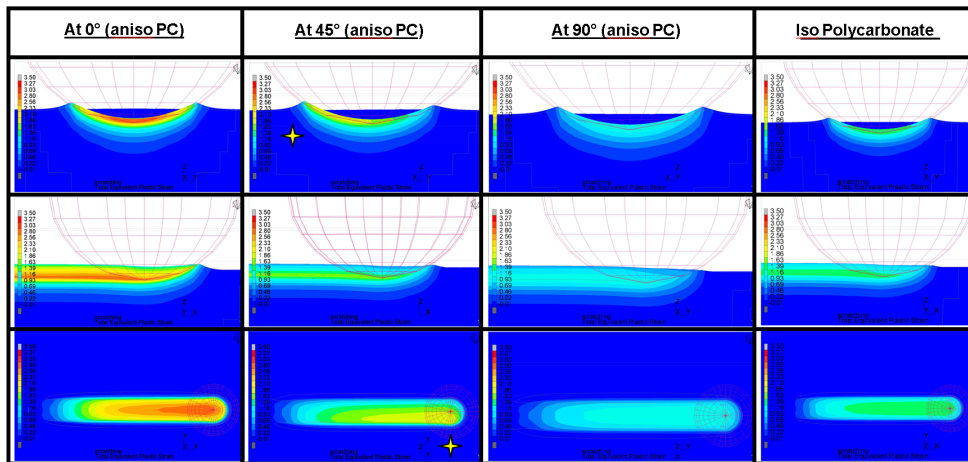


Figure 3 : déformation plastique équivalente totale transversale (en haut) longitudinale (au milieu) sur la surface horizontale (en bas), pour une rayure avec un a/R comparable aux observations in-situ présentes figure 2. Le critère de Hill anisotrope identifié permet de simuler le comportement observé in-situ.

CONCLUSION

Des échantillons massifs de PC orientés ont été préparés pour d'une part permettre d'extraire des cylindres de compression dans les différentes directions par rapport à celle de l'orientation structurale, et d'autre part réaliser des essais de rayure avec observations in-situ. La géométrie des sillons plastiques et des bourrelets plastiques autour de la pointe est fortement dépendante de l'orientation structurale du polymère et de la direction de rayure par rapport à cette orientation.

Des simulations numériques de l'essai de rayure ont été réalisées avec une rhéologie calibrée à partir des données expérimentales et la friction locale fixée à une valeur correspondant à celle mesurée lors du glissement au seuil de la rayure plastique. Les écoulements plastiques autour du pénétrateur (non présentés ici) et la cartographie de la déformation plastique équivalente totale (TEPS) sous le contact ont été analysés, pour les différents angles de rayure par rapport à la direction de pré-orientation, et confirment l'influence de l'anisotropie plastique sur la morphologie des bourrelets plastiques observés expérimentalement. L'influence du niveau de frottement local et le rapport de triaxialité contrainte/déformation et la sphéricité du tenseur de déformation plastique sous le contact seront étudiés dans un proche avenir.

Références

- [1] Nan Yi, *Influence of the molecular orientation of HDPE by mechanical drawing on the surface mechanical behaviors*, Doctorat de l'Université de Strasbourg, 9 juillet 2019
- [2] J. Pepin, A. Rubin, D. Favier, C. Gauthier, *Influence of macromolecular orientation and environmental conditions on contact creep of semi-crystalline polymers surfaces*, 11th International Conference on the Mechanics of Time Dependent Materials, MDTM 2018, sept 2018, Milan.
- [3] C. Gauthier, S. Lafaye, R. Schirrer, *Elastic recovery of a scratch in a polymeric surface: Experiments and analysis*, Tribology International, vol 34, 7, Pages 469 – 479 July 2001.
- [4] R. Hill, *A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals*, Proceedings of the Royal Society of London. 1948, A193, 281-297.



JIFT 2022

33^{èmes} Journées Internationales Francophones de Tribologie

1-3 juin 2022, Metz



SESSION 5

FREINAGE ET GARNITURES

INSTRUMENTATION MULTIMODALE D'UN ESSAI TRIBOLOGIQUE POUR IDENTIFICATION DES PARAMETRES D'INTERFACE - APPLICATION AU CRISSEMENT

Jean - François Brunel¹, Philippe Dufrénoy¹

1. Univ. Lille, CNRS, Centrale Lille, UMR 9013 - LaMcube - F-59000, Lille, France

MOTS CLES

Crissement, instrumentation multimodale, identification inverse

RESUME

Le crissement des freins est un problème important dans l'industrie automobile et ferroviaire avec des fréquences et une pression acoustique élevées (supérieures à 1 kHz et 100 dB). Cette nuisance est issue de vibrations auto-excités du système de freinage sous conditions de glissement. Le mécanisme de passage à l'instabilité, de type couplage de modes [1], est maintenant assez bien connu, ce qui permet d'identifier les fréquences de crissement. Une difficulté réside dans l'identification des paramètres clés conduisant aux occurrences de crissement, notamment les paramètres d'interface avec l'apparition d'un 3^{ème} corps à l'interface.

Un aspect complémentaire à considérer est que la situation tribologique doit être vue comme évolutive avec une aire de contact effective qui varie de façon permanente lors d'une sollicitation de freinage en lien avec les ouvertures et les fermetures de contact. Les analyses post-mortem montrent, comme cela a déjà pu être illustré, que les phénomènes agissent à différentes échelles (macroscopique [2], mésoscopique [3]). Généralement, la zone de contact ne peut être caractérisée qu'avant ou après la sollicitation et non pendant.

Il est proposé, dans ce travail, de suivre les évolutions de l'interface au cours de la sollicitation de frottement par le développement d'essais tribologiques associés à une instrumentation multimodale.

La démarche repose sur :

- La réalisation de séquences de frottement fortement instrumentées sur un dispositif de type pion-disque avec un comportement dynamique plus simple qu'un système de freinage et plus facilement exploitable, décrit sur la figure 1. Celui-ci est composé d'un pion fixé sur une lame déformable, elle-même fixée sur un bloc rigide mobile en translation. L'instrumentation multimodale (effort, déplacement, température) permet de caractériser la situation de frottement suivant les différentes physiques.

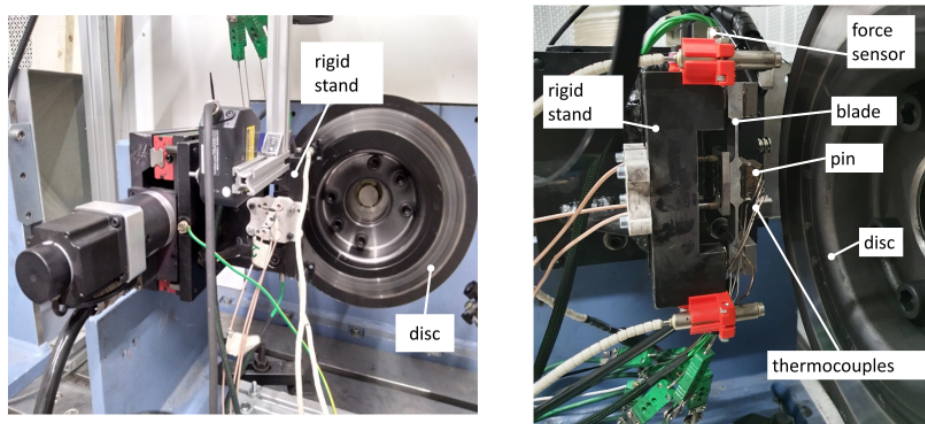


Figure 1 : dispositif expérimental et instrumentation

- L'identification de paramètres descripteurs de l'interface à partir d'approches inverses mécanique et thermique (inspirée de [4]) et des données multimodales.

A titre d'exemple, il est démontré qu'il est possible de suivre la position de la résultante des efforts de contact, la portance (vue comme l'aire effective de contact) et la résistance thermique de contact au cours de la sollicitation de frottement. L'originalité est ici de proposer une démarche pour le suivi en temps réel de l'interface notamment à partir des efforts mesurés et des flux thermiques dissipés, identifiées à partir d'un calcul inverse à partir de mesures thermiques distantes.

Ces paramètres pertinents identifiés seront introduits dans les modélisations (analyse en stabilité), à l'échelle macroscopique, pour valider leur influence sur le phénomène de crissement.

Références

- [1] Hoffmann, N., Fischer, M., Allgaier, R., Gaul, L. (2002). A minimal model for studying properties of the mode-coupling type instability in friction induced oscillations. *Mech. Res. Commun.* 29:197–205.
- [2] AbuBakar, A.R., Ouyang, H. (2008). Wear prediction of friction material and brake squeal using the finite element method. *Wear*, 264:1069-1076.
- [3] Lee, S., Jang, H. (2018). Effect of plateau distribution on friction instability of brake friction materials, *Wear* 400:1–9.
- [4] Quéméner, O., Battaglia, J.-L., Neveu, A. (2003). Résolution d'un problème inverse par utilisation d'un modèle réduit modal. Application au frottement d'un pion sur un disque en rotation, *Int. J. Therm. Sci.* 42 (4):361–378.

VERS UNE IDENTIFICATION DE DEBITS SOURCES FACTEURS D'EMISSION DE PARTICULES SOUS SOLLICITATION DE FREINAGE

Mathis BRIATTE¹, Alexandre MEGE - REVIL¹, Laurent COUSTENOBLE¹, Yannick DESPLANQUES¹, Coralie PARRENS²

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; coralie.parrens@aperam.com

MOTS CLES

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

INTRODUCTION

Dans l'automobile, le frein à disque est un système particulièrement propice à l'émission de particules, notamment par l'usure du disque de frein et la formation d'oxydes métalliques [1]. Parmi les facteurs d'usure, la tribo-oxydation, exacerbée par les températures élevées induites par le frottement, favorise l'émission de particules fines et ultrafines, particulièrement nocives pour l'organisme humain, capables de traverser les barrières naturelles et s'infiltrer dans les systèmes neurologique, cardiovasculaire, etc [2] [3].

DESCRIPTION DE L'EXPERIENCE

Afin d'étudier les mécanismes sources de ces particules fines et ultrafines, et notamment l'effet de l'oxydation, une étude comparative a été réalisée à l'aide d'un disque en acier inoxydable et un disque en fonte, la fonte étant le matériau habituellement utilisé dans l'automobile. Ces matériaux sont en effet discriminants, la quantité de particules émise par la fonte étant très importante. Le patin (la garniture) est constitué d'un matériau composite métallique fritté à matrice fer-cuivre. Un protocole expérimental spécifique a été mis en place sur un banc d'essai du laboratoire dédié aux essais de freinage afin d'atteindre des sollicitations de freinage représentatives de la circulation périurbaine modérée et dense. L'instrumentation permet de suivre l'évolution de la piste de frottement, dans les domaines visible et infrarouge. L'émission de particules est étudiée in operando grâce à une enceinte de prélèvement sous débit d'air contrôlé et de deux analyseurs (TSI - OPS 3330 et EEPS 3090) fournissant un taux de particules par taille dans la plage [6 nm; 10 µm]. Par ailleurs, un impacteur collecte les émissions pour des analyses post-mortem de composition chimique.

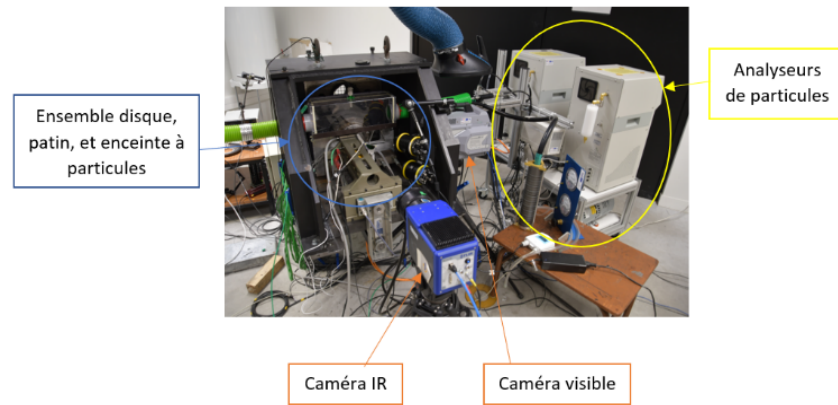


Figure 1 : Dispositif expérimental.

Le comportement thermomécanique et vibratoire est suivi grâce aux mesures cinématiques et sthéniques, et à la thermographie infrarouge de la piste de frottement. Les échantillons (patin et disque) sont analysés en microscopie électronique à balayage, par spectroscopie à dispersion d'énergie (EDS), en surface et en coupe (FIB).

RESULTATS

Les débits de troisième corps sont très importants dans le cas du disque en fonte. Les émissions se caractérisent par la prédominance de particules ultrafines. Le facteur de frottement, relativement stable d'un freinage à l'autre, évolue dans des plages de valeurs de 0,35 à 0,5. L'évolution thermique du disque se caractérise en surface par des bandes chaudes, et les températures mesurées sont en accord avec la simulation thermomécanique. A l'ouverture du contact, on trouve des surfaces majoritairement couvertes d'un troisième corps de métal oxydé, sous forme de lits de poudre ou de plateaux compactés. Les particules collectées par l'impacteur sont principalement des particules oxydées de fer et de cuivre, parmi lesquelles sont également présents des fragments de céramiques.

Concernant l'essai réalisé à l'aide du disque en acier inoxydable, l'évolution thermique se caractérise par l'apparition de « points chauds », qui traduisent une localisation circonférentielle du contact, conduisant à une élévation de la température de surface au-delà des températures estimées par la simulation numérique. Le frottement demeure stable quelque soit la nature des localisations thermiques. L'émission de particules présente deux modes, l'un dominé par les particules ultrafines en présence de bandes chaudes, de manière similaire au cas du disque en fonte, l'autre dominé par les particules fines consécutivement à l'apparition de points chauds. Les analyses chimiques des particules montrent dans une présence marquée des oxydes de chrome, en plus des oxydes de fer et de cuivre. Les particules émises demeurent néanmoins beaucoup moins nombreuses que dans le cas de la fonte.

CONCLUSION

L'émission particulaire apparaît dépendante des matériaux constitutifs des disques de frein et de la sollicitation thermomécanique locale qui en résulte, à corréliser aux mécanismes d'accommodation de la vitesse de glissement et au circuit tribologique associé. Les différents modes d'émission suggèrent une implication différente de la couche de troisième corps dans l'accommodation de vitesse, c'est-à-dire de ses débits internes. Un enjeu est d'appréhender le bilan matière et l'équilibre entre débits sources et débits d'usures, ainsi que la capacité du contact à maintenir le troisième corps.

Références

- [1] W. Österle et Al, *A comprehensive microscopic study of third body formation at the interface between a brake pad and brake disc during the final stage of a pin-on-disc test*, 2009.
- [2] T. Gonet et Al., *Source apportionment of magnetite particles in roadside airborne particulate matter*, 2021.
- [3] A.-L. Cristol et Y. Desplanques, *Frottement sous atmosphère contrôlée pour l'analyse de l'influence de l'oxydation dans un contact disque en fonte-composite à matrice organique*, 2011.

LES EFFETS THERMIQUES DANS LES GARNITURES MÉCANIQUES

N. Brunetière¹

1. Institut Pprime, CNRS, Université de Poitiers, Ensma, 86130 Chasseneuil du Poitou

MOTS CLES

Garnitures mécaniques, étanchéité, frottement, température, expérimental

INTRODUCTION

Les garnitures mécaniques sont des systèmes d'étanchéité pour arbres tournants. Elles sont constituées d'un rotor et d'un stator dont les faces sont maintenues en contact sous l'effet de la pression du fluide et de ressorts (figure 1). Cette zone de contact assure l'étanchéité mais il est nécessaire qu'un film lubrifiant puisse s'établir pour limiter le frottement et l'usure des surfaces. L'énergie dissipée dans l'interface conduit à un accroissement de température des surfaces qui est ensuite transféré au voisinage sous forme de chaleur. Les différents mécanismes de transfert sont illustrés sur la figure 1. La température près du contact est un bon indicateur du niveau de frottement dans l'interface et il est donc important qu'elle reste limitée. D'autre part, les gradients de température dans les solides conduisent à des déformations des surfaces en contact qui peuvent affecter les performances de l'étanchéité. L'évaluation des effets thermiques a fait l'objet de nombreux travaux aussi bien théoriques [1] qu'expérimentaux [2]. Cet article passe en revue les différents aspects liés aux effets thermiques dans les garnitures mécaniques, les différentes techniques expérimentales mises en œuvre dans la littérature et dresse un bilan des principaux résultats obtenus.

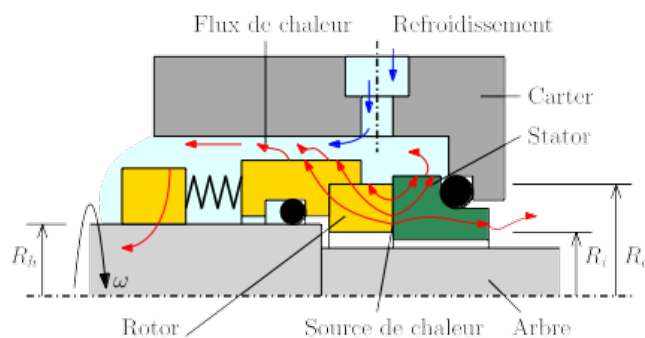


Figure 1: Transferts de chaleur dans une garniture mécanique.

Références

- [1] A. Nyemeck, N. Brunetière, B. Tournerie. (2015), *A Mixed Thermoelastohydrodynamic Lubrication Analysis of Mechanical Face Seals by a Multiscale Approach*, Tribology Transactions, **58**, pp. 836-848.
- [2] A. Lebeck, M. Nygren, S. Shirazi, R. Soulisa (1998), *Fluid Temperature and Film Coefficient Prediction and Measurement in Mechanical Face Seals - Experimental Results*, Tribology Transactions, **41**, pp. 411-422.

CARACTERISATION DES ÉMISSIONS DE PARTICULES DE FREINAGE SUR UN BANC PION - DISQUE

F. PHILIPPE¹, F. GUINGAND¹, P. CHARLES¹, M. MORGENEYER², Y - M. CHEN³, C. BRESSOT⁴

1. *STTELANTIS, Vélizy, France*

2. *Université Technologique de Compiègne (UTC), Compiègne, France*

3. *CETIM, Senlis, France*

4. *INERIS, Verneuil-en-Halatte, France*

MOTS CLES

Particules de freinage aérosol, tribologie, mécanismes d'émission, automobile, essais pion-disque

INTRODUCTION

Les particules d'usures de freinage, de route et de pneus seraient responsables d'environ 50% (PM10) de la pollution particulaire du trafic routier [1]. C'est pourquoi, La présente étude se concentre sur les particules générées lors du frottement entre le disque et les plaquettes de freins. La mesure des particules de freinage est un thème peu traité et comme il n'existe aucun consensus méthodologique sur leur caractérisation la comparaison des résultats est rendu difficile. Ainsi, un banc pion-disque du CETIM a été adapté par un système de confinement et de prélèvement des aérosols afin de pouvoir caractériser ces émissions de particules [2]. Ce moyen d'essais permet d'aborder deux disciplines en apparence assez éloignées l'une de l'autre : la tribologie et la physique des particules.

L'objectif de cette étude est donc de concevoir une méthode d'essai traiter de manière fiable les aspects de tribologie et de la physique des particules , représentative des conditions de conduite pour mesurer et caractériser des émissions de freinage. Cette méthode doit permettre de faire le lien entre une sollicitation pion/disque à l'émission qui lui fait suite et d'être répétable.

SYNTHESE DES RESULTATS

Les essais ont été réalisés sur le tribomètre à grande vitesse (TGV-Cetim) dans des conditions représentatives des conditions de freinage (pression 0.4 à 1.2 MPa, à 50, 90 et 130 km/h). Le pion (prélevé de la garniture) et le disque de frein proviennent d'un véhicule de série.

Les mesures de coefficient de frottement ont été réalisées sur le tribomètre en rotation continue pour simuler le contact de la plaquette sur le disque. Lors des essais, 10 sollicitations de 10 secondes chacune ont été réalisées, toutes espacées d'une minute de temps d'inter-frottement.

Le tribomètre pion-disque est placé dans une chambre de confinement où l'air renouvelé est constamment filtré par un système de filtre adapté Le débit d'air filtré est constant durant l'essai.

Les particules d'usure aérosol créées ont été caractérisées en nombre grâce à deux instruments de mesures :

- Un ELPI : mesure par mesure électrique sur la gamme de taille entre 7 nm et 10 µm et donnant accès à la distribution en taille des particules.
- Un CNC 3007 : mesure optique après grossissement des particules par condensation dans une gamme de taille de 10 nm à 1000 nm.

La figure 1 présente un exemple de l'évolution de coefficient de frottement avec celle de la concentration de particules aérosol. On note que le niveau de la concentration de particules aérosol est quasiment nul au début de l'essai grâce au système de filtration de la chambre. On observe que le coefficient de frottement reste constant à un niveau de 0.4 durant les 10 secondes de freinage pendant un cycle et les résultats des 10 cycles espacés de 60 secondes sont répétables. La concentration de particules augmente très fortement depuis le début du freinage jusqu'à un ordre de 2000 à 3000 /cm³ avant de descendre progressivement jusqu'au prochain un coup de freinage. Cette corrélation entre l'évolution du coefficient de frottement et celle de la concentration de particules aérosol montre la sensibilité de la méthode d'essai mise au point.

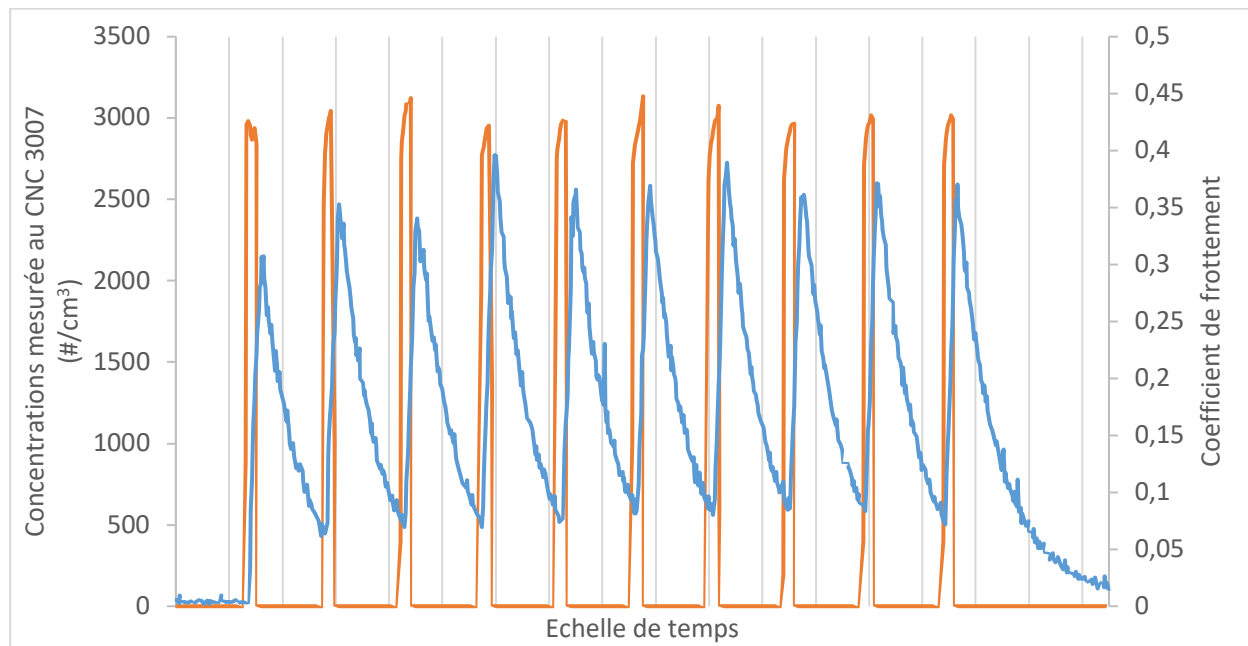


Figure 1 : Evolution de la concentration particulaire (bleue) lors de sollicitations (orange) au cours d'un essai à paramètres constants

Les résultats des essais montrent que le nombre de particules est d'autant plus important que la puissance dissipée à l'interface. Une corrélation a été trouvée entre le produit PV (Pression x Vitesse) et le nombre de particules émis. Cette corrélation dépend également de la surface de contact nominale.

Un tribo-film a été observé sur la piste de frottement après l'essai. Ce film composé essentiellement d'oxyde de fer couvre une surface de 20 à 60 % selon le produit PV. Ces analyses permettent de proposer des hypothèses sur les mécanismes de génération de particules aérosol par de l'abrasion à deux corps (sans oxyde) et à trois corps (avec oxyde).

Références

- [1] C. Guerreiro, F. de Leeuw, V. Foltescu, A. González Ortiz, J. Horálek, et European Environment Agency, Air quality in Europe: 2015 report. Luxembourg: Publications Office, 2015
- [2] F. Philippe, M. Morgeneyer, M. Xiang, M. Manokaran, B. Bertlot, YM. Chen, P. Charles, F. Guingand et C. Bressot, Representativeness of airborne brake wear emission for automotive industry : A review, Journal of Automobile Engineering, I-16, IMechE 2021. DOI: 10.1177/0954407021993011.



JIFT 2022

33^{èmes} Journées Internationales Francophones de Tribologie

1-3 juin 2022, Metz



SESSION 6

REVÊTEMENTS MATÉRIAUX

DEVELOPPEMENT DE REVETEMENT PVD POUR TRANSMISSIONS DE PUISSANCES

T. Maerten¹, M. Millot², A. Bonnin³ et F. Deloye⁴

1. Oerlikon Balzers France, 16, avenue James de Rothschild, 77164 Ferrieres en Brie, France
2. SAFRAN Tech, Rue des Jeunes Bois, 78117 Chateaufort, France
3. Airbus Helicopters SAS, Aéroport International Marseille-Provence, 13725 Marignane Cedex, France
4. IRT M2P, rue Augustin Fresnel, 57070 Metz - France

MOTS CLES

Fatigue de contact, Transmission de puissance, engrenage, revêtement, Balinit C®, WC-C, DLC

RESUME

Le projet TRANSFUGE (TRANSMission FUTURE GÉneration), piloté par l'IRT M2P, a pour objectif de développer des solutions matériaux et procédés innovants dans le domaine de la transmission de puissance et des roulements du futur pour les acteurs des filières aéronautique, automobile, énergie et naval. L'une des problématiques concerne l'amélioration de la résistance à la fatigue de contact des dentures. En effet, il s'agit de l'une des défaillances principales observées en service pour les systèmes de transmission de puissance des utilisateurs finaux du projet (SAFRAN, AH, Naval Group, NTN Europe). La réduction du couple transmis dans les organes de transmission de puissance est une autre problématique.

Une amélioration possible sur ces deux tableaux consiste en l'application d'un revêtement sur les zones soumises au contact (dentures, zones de roulement). Cette présentation donnera un aperçu de la méthode de développement de nouveaux revêtements PVD avec le partenaire Oerlikon Balzers.

LE PROJET

✦ TRANSFUGE : STRUCTURATION DU PROJET



Figure 1. Structuration du projet TRANSFUGE

Le projet TRANSFUGE a pour objectif de développer des matériaux et procédés novateurs pour les applications sur transmission de puissance. Il permettra de réaliser la montée en maturité de quelques technologies sélectionnées.

Il rassemble une trentaine de partenaires dont des donneurs d'ordres du monde automobile, aéronautique, naval, énergétique et des porteurs de technologies permettant de répondre aux problématiques proposées. Les objectifs sont portés par deux groupes de travail : automobile d'une part, aéronaval d'autre part.

Le GT automobile cherche à réduire le coût de fabrication générale des pignons à iso-performance en jouant sur le matériau, sa mise en forme et le traitement de durcissement.

Le GT aéronaval a pour premier objectif d'accroître la durée de vie des pièces de transmission, en particulier leur résistance à la fatigue de contact. C'est pour contribuer à ce dernier axe que l'application de revêtement est envisagée.

LES ENJEUX

L'un des axes permettant d'accroître la résistance à la fatigue de contact des organes de transmission de puissance consiste à appliquer un revêtement sur les surfaces. Nous nous intéressons en particulier aux dentures. Les revêtements cibles utilisent la technologie PVD. Les couches fonctionnelles envisagées sont de type carbures de tungstène ou DLC. Ce revêtement aurait deux rôles majeurs :

- Allongement de la durée de vie des surfaces
- Accroissement du rendement

L'étude bibliographique n'a pas permis d'identifier d'essai tribologique simple pour screener les solutions revêtement par rapport à leur performance sur un engrenage. Il est apparu que pour ces derniers, l'ensemble des études rapportées avaient été réalisées sur des couples de dentures, comme le travail réalisé par V. Moorthy et al. [1].

L'objectif de ce projet est d'évaluer le gain en durée de vie d'un pignon à denture droite revêtu ainsi que les mécanismes de dégradation du revêtement sous la sollicitation de contact.

TRAVAUX

Nature de la couche fonctionnelle	WC-C	DLC 1 (avec H)	DCL 2 (sans H)
Nom commercial	Balinit C	Balinit DLC	Baliq Carbos
Technologie de dépôt	PVD	PACVD	HIPIMS (PVD)

Tableau 1. Description des couches fonctionnelles étudiées.

Les revêtements sont déposés en utilisant les outils industriels d'Oerlikon Balzers. 3 couches fonctionnelles sont étudiées : le carbure de tungstène (WC-C), un DLC hydrogéné et un DLC non hydrogéné. Comme décrit dans le

Tableau 1, différentes technologies de dépôt sont utilisées. PVD est l'acronyme de Physical Vapour Deposition, qui signifie "revêtement physique en phase vapeur". C'est un procédé exécuté sous vide poussé à des températures situées entre 150 et 500°C, dans la plupart des cas. C'est la technologie utilisée pour déposer le WC-C. La PACVD est l'acronyme de Plasma-Assisted Chemical Vapour Deposition (revêtement chimique en phase vapeur assisté par plasma). Elle est utilisée pour déposer le DCL non hydrogéné. Enfin, le DLC non hydrogéné est déposé par HIPIMS (High Power Impulse Magnetron Sputtering – pulvérisation cathodique magnétron pulsé à haute puissance).

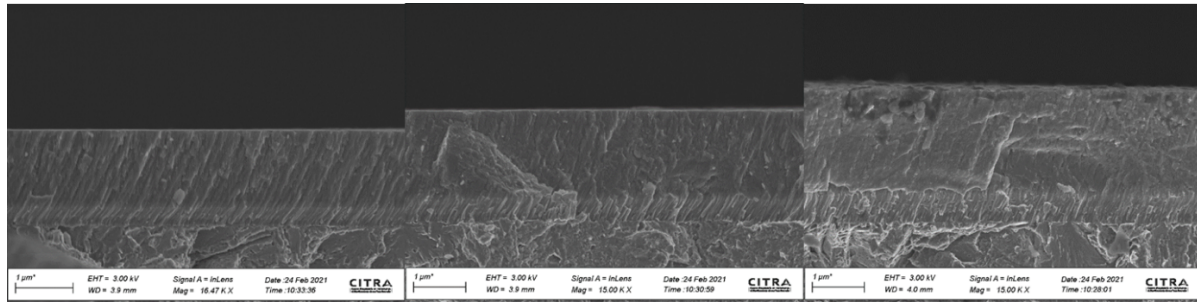


Figure 2. Images MEB en coupe du revêtement en pied de dent (à gauche), au primitif (au milieu) et en tête de dent (à droite).

Nous avons commencé notre étude en déposant sur des engrenages des revêtements présentant des variantes de couche fonctionnelle, mais également de sous couche, d'épaisseur et de module d'Young. L'analyse de l'épaisseur, de l'adhérence ou encore de la dureté ou du module d'Young le long d'une dent a été réalisée. Nous en présentons une synthèse. Un exemple de la variation d'épaisseur relevée en différentes zones de la denture est illustré Figure 2.

En parallèle de cette étude didactique, un dépôt de WC-C (Balinit C®) a été réalisé sur un couple d'engrenages et mis en essai sur un banc back to back (type FZG). L'adhérence du revêtement est démontrée. L'endommagement par usure dans certaines zones des pièces retrouvé, et ce rapidement dans les conditions d'essais étudiée, comme illustré par les photos de la Figure 3.

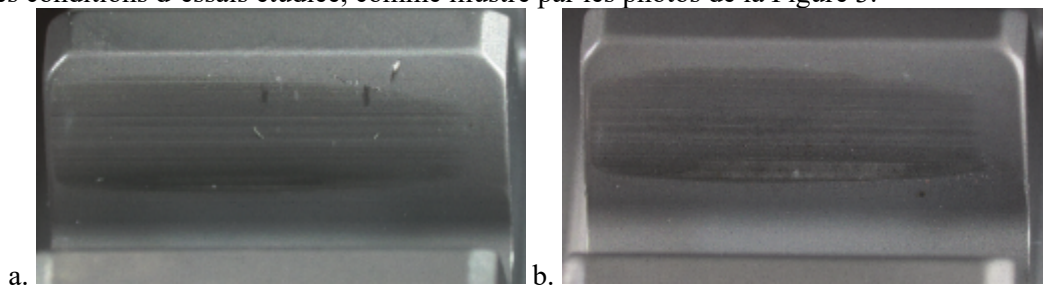


Figure 3. Photos d'une dent de la roue (a.) et du pignon (b.) après 5 minutes d'essais.

CONCLUSION

Le développement d'un revêtement pour organes de transmission passe par un procédé maîtrisé et adapté suivant la géométrie des pièces envisagées. Nous montrons ici la variabilité des propriétés du revêtement le long de la denture ainsi que les zones d'endommagement privilégiées lors d'un essai de fatigue de contact.

Références

[1] V. Moorthy, B. A. Shaw (2012), *Contact fatigue performance of helical gears with surface coatings*, Wear, 276-277, pp. 130–140.

ANALYTICAL STUDY OF FRICTION REDUCTION FOR DLC-INVOLVED CONTACT WITH COMMERCIAL FULLY FORMULATED OIL

Yue Guan¹, Jules Galipaud^{1,2}, F. Dubreuil¹, Fabrice Dassenoy¹, Maria Isabel De Barros Bouchet¹

1. University of Lyon, ECL, LTDS, CNRS UMR5513, Ecully France

2. University of Lyon, INSA-Lyon, UCBL, MATEIS UMR CNRS, Villeurbanne France

KEYWORDS

Diamond-like carbon (DLC), low-viscosity lubricants, lubrication additives

INTRODUCTION

Diamond-like-carbon coatings (DLC) have been widely researched to reduce friction and wear in motors. For example, by tuning the mechanical properties of coatings, tetrahedral amorphous (ta-C) DLC self-mated configuration can reach an ultralow coefficient of friction (CoF) regime ($0.01 < \text{CoF} < 0.03$) in presence of ZDDP and the wear volume is ignorable [1]. Amorphous hydrogenated (a-CH) DLC self-mated configuration can also have CoF around 0.02 with PAO 6, but CoF increases with the presence of additives, such as ZDDP [2]. Furthermore, the influences of hydrogen content and doping elements in a-CH DLC are also discussed [3]. The results show that the concentration of hydrogen and contents of doping elements do not have a great impact on friction but have a marked effect on tribofilm formation and antiwear properties [3]. However, in most of these works, the investigations are mainly based on the interaction between DLC and base oil + one/two additives. This does not meet the requirements of industrial application, in which the commercially available fully formulated engine oils are used.

In our project, a new type of low viscosity commercially available fully formulated/base oil are used for reciprocating sliding tests in DLC self-mated and DLC/steel mixed configuration. Two different DLC coatings, ta-C and a-CH were selected, and the effect of contact pressure on tribological performances (friction and wear volume) of the lubricants was investigated. Surface analyses (SEM, XPS, TEM, etc.) are performed after the friction tests on the rubbed surface in order to understand the different tribological behaviors and the interactions between DLC coatings and the lubricants.

MATERIALS AND METHODS

ta-C coatings with different hardness and a-CH with 20% H are deposited on the ball, cylinder for reciprocating sliding tests. The uncoated steel ball and cylinder are made of 100Cr6, and the uncoated disk is AISI M2. The selected lubricants are a new type of formulated oil and its corresponding base oil.

Ball-on-disk and cylinder-on-disk sliding tests were performed thanks to a homemade linear reciprocating tribometer. The tests were carried out using DLC (ta-C + a-CH) self-mated, DLC/steel mixed, and steel/steel (as reference) configurations. The pressure was tuned from 150MPa to 1GPa, and the maximum sliding velocity ranged from 15mm/s to 100mm/s. Each test was performed 3 times to check the repeatability. The initial lubrication regime for these two configurations is boundary.

XPS was used to characterize the selected commercially available engine oil, it is realized by the liquid-liquid extraction technique. The wear tracks were analyzed by optical microscope, interferometry, SEM, XPS, and TEM.

RESULTS

The steady-state value of CoF for steel/steel, a-CH/steel and a-CH/a-CH tribopairs are summarized in figure 1. Interestingly, the base oil alone can provide a lower CoF value than that of fully formulated oil in the case of a-CH/steel contact under both 0.5GPa and 1.0GPa. In the a-CH/a-CH configuration, the CoF of fully formulated oil decreased as the function of contact pressure, while the friction of base oil increased. As a result, formulated oil provided a relatively lower CoF than base oil under a high contact pressure of 1.0GPa. There is no significant variation of CoF in steel/steel configuration.

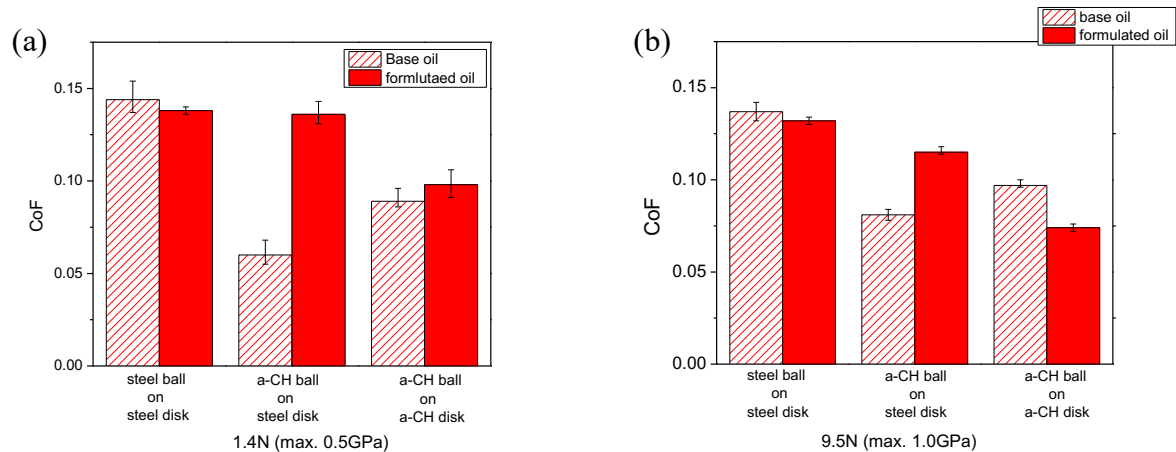


Figure 1: Steady-state CoF values of different ball-on-disk configurations lubricated with base oil and commercial fully-formulated oil under (a) 0.5GPa and (b) 1.0GPa.

CONCLUSION

In this work, the interactions between different DLC coatings and commercially available engine oil were investigated. Different sliding tests conditions were investigated to highlight the role of lubrication additives. We focused on the influence of the contact pressure on the tribological behavior of the different systems of interest. The friction results showed that the base oil provided lower friction than fully formulated oil in a-CH/steel configuration. In the a-CH/a-CH configuration, the formulated oil provided lower CoF than base oil under high pressure. Optical microscopy, SEM, XPS, AES, TEM, Raman, and other surface analysis techniques were used for a depth understanding of the interaction between DLC coatings and engine oil.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors gratefully appreciate the funding by the European Union within the Auvergne-Rhône-Alpes region FEDER project, PLATEFORME TRIBOLOGIE MOTEURS. The authors also sincerely thank their collaborator, IREIS-HEF Group, for providing all the DLC-coated samples.

Références

- [1] Valentin R. S. R., Takuya K. (2021), *Interplay of mechanics and chemistry governs wear of diamond-like carbon coatings interacting with ZDDP-additivated lubricants*, Nat. Commun., 12, 4550.
- [2] Sébastien E. Sigfried R (2008). *Reactions of zinc-free anti-wear additives in DLC/DLC and steel/steel contacts*, Tribol. International, 41, 1090–1096.
- [3] Balasubramaniam V., Jonathan H. G. (2013), *Influence of hydrogen and tungsten concentration on the tribological properties of DLC/DLC contacts with ZDDP*, Wear, 298-299, 109-119.

REVETEMENT PAR OXYDATION MICROARC — AVEC OU SANS FRIABLE ?

Karl Delbé¹ ; Louis Rodriguez^{1,2} ; Marion Balsarin² ; Philippe Combes² ; Jean Denape¹ ; Jean-Yves Paris¹.

1. Université de Toulouse, LGP-ENIT-INPT, F-65016 Tarbes, France.

2. Galvanoplastie industrielle toulousaine (GIT), 31 270 Cugnaux, France

MOTS CLÉS

Usure, aluminium, revêtement, oxydation microarc

INTRODUCTION

L'aluminium est un métalloïde léger, très utilisé sous la forme d'alliage en aéronautique. Il participe aux performances de la structure en réduisant le rapport poids/puissance des engins.

Pour l'employer dans des pièces en contact dynamique, où peuvent intervenir le frottement et l'usure, il est parfois nécessaire de modifier la microstructure de la surface au moyen d'un revêtement. Pour cela, plusieurs technologies sont disponibles, dont l'oxydation microarc. Avec ce procédé, l'alliage d'aluminium est placé dans un bain électrolytique en vis-à-vis se trouve une contre-électrode. L'ensemble est soumis à une différence de potentiel électrique. Des éclairs apparaissent à la surface de l'alliage qui se recouvre alors progressivement d'une couche d'oxyde [1-2].

La microstructure de cette couche n'est pas uniforme, puisqu'à proximité de l'aluminium la couche est très dense alors qu'un tiers de l'épaisseur proche de la surface est poreuse et friable [3-5].

Lors d'une première étude, nous avons examiné le comportement tribologie du revêtement en retirant au préalable la couche friable [6]. Nous avons construit un circuit tribologique en étudiant le contact entre un alliage d'aluminium revêtu par oxydation microarc et une bille en alumine. Nous avons voulu vérifier s'il était intéressant de conserver ou pas la partie friable d'un revêtement conçu par oxydation microarc sur des alliages d'aluminium. La reprise mécanique de la surface est coûteuse. L'éliminer permettrait un gain de productivité.

MÉTHODE EXPÉRIMENTALE

Les essais de frottement sont effectués sans lubrification sur un tribomètre commercial (TriboLab BRUKER), avec un mouvement de translation réciproque, une charge de 25 N. Les allers-retours oscillaient avec une fréquence de 25 Hz et une longueur de trace était de 10 mm. Les essais ont duré 1500 s.

En plus, d'enregistrer les coefficients de frottement, nous avons analysé les traces d'usure par des techniques de caractérisation microstructurales, élémentaires et chimique. L'usure des revêtements est évaluée un moyen de caractérisation topographique (profilomètre interférométrique à lumière blanche).

RÉSULTATS

Nos mesures montrent que la présence de la couche friable modifie bien le comportement tribologie du couple de frottement. Lorsque le matériau est brut, la couche friable augmente l'énergie dissipée avec un coefficient de frottement de $1,20 \pm 0,04$, soit près de 30 % plus élevé qu'avec un revêtement sans aucune couche friable ($0,90 \pm 0,03$). Le volume de la trace d'usure est cinq fois plus important, et la bille a un volume usé quatre fois plus élevé.

Dans le cas des revêtements érodés, nous constatons expérimentalement une diminution de l'énergie dissipée avec un coefficient de frottement de 1,1, sans atteindre les valeurs obtenues sans aucune partie friable. Le volume de la trace usée est aussi important : dans ce cas-là, le niveau de l'usure est toujours plus élevé que celui pour lequel la partie friable est complètement absente. La bille est également fortement endommagée.

CONCLUSION

Nos travaux confirment donc l'intérêt de retirer la partie friable du revêtement. Bien que cette étape soit coûteuse en production, elle se justifie par le fait de limiter l'usure et de réduire la dissipation d'énergie. Elle permet également de réduire la production de débris dans le couple de frottement.

Des travaux futurs pourraient s'intéresser à la minimisation du coût de production du revêtement par oxydation microarc en diminuant le ratio de couche friable, voire en la faisant disparaître dès l'étape de formation dans le bain électrolytique. Pour cela, l'étude des paramètres électriques ou de la formulation du bain pourrait être une piste à suivre.

Dans cette nouvelle étude, nous avons voulu vérifier l'effet sur le circuit tribologie du maintien de la couche friable à la surface du revêtement. Pour cela, une campagne d'essais tribologiques a été menée avec un revêtement brut, sur lequel la couche friable est laissée intacte, et avec un revêtement érodé, c'est-à-dire sur lequel la couche a été partiellement éliminée par la projection de billes de silice.

REMERCIEMENTS

Un soutien financier a été reçu de la part de la région Occitanie et de l'association académique/industrielle ANRT dans le cadre d'une thèse de l'Université de Toulouse (n° 2018/0988).

RÉFÉRENCES

- [1] Morgan, C. J., & Brine, F. E. (1969). The Effect of Chromium Plating on the Fatigue Strength of Aluminium Alloy L65. *Transactions of the IMF*, 47(1), 77-79.
- [2] Kwolek, P. (2017). Hard anodic coatings on aluminum alloys. *Advances in Manufacturing Science and Technology*, 41(3), 35-46.
- [3] Yerokhin, A. L., Snizhko, L. O., Gurevina, N. L., Leyland, A., Pilkington, A., & Matthews, A. (2003). Discharge characterization in plasma electrolytic oxidation of aluminium. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 36(17), 2110.
- [4] Moon, S., & Jeong, Y. (2009). Generation mechanism of microdischarges during plasma electrolytic oxidation of Al in aqueous solutions. *Corrosion Science*, 51(7), 1506-1512.
- [5] Yerokhin, A. L., Nie, X., Leyland, A., Matthews, A., & Doney, S. J. (1999). Plasma electrolysis for surface engineering. *Surface and coatings technology*, 122(2-3), 73-93.
- [6] L. Rodriguez, A. Vieu, M. Balsarin, P. Combes, J. Alexis, J. Esvan, S. Lesko; Denape, J.-Y. Paris and K. Delbé, Physico-chemical characterisation and tribological behaviour of micro-arc oxidation coating on aluminium alloy – Comparison with hard anodised oxidation, en cours de relecture.

CONTACT ROTOR / STATOR : LE MATERIAU ABRADABLE, UNE SOLUTION EFFICACE ET COMPLEXE.

L.Gicquel^{1,2}, J-F. Brunel², J. Vincent³, P. Dufrénoy², L. Faure³, S. Philippon³, J. Philippe¹

1. *Safran Aircraft Engines - F-77550 Moissy-Cramayel, France*
2. *Université de Lille, CNRS, Centrale Lille, UMR 9013 - LaMcube - F-59000, Lille, France*
3. *Université de Lorraine, CNRS, Arts & Métiers, UMR 7239 – LEM3 – F-57070, Metz, France*

MOTS CLES

Revêtement abrasable, contact rotor / stator, propriétés mécaniques, corrélation d'images

INTRODUCTION

L'industrie aéronautique a pour objectif de concevoir des turboréacteurs toujours plus performants, qui émettent moins de pollution sonore et moins de particules. Afin de répondre à cet objectif, il est indispensable de s'intéresser à la maîtrise du jeu entre le rotor et le stator. Une solution technologique couramment employée est de déposer un matériau dit abrasable par projection thermique sur les parois internes du carter. L'abrasabilité du matériau permet la fermeture du jeu entre le rotor et le carter tout en garantissant l'intégrité de ceux-ci en cas de contact entre eux. En effet, le matériau, par sa composition, résiste au flux de gaz présent dans le turboréacteur mais doit pouvoir s'user en cas de contact entre l'aube et celui-ci. Il joue donc le rôle de fusible en cas d'interaction rotor / stator. Le matériau abrasable est un matériau complexe composé en général d'une matrice métallique chargée d'additifs (hBN, Polyester) suivant l'étage dans lequel il sera appliqué. En effet, chaque étage du turboréacteur présente des conditions de sollicitations mécaniques et thermiques très différentes. Dans notre cas d'étude, on s'intéresse au matériau abrasable AlSi-Po utilisé dans le compresseur basse pression où la température de fonctionnement avoisine les 300°C et la vitesse tangentielle en bout d'aube est de l'ordre de 500m.s⁻¹.

La caractérisation mécanique de ce matériau est réalisée en vue d'établir un bilan énergétique d'une interaction lame en TA6V et tambour recouvert d'abrasable, sur un banc d'essai à échelle réduite.

CARACTERISATION DU MATERIAU ABRADABLE ALSI-PO EN COMPRESSION

Le matériau abrasable AlSi-Po est un matériau obtenu par projection thermique. Des particules solides sont envoyées dans un flux plasma qui fait fondre ces particules et les projette sur la surface cible. De ce fait, la composition du matériau varie énormément en fonction des paramètres de projections. Nous avons réalisé des essais en compression quasi-statique monotone sur des échantillons cylindriques de diamètre 10mm. Ces essais nous ont notamment permis de déterminer un module élastique ainsi qu'une limite élastique en compression de notre matériau abrasable AlSi-Po à température ambiante.

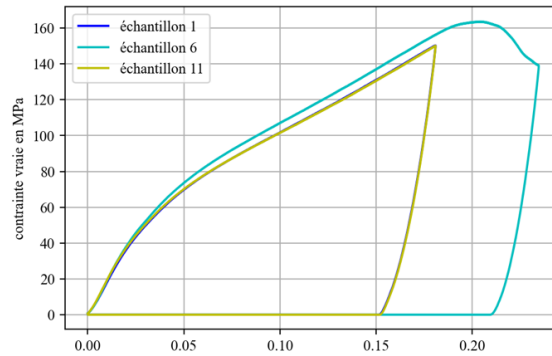


Figure 1 : Courbes résultats contrainte vraie / déformation vraie des essais de compression quasi-statique monotone.

On peut voir sur la figure 2, une répétabilité satisfaisante entre nos 3 essais, qui nous permettent de déterminer un module de compression pour le matériau abradable d'environ 2GPa et une limite élastique d'environ 12MPa.

CARACTERISATION DU MATERIAU ABRADABLE ALSI-PO EN COMPRESSION QUASI-STATIQUE CYCLIQUE

Des essais de compression quasi-statique cyclique ont été réalisés, en collaboration avec le LEM3, sur des échantillons parallélépipédique d'abradable projeté sur un support en aluminium.

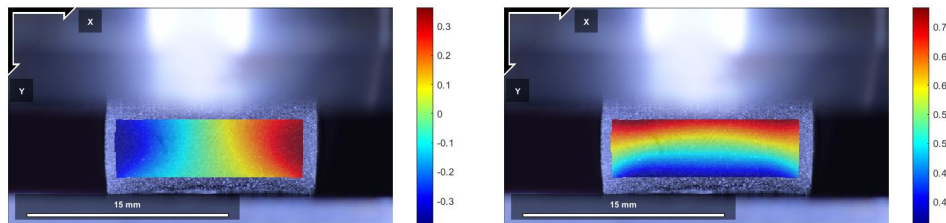


Figure 2 : Champs de déplacements horizontaux (à gauche) et verticaux (à droite) issus de la Corrélation d'Images Numériques d'un échantillon en compression.

Ces essais ont été instrumentés avec un appareil photo Nikon D7500 en vue de réaliser de la Corrélation d'Images Numériques (exemple de résultats illustré dans la figure 2) sur la face avant de l'échantillon d'abradable à posteriori en plus des données d'efforts et de déplacement issues de la traverse. Ces essais nous ont montré que le matériau subit ce qui semble être de l'endommagement après chaque cycle de chargement. De plus, une estimation d'un module et d'une limite élastique en compression ont pu être estimés.

CONCLUSION

Ces essais nous ont permis de mieux identifier, au moins en partie, et de comprendre le comportement du matériau abradable ALSi-Po sous une sollicitation de compression. Le matériau semble notamment sujet à de l'endommagement au cours du chargement. En effet, on observe une augmentation quasi-linéaire du module d'élasticité au cours des cycles.

Ces essais de caractérisation ont été nécessaires afin d'identifier des propriétés matériaux importantes de notre matériau abradable qui vont être réutilisés en vue d'établir un bilan d'énergie d'une interaction sur un banc à échelle réduite d'une lame en TA6V et d'un tambour recouvert d'abradable développé par [1] et complété par [2] et [3].

Références

[1] S. Baïz (2011), *Etude expérimentale du contact aube/abradable : contribution à la caractérisation mécanique des matériaux abradables et de leur interaction dynamique sur banc rotatif avec une aube*. PhD thesis, Ecole Centrale de Lille.

[2] R. Mandard (2015), *Dynamique de contact aube-revêtement abradable : identification expérimentale de la forece et des mécanismes d'interaction*. PhD thesis, Ecole Centrale de Lille.

[3] Q. Agrapart (2018), *Bilan d'énergie au contact et contribution de la thermomécanique sur la dynamique d'interaction aube – revêtement abradable d'un turboréacteur aéronautique*. PhD thesis, Université de Lille.



JIFT 2022

33^{èmes} Journées Internationales Francophones de Tribologie

1-3 juin 2022, Metz



SESSION 7

3^{ème} CORPS

LUBRIFICATION

TRIBOCORROSION DE FER EN PRESENCE DE TRYPTAMINE EN TANT QU'INHIBITEUR DE CORROSION

A. Bouchez¹, C. Bénier¹, Y. Bao¹ et S. Mischler¹

1. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne – Groupe de Tribologie et de Chimie d'Interface (TIC)

MOTS CLES

Tribocorrosion, Inhibiteur de corrosion ;

RÉSUMÉ

La tribocorrosion est définie comme la dégradation des matériaux causée par l'action combinée de la corrosion et de l'usure. Dans le cas des métaux passifs, les contraintes mécaniques peuvent retirer le film passif de la zone frottée. La surface métallique active désormais exposée à l'environnement corrosif, sa corrosion est exacerbée (corrosion accélérée par usure). Ce type de corrosion, en parallèle de l'usure mécanique, contribue significativement au gaspillage des matériaux en tribocorrosion.

Différentes zones peuvent être identifiées dans un système de tribocorrosion comme illustré sur la Figure 1. Des phénomènes de corrosion se produisent dans la zone I, qui n'est pas affectée mécaniquement, et qui, dans le cas des métaux passifs, est recouverte d'un film passif. Dans la zone de contact (II), des actions mécaniques ont lieu avec, entre autres, le détachement mécanique de particules qui produisent une activation chimique de la surface. Cette activation peut être liée à l'enlèvement du film passif ou de molécules adsorbées sur la surface. La zone ainsi activée mécaniquement (III), dépassivée pour les métaux passifs, quand exposée de nouveau à l'électrolyte, corrode donc plus rapidement (que la zone I) jusqu'à la reformation du film passif (repassivation), on parle donc de corrosion accélérée par l'usure. Ce cycle de dépassivation/repassivation est maintenu par le passage répété de la contrepièce sur la zone usée [1].

L'utilisation d'inhibiteurs de corrosion, qui s'adsorbent sur les zones dépassivées peut de ce fait être envisagée pour réduire les dommages de tribocorrosion.

L'effet d'un inhibiteur de corrosion, la Tryptamine (TAm) sur le comportement en tribocorrosion du fer dans une solution pH8 a été étudiée dans ce travail. Différents tests ont été réalisés en modifiant la vitesse de glissement (*via* la fréquence du mouvement) et le potentiel électrochimique dans une configuration bille-sur-plan (alumine sur fer). Le flux de courant pendant les tests a été enregistré et la perte totale de matière après les tests a été mesurée en profilométrie 3D pour évaluer la dégradation du fer. Ces essais ont révélé que la TAm influençait la dégradation mécanique du fer, mais qu'elle avait un effet limité sur la corrosion accélérée par l'usure.

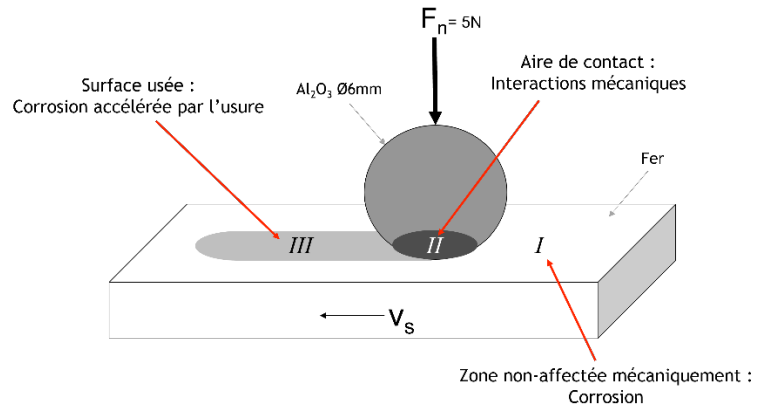


Figure 1 : Schéma d'un système de tribocorrosion avec les trois zones identifiées. Le système est immergé dans une solution d'électrolyte (adapté de [1]).

REFERENCES

- [1] A. Igual Munoz, N. Espallargas et S. Mischler, Tribocorrosion, Cham, Suisse: Springer International Publishing, 2020.

LUBRIFICATION ELECTROCHIMIQUE DES ACIERS INOXYDABLES DE TYPE 316L/316L DANS UNE SOLUTION D'HYDROGENOCARBONATE DE SODIUM

K. Bouguerra¹, C. Richard¹, Y - M. Chen² J. Delgado² P - F. Cardey³. A. Romaine³ et N. Ducommun³

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, Hydrogénocarbonate de sodium, Tribocorrosion.

INTRODUCTION

Les aciers inoxydables austénitiques sont utilisés dans une grande variété d'applications industrielles en raison de leurs bonnes propriétés mécaniques et de leurs capacités à former des films passifs protecteurs de quelques nanomètres d'épaisseur à leur surface, leur apportant ainsi une grande résistance à la corrosion. Cependant il est bien connu que ces films protecteurs peuvent être endommagés sous des actions combinées du frottement et de la corrosion par le milieu environnant.

R. K. Gupta et N. Birbilis ont décrit les diverses théories de différents modèles de la passivation, de la cinétique de croissance des films passifs et de la corrosion par piqûre des aciers inoxydables.[1]

S. Radice, et S. Mischler ont rapporté dans une étude portant sur le comportement de lubrification électrochimiques et mécaniques d'un disque en acier inoxydable sur une balle d'alumine que l'effet lubrifiant des nanoparticules Al_2O_3 en suspension était indépendant des conditions électrochimiques (potentiel appliqué) et mécaniques (force normale et fréquence d'oscillation). [2]

S. Mischler a détaillé par la suite les différentes techniques tribo-électrochimiques ainsi que les méthodes d'évaluation sur la tribo-corrosion décrites dans la littérature.[3]

Ce travail a pour objectif d'étudier le concept de lubrification électrochimique du film passif formé à l'interface d'un couple d'acier inoxydable austénitiques de type AISI 316L/316L qui peut être rencontré dans les systèmes de production en mouvement, et en particulier dans un milieu contenant de l'hydrogénocarbonate de sodium ($NaHCO_3$), communément ou commercialement appelé « bicarbonate de soude ».

PROCEDURE EXPERIMENTALE

Cette étude a été réalisée en utilisant dans un premier temps un tribomètre en mouvement alternatif (TE77), et dans un second temps un tribomètre en mouvement rotatif (UMT Bruker) (Figure 1), dans une solution de $NaHCO_3$ 5%, dans le but de comparer le coefficient de frottement (μ) entre deux surfaces en contact en fonction du temps, sous différentes conditions tribologiques.

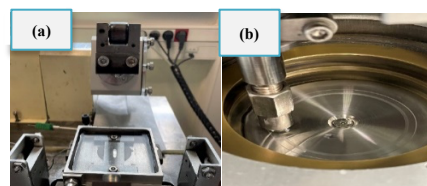


Figure 1 : Contact bille sur plan des aciers inoxydables de type 316L/316L
(a) en mouvement alternatif TE77 (b) en mouvement rotatif UMR Bruker.

Les films passifs formés après les essais tribologiques ont été étudiés par des techniques de caractérisations de surface macroscopiques et microscopiques telles que : la Microscopie Electronique à Balayage (MEB-EDX), la Microscopie à Force Atomique (AFM) en mode TUNA, la microscopie confocale, par Faisceau d'Ions Focalisés 'Dual-Beam' (FIB) pour des micro-sections et l'examen de sous-couches, la Spectroscopie de Photoélectrons induits par rayons X (XPS), la Diffraction des Rayons X (DRX), et la spectroscopie Raman afin d'identifier la tribo-chimie ou les composés lubrifiants qui provoquent la diminution du coefficient de frottement sous certaines conditions.

RESULTATS ET DISCUSSION

La figure 2 montre l'évolution du coefficient de frottement en fonction du temps en mouvement alternatif et rotatif durant des essais tribologiques d'un couple d'acier inoxydable plan/bille (316L/316L) dans la solution de NaHCO₃ 5%, il a été constaté le même effet de diminution du coefficient de frottement avec une répétabilité de ce dernier.

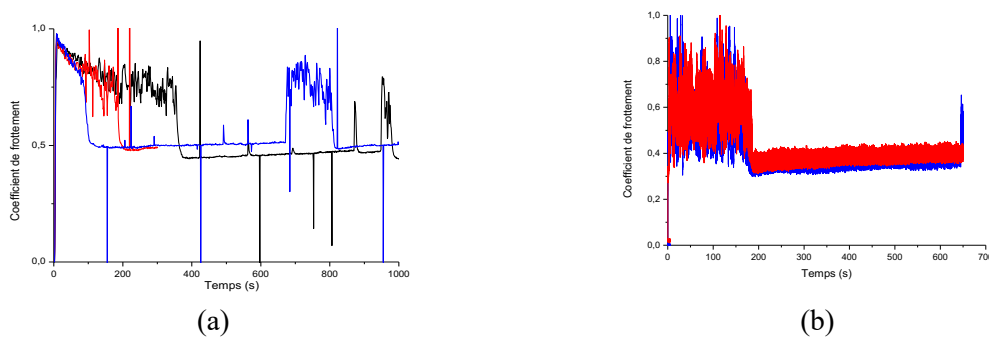


Figure 2 : Essais tribologiques (a) en mouvements alternatifs sur un tribomètre TE-77 (b) en mouvements rotatifs sur un tribomètre UMT-Bruker.

On remarque que le comportement des coefficients de frottement sont très similaires pour les deux mouvements.

Pour l'essai alternatif : on note que les deux essais sont plutôt répétables, et que la valeur du coefficient de frottement baisse de 1 à 0,5 en 200 secondes environ.

Pour l'essai rotatif : on note également une diminution du coefficient de frottement qui est aux alentours de 0,8 et qui passe (brusquement) à 0,3 au bout de 180 secondes

Une stabilisation est observée pour chacun des essais après la chute du coefficient de frottement.

Pour expliciter le phénomène, des caractérisations de surface ont été faites. Il a été notamment observé par FIB (figure 3) une couche enrichie en nickel et appauvrie en chrome, avec l'apparition des grains, et des joints de grain.

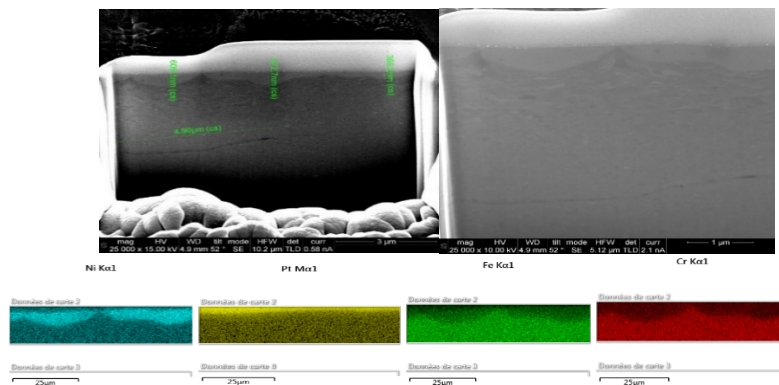


Figure 3 : Observation de la coupe transverse de la piste usée dans NaHCO₃

La figure 4 montre un profil 1D obtenu par AFM en mode TUNA sur la surface usée dans la solution NaHCO_3 5%, permettant de caractériser les courants ultra-faibles au travers du film passif. Des zones claires conductrices apparaissent et d'autres, sombres recouvertes d'hydrogénocarbonate de sodium qui ne conduisent pas le courant ont été mises en évidence.

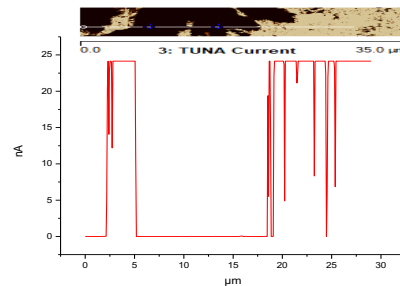


Figure 4 : TUNA - courant

CONCLUSION

En résumé, il a été constaté d'après les essais tribologiques, une diminution significative du coefficient de frottement avec la solution de NaHCO_3 5% dans des conditions spécifiques, à la fois sur un tribomètre alternatif et rotatif.

Les résultats de la caractérisation de surface démontrent que le film passif est composé d'oxydes/hydroxydes de chrome et d'oxydes/hydroxydes de fer. L'apparition d'une sous-couche riche en nickel, ainsi qu'une faible conductivité électrique ont été mis en évidence.

Remerciements

Nous tenons à remercier le Pr. Hamid Zaidi de l'Institut P' pour l'utilisation du tribomètre UMT Bruker ainsi que Damien Valente, et Micka Bah du CERTeM pour l'aide apportée pour l'ensemble des spectroscopies employées.

Références

- [1] R. K. Gupta and N. Birbilis, "The influence of nanocrystalline structure and processing route on corrosion of stainless steel: A review," *Corrosion Science*, vol. 92, pp. 1–15, Mar. 2015, doi: 10.1016/j.corsci.2014.11.041.
- [2] S. Radice and S. Mischler, "Effect of electrochemical and mechanical parameters on the lubrication behaviour of Al_2O_3 nanoparticles in aqueous suspensions," *Wear*, vol. 261, no. 9, pp. 1032–1041, Nov. 2006, doi: 10.1016/j.wear.2006.03.034.
- [3] S. Mischler, "Triboelectrochemical techniques and interpretation methods in tribocorrosion: A comparative evaluation," *Tribology International*, vol. 41, no. 7, pp. 573–583, Jul. 2008, doi: 10.1016/j.triboint.2007.11.003.

ÉTUDE DES PROPRIÉTÉS TRIBOLOGIQUES DES PARTICULES ISSUES DE LA PYROLYSE D'ALGUES SARGASSES

A.Molza¹, P. Bilas^{1,2}, T.Cesaire¹, P.Thomas¹ et Y.Bercion²

1. Groupe de Technologie des Surfaces et Interfaces (GTSI EA2432), Université des Antilles et de la Guyane, Pointe à Pitre, Guadeloupe (France)

2. Centre Commun de Caractérisation des Matériaux des Antilles et de la Guyane (C3MAG), Université des Antilles et de la Guyane, Pointe à Pitre, Guadeloupe (France)

MOTS CLES

Lubrification limite, Spectrométrie Raman, Algues Sargasses, Pyrolyse

INTRODUCTION

Les additifs réducteurs de frottement et d'usure conventionnels (dialkyl dithiophosphates de métaux de transition) qui présentent une efficacité remarquable dans le cas de pièces frottantes en alliage ferreux, deviennent peu efficaces dans le cas de matériaux peu réactifs [1,2]. De plus, les surfaces subissent une usure sévère durant la période de formation du film tribologique protecteur. Ainsi, les nouvelles stratégies de lubrification utilisent des particules colloïdales en dispersion dans la base. Ces nanoparticules sont susceptibles de constituer instantanément le film tribologique sans réaction chimique avec les substrats [3, 4]. Les phases tribo-actives choisies sont généralement des matériaux lamellaires (MoS₂, graphite,) présentant de bonnes propriétés tribologiques intrinsèques.

Les sargasses sont des algues brunes pélagiques qui évoluent en bancs allant jusqu'à plusieurs dizaines de mètres de largeur à la surface de la mer. On retrouve majoritairement deux espèces de sargasses qui composent les radeaux : la sargassum *fluitans* et la sargassum *natans*. Une fois sur les plages, les algues se décomposent et les gaz malodorants issus de ce phénomène (mélange gazeux composé d'environ 50% à 70 % de méthane (CH₄), de 20 % à 50 % de gaz carbonique (CO₂) et de quelques gaz dont l'hydrogène sulfuré (H₂S)) sont inconfortables pour la population, les activités balnéaires et ont un impact nocif sur les constructions avoisinant les plages sujettes aux échouements réguliers.

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'un projet de valorisation des algues sargasses dans le domaine de la lubrification limite.

EXPERIMENTATION ET RESULTATS

Les algues sargasses ont été pyrolysées à différentes températures (500°C, 900°C et 1500°C). Les spectres Raman obtenus sur les particules solides issues de la pyrolyse montrent une diminution de l'intensité relative des bandes D et D' à mesure que la température de pyrolyse augmente.

Les propriétés tribologiques de ces particules solides sont étudiées en absence et en présence d'un fluide de faible viscosité (dodécane) à l'aide d'un tribomètre alternatif à géométrie sphère/plan. La courbe d'évolution des coefficients de frottement en fonction des rapports I_D/I_G des particules issues de la pyrolyse a montré une variation linéaire entre le coefficient de frottement et la structure des particules. Des analyses morphologiques, topographiques et structurales des tribofilms obtenus sont effectuées par microscopie électronique à balayage, par profilométrie optique et par microspectrométrie Raman.

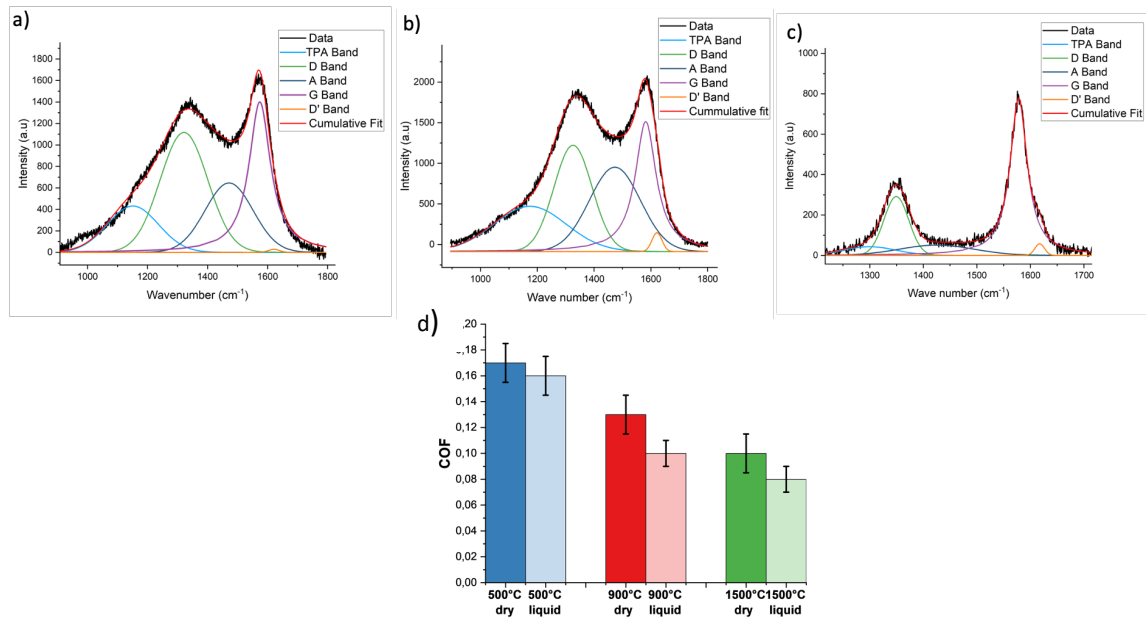


Figure 1: Spectres Raman obtenus sur les particules solides issues de la pyrolyse de sargasses (a) SargPyr 500°C, (b) SargPyr 900°C et (c) SargPyr 1500°C. d) Evolutions des coefficients de frottement pour des films formés à sec et en présence de liquide.

Références

- [1] J.M. Martin, J.L. Mansot, I. Berbezier, M. Belin, *Microstructural aspects of lubricated mild wear with zinc dithiophosphate*, *Wear*, 107, **1986**, 355-366.
- [2] H. Spikes, *The history and mechanisms of ZDDP*. *Tribol. Lett.*, 17, 3, **2004**, 469-489,
- [3] J.L. Mansot, M. Hallouis, J.M. Martin, *Colloidal antiwear additives. Part two: Tribological behaviour of colloidal additives in mild wear regime*, *Colloids and Surfaces A*, 75, **1993**, 25-31.
- [4] J.L. Mansot, J.M. Martin, Y. Bercion, L. Romana, *Nanolubrication*, *Brazil. J. of Phys.*, 39, 1, **2009**,

FORMATION DE TRIBOFILMS EN TRIBOMETRIE OSCILLANTE

J. Perret-Liaudet¹, A. Hriouech, M.-I. de Barros¹, M. Belin et P. Charles²

1. Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes, UMR CNRS 5513, École centrale de Lyon, 36 avenue G. de Collongue, 69134 Écully cedex.
2. PSA, Centre Technique de Vélizy, F-78140, Vélizy, France.

MOTS CLES

Loi de frottement, tribofilm, dissipation, technique expérimentale.

INTRODUCTION

Nous avons développé au LTDS un tribomètre original, dit tribomètre dynamique oscillant (ou tribomètre à relaxation oscillante) [1-3]. Il permet de quantifier le frottement en différentes contributions sans mesure directe de la force tangentielle. Ce dispositif permet d'accéder à certaines propriétés non linéaires de la force de friction qui, dans certains cas, n'est ni purement visqueuse ni purement indépendante de la vitesse. La technique de mesures est basée sur l'analyse de la réponse dynamique libre d'un oscillateur mécanique à un seul ddl (voir Fig. 1). La décroissance de l'enveloppe de la réponse et celle de l'énergie induite par la dissipation permet en effet de quantifier le frottement. Notons que plus l'amortissement est faible, plus le nombre d'oscillations est grand et plus l'estimation du coefficient de frottement est précise. Cette technique est donc bien adaptée au cas des faibles coefficients, et ainsi adaptée pour caractériser l'effet d'additifs modificateurs de frottement dans les lubrifiants permettant la formation de tribofilms. Dans ce contexte, l'objectif de cette étude est de proposer un nouveau protocole de mesures permettant la formation de tribofilms, tout en suivant l'évolution des caractéristiques du frottement. Nous revenons en premier lieu sur la technique de mesures proprement dite, puis nous décrivons le nouveau protocole.

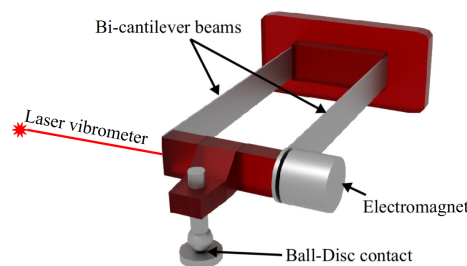


Figure 1: dispositif expérimental.

MESURE INDIRECTE DU COEFFICIENT DE FROTTEMENT

L'équation du mouvement de l'oscillateur s'écrit $\ddot{x} + \omega^2 x = -\sigma \mu(\dot{x})$ avec x réponse déplacement de l'oscillateur, ω sa pulsation propre, σ la force normale massique. Un type de réponse est fourni Fig. 2. Pour préserver le caractère dissipatif du frottement, on suppose que le coefficient de frottement dépend de la vitesse selon $\mu(\dot{x}) = (p_0 + p_2 \dot{x}^2 + \dots) \text{sgn}(\dot{x}) + (p_1 \dot{x} + p_3 \dot{x}^3 + \dots)$. La méthode de la moyenne (Krylov-Bogoliubov) permet d'identifier le coefficient de frottement et ses différentes contributions p_j . Ici Fig.2, pour $\mu(\dot{x})$, $p_0 = 0,0731$, $p_1 = -0,1314$, $p_2 = 0,1131$. On notera que la partie convexe de l'enveloppe correspond à un accroissement du coefficient de frottement avec la vitesse, au contraire de la partie concave.

FORMATION DU TRIBOFILM ET NOUVEAU PROTOCOLE

Une seule réponse libre oscillante est très courte et ne permet pas de former le tribofilm. Nous proposons donc dans un nouveau protocole de mesures d'effectuer un grand nombre de réponses libres sur la même trace de frottement. Nos résultats expérimentaux avec des huiles de base et des huiles additivées ont montré que le nombre de 1000 était suffisant, en cohérence avec des essais plus conventionnels (tribomètre linéaire). Des analyses XPS, ToF-SIMS et des observations MET confirment la présence du tribofilm et valident la technique proposée [4].

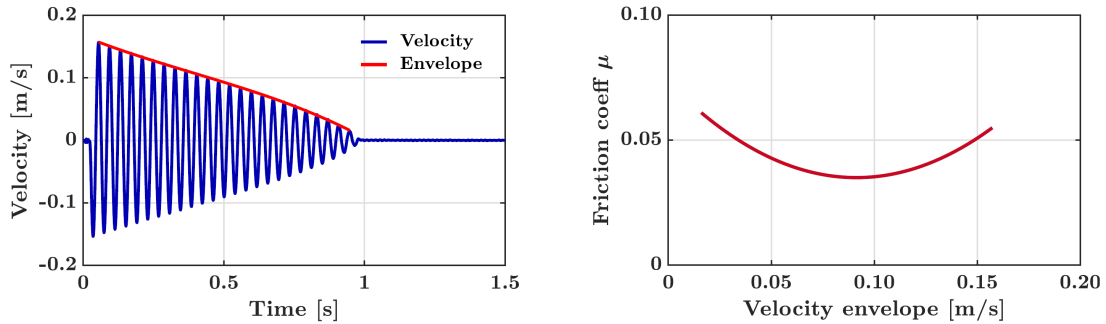


Figure 2: réponse vitesse, enveloppe, et coefficient de frottement associé fonction de l'enveloppe : contact bille plan, acier-acier, glycerol pur à 25 °C, effort normal 50mN.

RESULTATS ET CONCLUSION

L'intérêt de ce nouveau protocole est que l'on peut suivre l'évolution du coefficient de frottement et de ses différentes contributions au cours de la formation du tribofilm. A titre d'exemple, nous montrons Fig. 3 cette évolution dans le cas d'une huile formulée. La figure de gauche montre clairement le type de frottement (contributions indépendantes de la vitesse et visqueuse linéaire) et sa décroissance au cours des 100 premières réponses libres. La formation du tribofilm joue principalement sur la composante indépendante de la vitesse qui diminue d'environ 0,10 à 0,04. Ce résultat est confirmé si on analyse l'énergie dissipée par cycle relative à ses différentes contributions (voir figure de droite). Pour conclure, nous proposons un nouveau protocole expérimental sur la base d'un tribomètre oscillant dont nous avons démontré la capacité d'étudier la formation de tribofilms [4].

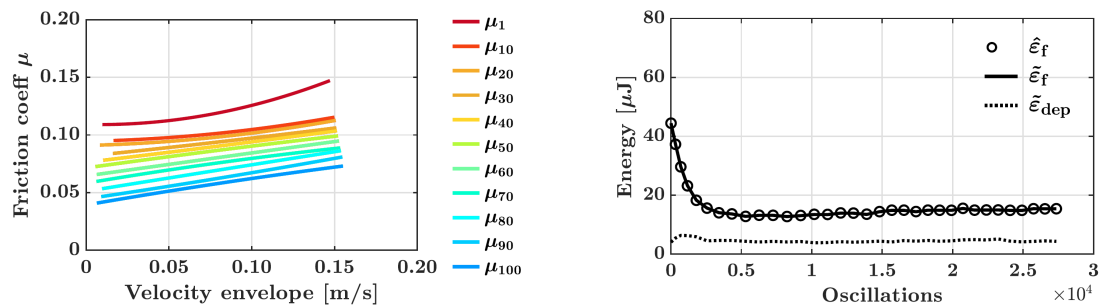


Figure 3: figure de gauche : coefficient de frottement au cours des 100 premières réponses libres ; figure de droite : énergie dissipée par cycle au cours des 25 000 premières oscillations, ϵ_f énergie totale, ϵ_{dep} contribution visqueuse, $(\epsilon_f - \epsilon_{dep})$ contribution indépendante de la vitesse.

Références

- [1] E. Rigaud, J. Perret-Liaudet, M. Belin, L. Joly-Pottuz and J.M. Martin (2010), *An original dynamic tribotest to discriminate friction and viscous damping*, Tribology International, **431** (2), pp. 320-329.
- [2] F. Majdoub, M. Belin, J.M. Martin, J. Perret-Liaudet, M. Kano, K. Yoshida (2013), *Exploring low of lubricated DLC coatings in no-wear conditions with a new relaxation tribometer*, Tribology International, **65**, pp 278-285.
- [3] F. Majdoub, J. Perret-Liaudet, M. Belin, J. Martin (2015), *Decaying law for the free oscillating response with a pseudo-polynomial friction law: Analysis of a superlow lubricated friction test*, Journal of Sound and Vibration **348** , pp. 263–281.
- [4] A. Hriouech (2021) *Études de surfaces texturées pour chemise moteur : Physico-chimie des tribofilms et lois de frottement associées* Thèse de doctorat, EC Lyon, 15 novembre, 179 pages.