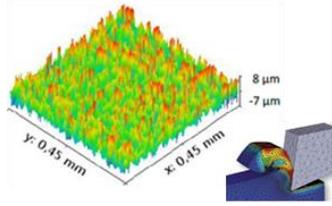
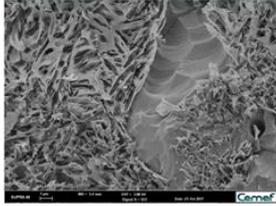
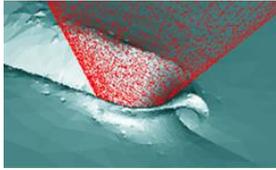
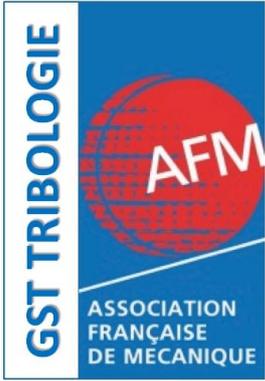


30<sup>èmes</sup> Journées Internationales Francophones de Tribologie



# *Recueil des résumés*

## *JIFT 2018*



Cemef





# EXPOSANTS

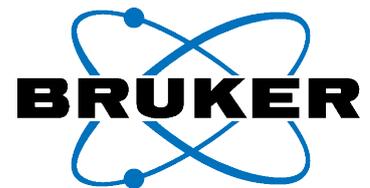
Alemnis AG, Thun, Suisse



Anton Paar



Bruker



Michalex





# Conférenciers invités

Mercredi 16/05/2018 à 14h00

**Dr. Patrick Deneuveille** expert Tribologie dans le groupe Mise en Forme à Constellium, Centre de Recherches de Voreppe.

Titre: **Utilité et limites de la tribologie en mise en forme de l'aluminium à chaud**

Jeudi 17/05/2018 à 9h00

**Dr. Laurent Langlois** maitre de conférence au Laboratoire de Conception Fabrication et Commande à (LCFC) de l'ENSAM, METZ.

Titre: **Etude des domaines de fonctionnement en FSSW (Friction Stir Spot Welding) et en fluovissage : mise en évidence de l'importance de l'échauffement par frottement**

Jeudi 17/05/2018 à 14h00

**Dr. Johann Michler** head of Laboratory for Mechanics of Materials and Nanostructures. Empa - Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology ·Switzerland · Thun, Bern

Titre: ***In-situ* observation of nanomechanical testing under extreme conditions: extreme temperatures, high strain rates, high cycle fatigue**



# Table des matières

<b>Mercredi 16 Mai</b>	<b>UTILITÉ ET LIMITES DE LA TRIBOLOGIE EN MISE EN FORME DE L'ALUMINIUM À CHAUD, Deneuille Patrick . . . . .</b>	<b>1</b>
	Etirage sur clou de tubes fin en acier inoxydable 316 LVM: détermination de la courbe de friction de Stribeck, Chobaut Nicolas [et al.] . . . . .	4
	Contrôle du Frottement par Lubrification Flexible, un atout majeur dans l'évolution du laminage à froid., Laugier Maxime . . . . .	6
	Une démarche expérimentale et numérique pour caractériser et augmenter la résistance à l'usure de pompes à pistons axiaux, Guillaume Schuhler [et al.] . . . . .	8
	AMELIORATION DE LA REPOSE TRIBOLOGIQUE D'UN CONTACT ELECTRIQUE NiCr-AgPd PAR UN TRAITEMENT DE TRIBOFINITION, Isard Manon [et al.] . . . . .	10
	ASPECTS MACROSCOPIQUES ET MICROSCOPIQUES DE LA TRANSITION ENTRE LES REGIMES DE LUBRIFICATION, Mazuyer Denis [et al.] . . . . .	12
	COMPORTEMENT AU FRETTEMENT DES DEPOTS DLC, CrN, ALLIAGE NICKEL ET VERNIS DE GLISSEMENT SELON ASTM G 204, Chen Yan-Ming . . . . .	14
	Lubrification EHD sous oscillations forcées, Yahiaoui Malik [et al.] . . . . .	16
	ETUDE DE L'INFLUENCE D'UN TRAITEMENT DUPLEX SUR LES PROPRIÉTÉS TRIBOLOGIQUES D'UN ACIER AISI 316 LM, Pavlik Anastasiia [et al.] . . . . .	18
	Tribochimie dans un contact lubrifié par dépôt sec MoS <sub>2</sub> /Ti : analyses par Spectrométrie de Masse d'Ion Secondaire en Temps de Vol, Colas Guillaume [et al.] . . . . .	20
<b>Session Posters</b>	<b>ANISOTROPIE ET CARACTERE FRACTAL DU FROTTEMENT POUR DES CONTACTS TRIBOLOGIQUES AA2024-T351/ UHMWPE, Pirva Elisabeta [et al.] . . . . .</b>	<b>22</b>

CARACTERISATION DE L'USURE ET DE L'ECHAUFFEMENT PAR FROTTEMENT DE MATERIAUX STRUCTURAUX AERONAUTIQUES, Devo Tovignon [et al.] . . . . .	24
Caractérisation tribologique de monocouches auto-assemblées grâce à un microtribomètre spécifique permettant d'appliquer de très faibles pressions de contact, Carpentier Luc [et al.] . . . . .	25
Effet de la texturation sur les propriétés tribologiques de l'acier inoxydable 904L, Meliani Hasnaa [et al.] . . . . .	27
Etude du champ de contraintes résiduelles induit par une indentation sphérique sur un monocristal de cuivre, Breumier Simon [et al.] . . . . .	29
ETUDE DU COMPORTEMENT THERMOMECHANIQUE D'UN CONTACT DYNAMIQUE PION-DISQUE, Bouchoucha Ali . . . . .	31
ETUDE DU COMPORTEMENT THERMOMECHANIQUE D'UN REVETEMENT ABRADABLE A BASE ALSI-PE SUR BARRES DE KOLSKY, Skiba Stéphane [et al.] . . . . .	32
ETUDE TRIBOLOGIQUE DE PEEK VIERGES ET DE PEEK RENFORCÉS AVEC DES FIBRES DE VERRE, Doumeng Marie [et al.] . . . . .	35
Fabrication, Observation and Tribological Characterization of Acrylic Composite Materials for Bone Biomodel for Surgical Drilling, Muramoto Yuta [et al.] . . . . .	37
Fonctionnalisation de surface de finition cosmétique par modifications texturales et morphologiques induites par nano-peening, Levy Benjamin [et al.] . . . . .	39
INFLUENCE D'UN TRAITEMENT DE SURFACE PAR VOIE CHIMIQUE SUR UN ALLIAGE DE TITANE TA6V, Perderiset Corentin . . . . .	40
La tribologie pour les connexions OCTG ; Analyse Thermique des Essais Falex et Couronne/Couronne, Marouf Nabil . . . . .	42
NOUVEAU TRIBOMETRE POUR FROTTEMENT A SEC SOUS HAUTE PRESION EN CONDITIONS QUASI-STATIQUES, Dureau Clément [et al.] . . . . .	44
TRANSITION VERS LE GLISSEMENT D'INTERFACES TEXTUREES, De Souza Mariana . . . . .	45
Tribocorrosion of Nickel in Citrate Buffer Solution Sliding against Alumina, Du Junxiao [et al.] . . . . .	47
VARIATION DE LA RUGOSITE ET SON EFFET SUR LE COMPORTEMENT TRIBOLOGIQUE, Bouhabila Hamoudi . . . . .	49

Wear of elastomeric automotive belts, Montalban Laura [et al.] . . . . . 51

**Jeudi 17 Mai** Apport d'une approche tribologique sur la maîtrise du procédé de soudage du bois par frottement, Cornuault Pierre-Henri [et al.] . . . . . 53

CARACTERISATION TRIBOLOGIQUE ET MICROSTRUCTURALE DU TITANE PUR FABRIQUE PAR MICRO-FUSION LASER: EFFET DU TRAITEMENT THERMIQUE IN-SITU, Coniglio Nicolas [et al.] . . . . . 55

Amélioration des propriétés tribologiques du PEEK par combinaison d'un revêtement de carbone amorphe et de la texturation de surface par laser, Dufils Johnny [et al.] . . . . . 56

INTERET D'UNE APPROCHE MULTI-ECHELLE DANS LA MISE EN ŒUVRE DES FILMS DLC DANS L'AUTOMOBILE, Gachon Yves . . . . . 58

Un nouvel instrument de caractérisation : le tribomètre béton, Fajfrowski Michel [et al.] . . . . . 60

FROTTEMENT DE TORONS ET DE FIBRES DE CARBONE : INFLUENCE DE L'ANGLE DE CONTACT, Tourlonias Michel [et al.] . . . . . 62

LE COMPORTEMENT EN FROTTEMENT DE FILMS DE MOLECULES AUTO-ASSEMBLEES D'ACIDE ALKYLPHOSPHONIQUE, REVELE PAR LA TECHNIQUE DE TRIBOMETRIE OSCILLANTE EN RELAXATION, Belin Michel . . . . . 64

Sur l'utilisation d'essais nanomécaniques pour analyser les évolutions de microstructure générées par des sollicitations de contact., Kermouche Guillaume . . . . . 66

EFFECT OF UNIAXIAL STRETCHING ON SCRATCH RESISTANCE OF POLYPROPYLENE TAPES, Pepin Julie [et al.] . . . . . 67

Effet de la texturation par laser femtoseconde de l'alliage de titane sur la raideur de contact et les forces exercées par les cellules, Zahouani Hassan . . . . . 69

INFLUENCE OF DIAMOND-LIKE CARBON COATINGS AND SERUM LIQUID ON FRETTING BEHAVIORS OF Ti-6Al-4V FOR NECK ADAPTER-FEMORAL STEM CONTACT, Ding Haohao [et al.] . . . . . 72

DÉVELOPPEMENT D'UN DOIGT ARTIFICIEL INSTRUMENTÉ POUR SURFACES TEXTILES, Peyre Kevin [et al.] . . . . . 74

INTERPRETATION TRIBOLOGIQUE DE LA PERCEPTION TACTILE DE SURFACES TEXTUREES, Weiland Benjamin [et al.] . . . . . 76

**Vendredi 18 Mai** TRIBOLOGIE DE FILMS LIMITES : INSATURATION ET FRICTION À L'ÉCHELLE MOLÉCULAIRE, Crespo Alexia [et al.] . . . . . 78

Compréhension des phénomènes thermomécaniques et du comportement des matériaux durant un contact haute vitesse, Thevenot Maël [et al.] . . . . .	80
Influence de la formation d'un troisième corps sur les affectations thermique et mécanique, Marquer Mathieu [et al.] . . . . .	82
Caractérisation de l'influence de la température sur la mesure des efforts et de l'usure pour un revêtement abrasable AlSi-PE d'un compresseur basse pression en condition de contact représentatif, Martinet Baptiste [et al.] . . . . .	84
MODIFICATIONS EN PROCHE SURFACE DE DEPOTS OBTENUS PAR FABRICATION ADDITIVE, Courbon Cédric [et al.] . . . . .	86
RÉDUCTION ANISOTROPE DES CONTACTS SOUS CISAILLEMENT DANS LES INTERFACES RUGUEUSES EN MATIÈRE MOLLE, Sahli Riad [et al.] . . . . .	88
APPROCHE DE LA SURFACE SOMME EQUIVALENTE TRIDIMENSIONNELLE ENTRE DEUX SURFACES RUGUEUSES CYLINDRIQUES EN CONTACT EXTERIEUR, Ben Attia Malak [et al.] . . . . .	90
Etude de dégradation en surface de chaussée par approche tribologique, Manyo Edem Yawo [et al.] . . . . .	92
Détermination d'un critère d'amorçage de fissures de fretting utilisant une description asymptotique du contact, Panico Pierre [et al.] . . . . .	94
Modélisation de l'endommagement en glissement partiel et total par méthode semi-analytique, Beyer Thibault [et al.] . . . . .	96
<b>Liste des auteurs</b>	<b>98</b>

## UTILITÉ ET LIMITES DE LA TRIBOLOGIE EN MISE EN FORME DE L'ALUMINIUM À CHAUD

**Patrick Deneuille**

*Constellium C-Tec, Voreppe, France*

### MOTS CLES

Aluminium ; laminage à chaud ; extrusion ; tribométrie.

La mise en forme par déformation plastique est spécifique à la fois suivant les matériaux déformés mais aussi selon le type de procédé concerné. Le frottement et donc la maîtrise de l'interface entre les outils de mise en forme et le matériau à déformer sont des facteurs clés de la réussite du process. Pour illustrer ce domaine particulier et pour montrer l'apport de la Tribologie nous présentons et discutons le cas de la mise en forme à chaud de l'aluminium. Deux procédés sont mis en parallèle dans cet exposé : le laminage et le filage. Le premier s'opère avec une lubrification, le second à sec.

Dans le cas du filage (ou extrusion) le métal, initialement sous forme de billette cylindrique, est réchauffé dans un four à la température désirée (au-dessus de 400°C en général). Puis il est poussé par un grain dans un conteneur et à travers une filière qui donne sa forme au profilé. Pour comparaison, on peut imaginer le dentifrice extrait d'un tube par pression. Dans l'interface métal/outil le point clé pour maîtriser le procédé et réussir le profilé, est le contact entre l'acier de la filière et l'aluminium chaud qui s'écoule au sens plastique du terme.

Deux facettes de la Tribologie sont alors impliquées. Premièrement le frottement et son niveau sur les différentes zones de l'outil doivent être réglés/contrôlés pour permettre d'extruder un profilé droit et sans défauts géométriques et de surface. Il y a aussi des conséquences sur les contraintes résiduelles générées dans le produit. Le deuxième point touche à l'usure des zones de l'outillage. Nous sommes dans un contexte de températures et de contraintes d'interface élevées, avec un fort glissement, et des particules abrasives provenant de l'alliage ou des oxydes. L'outil est donc susceptible de connaître une usure marquée et souvent localisée.

Le coefficient de frottement est élevé car le contact est sec et collant. L'usure « déséquilibre » la filière très vite. Notamment les portées des outils et donc les surfaces de contact sont fortement modifiées. Les efforts ne sont plus équitablement répartis. La machine peut bloquer. La qualité du profilé en est alors très vite affectée. Dans la configuration du filage deux « actionneurs » tribologiques sont donc importants : la géométrie de la filière pour régler et répartir le coefficient de frottement adéquatement et le contrôle de l'usure des outils. En particulier pour le choix des outils il existe une contrainte non technique mais qu'il faut prendre en compte, c'est le coût de l'acier, de l'usinage et des éventuels traitements de surface. Ce point est primordial dans le bilan économique du procédé.

Le cas du laminage à chaud représente une échelle différente à la fois en termes de cadences et de taille. L'aluminium voit son épaisseur réduite par le passage entre deux cylindres tournants et il est contraint de s'allonger. L'interface métal/outil est caractérisée cette fois par un espace non confiné (ou presque) où la surface à déformer est constamment renouvelée, l'outil revenant lui cycliquement en contact. Du fait du réchauffement initial de la plaque, ou des temps d'attente entre passes de laminage, la

surface de l'aluminium est oxydée ou ré oxydée. Dans le contact (entrefer de laminage) par contre comme l'élongation longitudinale est forte, le cylindre voit en permanence de la surface « fraîche » avec de l'aluminium natif, très réactif et très collant. Cet aluminium aura tendance à adhérer à l'acier du cylindre même si le temps de passage est faible (quelques millisecondes). Cela peut conduire au comblement de la rugosité initiale de rectification. De même l'oxyde abrasif et fragile est parcellisé et peut devenir un facteur d'usure important.

Le procédé est cette fois lubrifié, le plus souvent par une émulsion (mélange d'eau et d'huile). Le lubrifiant agit à deux niveaux : limite du coefficient de frottement et contrôle des contacts métal/métal pour réduire le collage d'aluminium sur le cylindre. Il a aussi un rôle important de refroidissement et de contrôle des températures, mais cela ne relève pas de la Tribologie proprement dite. Ce dernier point conduit à l'utilisation de grosses quantités de fluides avec des débits d'arrosage élevés, alors que la lubrification ne requiert pas de gros volumes.

La science tribologique doit donc, dans cette configuration, nous aider sur le niveau de frottement et le contrôle de « l'aluminium pick-up ». Contrôler le frottement veut dire le maintenir dans une fourchette de valeurs qui permet au procédé de bien fonctionner. Un niveau trop bas provoque des refus d'engagement et des « patinages ou déhanchements ». Un niveau trop élevé génère des efforts et des couples trop importants, on peut atteindre les limites des moteurs. Parallèlement si la couche d'aluminium collée au cylindre est trop importante plusieurs inconvénients apparaissent : frottement trop bas, décollement et re-transfert (back-transfer) de l'aluminium collé sur la surface des plaques avec apparition de taches et de défauts de surface.

Dans ce cas particulier de laminage de l'aluminium et contrairement au filage ou au laminage de l'acier, l'usure des cylindres n'est paradoxalement pas un paramètre critique. Nous éclaircirons ce point.

Pour ces deux différentes configurations de mise en forme à chaud de l'aluminium nous discutons de l'intérêt mais aussi des limites des essais et des outils classiques de laboratoire de la Tribologie. Différentes configurations existent qui tentent de se rapprocher de la réalité et qui sont largement utilisées. Les fournisseurs de lubrifiants ou d'outillages les utilisent largement pour promouvoir leurs produits. Pour le filage on peut penser être réaliste avec des essais simples. Dans le cas du laminage l'expérience nous a montré qu'il était nécessaire d'utiliser des laminoirs pilotes et de confirmer leurs résultats par des essais grandeur nature. Nous donnerons des exemples de cas concrets de traitement des problèmes et d'améliorations obtenues au moyen d'essais réels. En complément l'apport de la modélisation est utile pour décorréliser les influences et les phénomènes et décrire l'influence en retour de l'écoulement plastique sur le niveau de frottement. Par exemple la modélisation du frottement lubrifié a été très utilisée pour décrire les rôles et les interactions des différents protagonistes du contact.

## Étirage sur clou de tubes fin en acier inoxydable 316 LVM: détermination de la courbe de friction de Stribeck

N. Chobaut<sup>1</sup>, J.-M. Drezet<sup>2</sup>, S. Mischler<sup>2</sup>, V. Nguyen<sup>2</sup>, S. Dobler<sup>3</sup>, B. De Marco<sup>3</sup> et E. Rosset<sup>1</sup>

1. Haute Ecole Spécialisée de Suisse Occidentale, HES-SO//Genève-hepia, Institut des Sciences et Technologies Industrielles, 1202 Genève, Suisse
2. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Tribology and Interfacial Chemistry group, 1015 Lausanne, Suisse
3. Swiss-Tube LN Industries SA, 1424 Champagne, Suisse

### MOTS CLES

Déformation à froid, Stribeck, friction, 316 LVM, éléments finis

### RESUME

L'étirage sur clou a été étudié expérimentalement et numériquement afin de déterminer la courbe de friction de Stribeck [1] et d'optimiser la séquence des passes industrielles.

De manière analogue aux travaux de Bui *et al.* [1] puis Linardon *et al.* [2] qui ont déterminé la limite d'étirage sur mandrin conique de tubes en alliage d'aluminium et cobalt-chrome respectivement, un clou conique a été utilisé pour déterminer la limite d'étirage de tubes en acier inoxydable 316 LVM. Les étirages sur clou conique ont été réalisés sur un banc d'essais équipé de capteurs de force, position et température comme illustré sur la Figure 1.

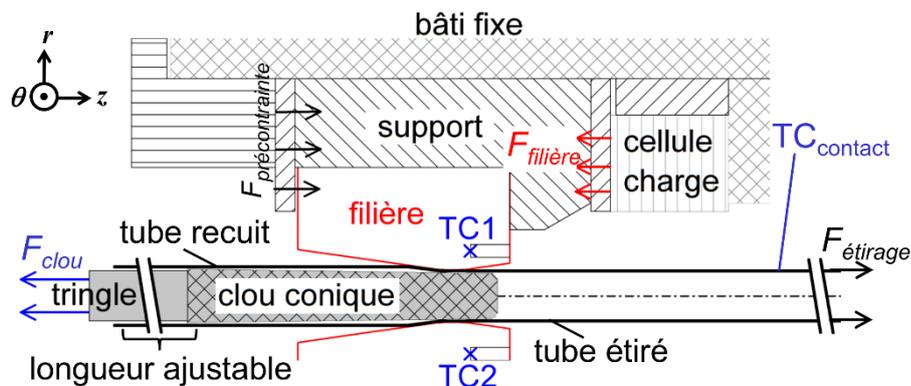


Figure 1 : Vue en coupe du schéma du montage de la filière et son support dans le bâti du banc d'essais. Seule une partie du montage est représentée pour des raisons de symétrie. La tringle fixée au bâti et le tube sont tronqués par soucis de clarté.

Les étirages sur clou (plug drawing) ont été interrompus pour enfoncer le clou dans la filière afin d'augmenter la sévérité de la passe comme illustré sur la Figure 2.

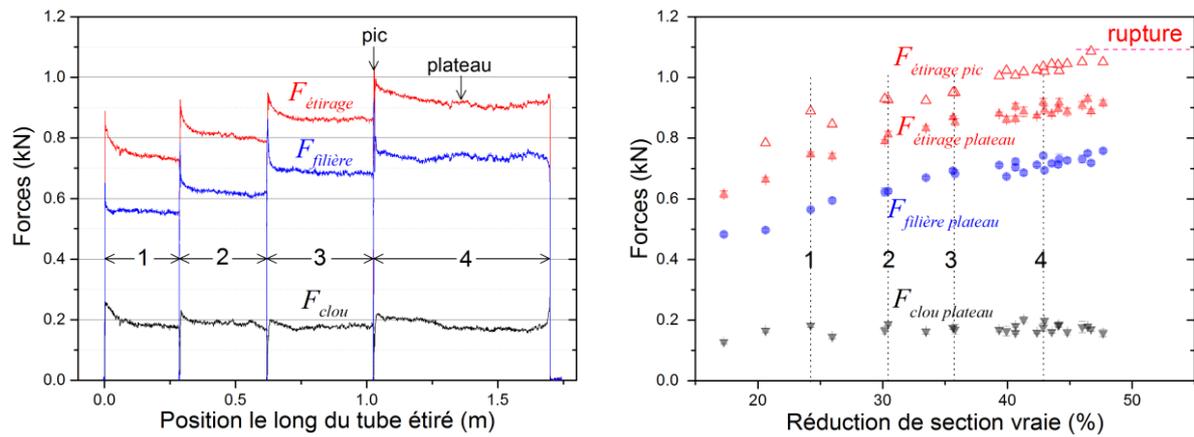


Figure 2 : Exemple de résultats obtenus lors d'un étirage interrompu 3 fois (4 positions différentes de clou) pour augmenter la sévérité de la passe.

En parallèle, un modèle aux éléments finis de l'étrirage sur clou a été construit. Les coefficients de frottement ont été ajustés pour chaque enfoncement de clou afin de reproduire numériquement les forces de plateau mesurées sur la filière et sur le clou. Ces coefficients ont été représentés en fonction du produit de la vitesse relative et de la viscosité du lubrifiant divisé par la force moyenne entre les deux corps pour obtenir la courbe de friction de Stribeck. Les résultats sont discutés à la lumière du modèle de Reynolds [4].

## Références

- [1] R. Stribeck (1902) *Die wesentlichen Eigenschaften der Gleit- und Rollenlager [The key qualities of sliding and roller bearings]*. Z. Vereines Seutscher Ing., **46**, pp. 1432-1437.
- [2] Q.H. Bui et al. (2011) *Investigation of the formability limit of aluminium tubes drawn with variable wall thickness*, Journal of Materials Processing Technology, **211** (3), pp. 402-414.
- [3] C. Linardon et al. (2014) *A conical mandrel tube drawing test designed to assess failure criteria*, Journal of Materials Processing Technology, **214** (2), pp. 347-357.
- [4] H. Czichos and D. Dowson (1978) *Tribology: A systems approach to the Science and Technology of friction, lubrication and wear*, New York : Elsevier.

## Contrôle du Frottement par Lubrification Flexible, un atout majeur dans l'évolution du laminage à froid.

M. Laugier<sup>1</sup>, M. Tornicelli<sup>1</sup>, S. Cao<sup>1</sup>, E. Dechassey<sup>2</sup>, R. Guillard<sup>3</sup>, F. Kop<sup>4</sup>

- 1: Arcelormittal Global R&D Maizières.  
 2: Arcelormittal Sagunto, Tandem 5 cages, tôles minces.  
 3: Arcelormittal Mardyck Tandem 5 cages, tôles minces.  
 4: Arcelormittal Ste Agathe, Tandem 4 cages, tôles minces.

### MOTS CLES

Laminage à froid, Contrôle du frottement, Lubrification Flexible, Produits minces à haute limite d'élasticité.

### INTRODUCTION

Le concept de Lubrification Flexible (FL) décrit globalement l'intérêt de contrôler le niveau de frottement en laminage à froid [1]. Si la performance des cylindres et les gains en énergie ont motivé les premiers déploiements industriels, aujourd'hui le carnet de production évolue vers des produits de plus en plus minces et durs. Cette tendance, induite par la course à l'allègement, est particulièrement forte pour les produits destinés au marché automobile. Alors que jusqu'à présent la marge avant saturation permettait d'absorber les importantes variations de frottement inhérentes aux lubrifications conventionnelles, cette évolution crée un véritable défi de maîtrise du niveau de frottement [3].

### I LE DEFI DES PRODUITS MINCES A HAUTE LIMITE D'ELASTICITE, AHSS.

La fig.1a présente les limites technologiques d'un tandem 5 cages quarto classique. Au-delà d'une force spécifique de 1700 t/m la programmation doit, soit restreindre la largeur, soit la réduction totale du produit à laminer. Lorsqu'une saturation en effort intervient en cours du laminage, la conséquence est la génération de longueurs laminées en hors tolérances. La fig1b présente les résultats de calculs dont l'objectif est de déterminer les variations de la force de laminage induites par une variation de frottement de 20% tel que  $\mu = 0.05 \rightarrow 0.04$ . Cette variation modérée est très fréquente en lubrification conventionnelle avec recirculation. En deçà de 1.5 mm, la sensibilité devient très significative et prends

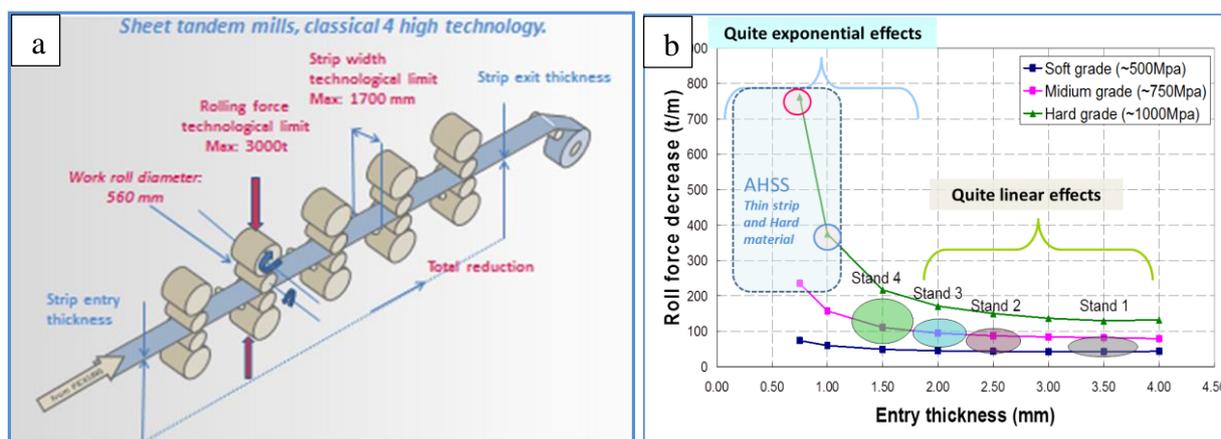


Figure 1: a) limites technologiques en capacité de serrage d'un tandem 5 cages, quarto; b) Calcul d'Impact d'une variation de frottement de 20% ( $\mu = 0.05 \rightarrow 0.04$ ) sur l'effort de laminage, red 25%.

ensuite une forme quasi exponentielle. Le cercle rouge du cas (0.75 mm & 1000Mpa) montre un cas assez extrême où : si le frottement s'établi à 0.05 au lieu d'être contrôlé à 0.04, quasiment 50% de la capacité de la cage sera indisponible à cause du niveau de frottement « trop élevé ». Ceci situe clairement le défi technique et les enjeux du contrôle du frottement. Le tableau ci-dessous illustre un cas d'un produit en très fine épaisseur : 0.38 mm sortie tandem, laminé en début de campagne à basse vitesse à Sagunto. Malgré une contrainte d'écoulement modérée (450Mpa) et une réduction de 16%

seulement [2], la cage 4 est proche de la saturation avec une force spécifique de 1599 t/m. L'activation de la **FL réduit la force de 518 t/m**, ce qui permet de récupérer 30% de capacité de serrage.

Paramètres process											Results: Efficiency FL		
Coil number	Width (mm)	Entry thickness (mm)	Entry thickness C4 (mm)	Exit thickness C4 (mm)	Grade	C4 Reduction (%)	C4 rolling speed (m/min)	Forward slip C4 (%)		Rolling force (t/m)		Force variation	
								Without FL	With FL	Without FL	With FL	t/m	%
272241 00	1253	2	0,455	0,380	4	16,5	372	12,5	6,9	1599,2	1081,0	518	32,4

## II AMELIORATION DES PERFORMANCES DE LA FL AUX BASSES VITESSES.

Le risque de saturation en cours de laminage est d'autant plus élevé dans les phases transitoires et en début de campagne (cylindres neufs). La fig. 2a illustre une variation typique du niveau de frottement d'une cage 4 entre la vitesse de transition et la vitesse stabilisée en corps de bande, le frottement varie pratiquement du simple au double.

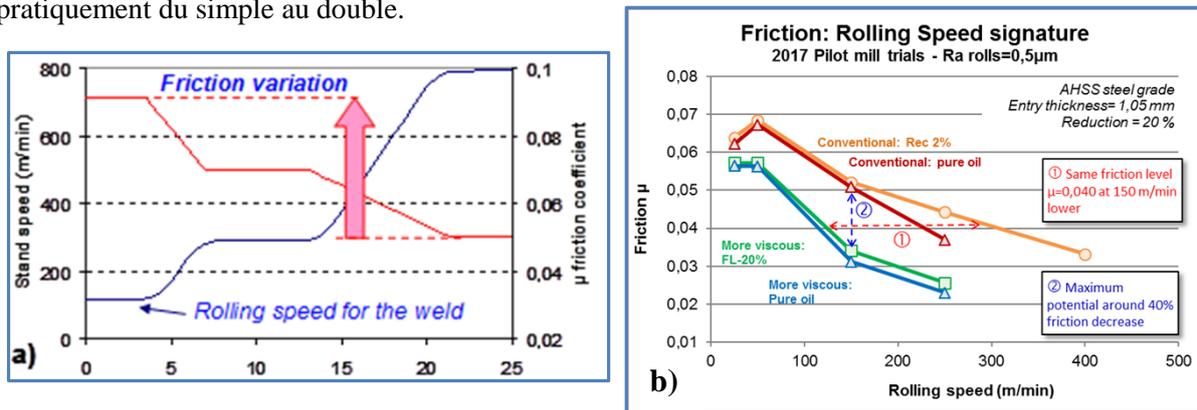


Figure 2 : a) illustration d'une variation de frottement dans un transitoire basse vitesse. b) performances de la FL aux basses vitesses avec un lubrifiant à plus haute viscosité.

La fig. 2b présente les résultats obtenus lors d'essais sur le laminoir pilote. Les lubrifiants à plus haute viscosité permettent de conserver un potentiel hydrodynamique à des vitesses plus basses de l'ordre de 150 m/min. Appliquée à forte concentration la **FL** donne des résultats proches de l'huile pure en condition surabondante, ce qui situe sa capacité d'alimentation de l'emprise dans ce domaine.

## CONCLUSION

La maîtrise du frottement est devenue une nécessité forte pour relever le défi de l'évolution des produits laminés de plus en plus minces et de plus en plus durs. Dans ce contexte la Lubrification Flexible est un atout majeur qui permet notamment d'utiliser des lubrifiants à plus fort potentiel hydrodynamique pour les basses vitesses sans limiter les performances aux plus hautes vitesses pour risque de patinage. Devenu un véritable actionneur du laminage qu'il faut gérer et prendre en compte dans la stratégie d'optimisation des schémas de laminage, la **FL** s'intègre progressivement dans les automatismes et met en perspective le pilotage d'un train tandem en niveau de frottement.

## Références:

- [1] M. Laugier, M. Tornicelli, C. Silvy-Leligois, D. Bouquegneau, D. Launet, J.A. Alvarez, « Flexible lubrication concept, the future of cold rolling lubrication », ICTMP 2010 Nice & Journal of Engineering Tribology, Part J, 2011.
- [2] M. Laugier, R. Boman, N. Legrand, JP. Ponthot, M. Tornicelli, JI. Bech, Y. Carretta, « Micro-Plasto-Hydrodynamic lubrication, a fundamental mechanism in cold rolling », 6th International Conference on Tribology in Manufacturing Processes – ICTMP 2014.
- [3] M. Laugier<sup>1</sup>, M. Tornicelli<sup>1</sup>, J. Cebey<sup>1</sup>, D. Lopez Peris<sup>2</sup>, A. Devolder<sup>3</sup>, R. Guillard<sup>4</sup>, F. Kop<sup>5</sup> « Flexible lubrication for controlling friction in cold rolling, crucial to be successful for the AHSS Challenge », METEC & 2nd ESTAD 15 –19 June 2015 Düsseldorf, Germany.

# UNE DEMARCHE EXPERIMENTALE ET NUMERIQUE POUR CARACTERISER ET AUGMENTER LA RESISTANCE A L'USURE DE POMPES A PISTONS AXIAUX

G. Schuhler<sup>1,2\*</sup>, A. Jourani<sup>1</sup>, H. Smaoui<sup>3,4</sup>, S. Bouvier<sup>1</sup>, J-M. Perrochat<sup>2</sup>

\* guillaume.schuhler@utc.fr

<sup>1</sup> Sorbonne Université, Université de technologie de Compiègne, FRE UTC-CNRS 2012 Roberval, Centre de recherche Royallieu - CS 60 319 - 60 203 Compiègne cedex, France –

<sup>2</sup> Interiors, Actuation & Propeller Systems, UTC AEROSPACE SYSTEMS, 43 Rue des Prés, 27950 Saint-Marcel – France

<sup>3</sup> CEREMA/DTecEMF, 134, Rue de Beauvais, CS 60039 - 60280 Margny-Lès-Compiègne, France

<sup>4</sup> Sorbonne Université, Université de Technologie de Compiègne, Laboratoire Roberval/LHN, FRE UTC-CNRS 2012, CS 60319- 60203 Compiègne, France

## MOTS CLES

Acier inoxydable, mécanisme d'usure, revêtement, carbures, pompes à pistons axiaux, lubrification limite

## INTRODUCTION

Les pompes à pistons axiaux permettent de convertir une puissance mécanique en une puissance hydraulique. Leur compacité et leur rendement d'environ 0,9 les rendent adaptées pour des applications d'actionnement, notamment en aéronautique. Cependant, l'usure de leurs composantes est responsable d'une baisse de performance et de durée de vie qui induit des activités de maintenance. Cette étude a pour but de caractériser les mécanismes d'usures dans des pompes issues d'hélicoptères et de proposer des solutions d'amélioration de leur résistance à l'usure en conséquence. Ce travail est centré sur les contacts entre patins et piste, pistons ou cage à rotule.

## ANALYSE DES MECANISMES D'USURE

Une analyse multi-technique combinant des observations MEB, analyses chimiques par EDX, et caractérisation de surface par profilomètre 3D est menée afin de mettre en évidence les mécanismes d'usures au sein des trois contacts. L'analyse au niveau du contact entre les patins et la piste révèle un régime de lubrification limite. Celui-ci est à l'origine d'une usure adhésive et de l'arrachement de carbures de la surface de la piste (figure 1). Ces carbures génèrent de l'usure dans ce contact et sont transportés par le fluide jusqu'aux contacts patin/piston et patins/cage où ils participeront à une usure abrasive à trois corps.

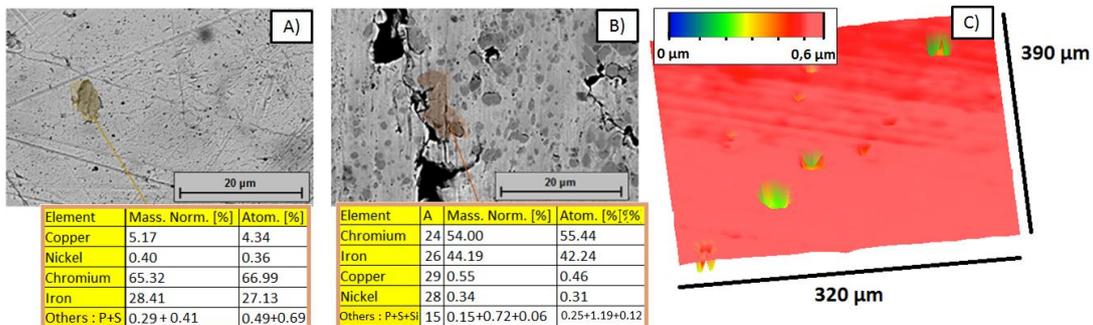


Figure 1 : Clichés MEB, analyses EDX, profilométrie 3D - A) carbure de chrome incrusté dans un patin en alliage de cuivre, B) carbures de chrome arrachés d'une piste en acier inoxydable, C) Surface d'une piste et trous au niveau des carbures arrachés

## TESTS D'USURE DE SOLUTIONS D'AMELIORATION DE LA RESISTANCE A L'USURE

Pour améliorer la résistance à l'usure de ces contacts, des revêtements et des traitements thermo-chimiques ont été appliqués sur l'acier de la piste (3S) ainsi qu'un autre acier dont les carbures sont plus petits et plus régulièrement répartis (S2). Les essais d'usure réalisés à l'aide d'un tribomètre rotatif ont été suivis d'une analyse multi-technique analogue à celle menée sur les pompes usées. Les revêtements de lubrifiant solide tels que le PTFE et le graphite permettent de réduire le coefficient de frottement sans toutefois améliorer la résistance à l'usure dans le cas de chargements extrêmes. La nitruration et la carbonitruration rendent les deux surfaces en contact plus résistantes à l'usure. Le revêtement (DLC+WC) offre, quant à lui, la meilleure résistance à l'usure observée.

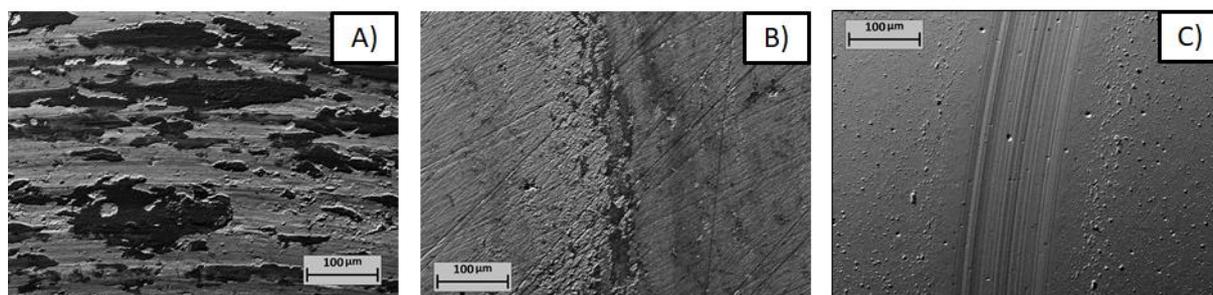


Figure 2 : Clichés MEB et analyse EDX des marques d'usure après un essai bille-disque sec- A) Disque en acier 3S sans autre traitement, B) Disque en acier 3S nitruré, C) Disque en S2 avec revêtement (DLC+WC)

## SIMULATION DES PERFORMANCES DU LUBRIFIANT

La lubrification limite est responsable de l'adhésion et de l'arrachement des carbures entre la piste et les patins. Pour en compléter la compréhension, les performances du lubrifiant dans un contact patin/piste sont étudiées par le biais de simulations. Un premier modèle développé sur Ansys Fluent étudie le domaine fluide entre les deux pièces. Le modèle tient compte de l'effet des conditions de fonctionnement et de la thermo-piézo-viscosité du fluide sur l'épaisseur de film. Les résultats montrent que le fluide s'échauffe dans des conditions normales de fonctionnement, ce qui diminue sa viscosité ainsi que l'épaisseur de film. Lors des démarrages et freinages de la pompe, pour une pression d'injection faible, l'épaisseur de film atteint des valeurs critiques. Pour étudier les phénomènes de lubrification mixte et limite se produisant pour ces épaisseurs, un second modèle est développé sous Fortran. Il combine un modèle élasto-plastique [1] et un modèle d'écoulement entre surfaces rugueuses basé sur l'équation de Reynolds modifiée [2]. Il permet le calcul des flux de chaleur locaux générés par le frottement entre aspérités, et donne accès aux champs de température, pression et viscosité dans le fluide.

### Références

- [1] A. Jourani (2014) « A new 3D Numerical model of rough contact: Influence of mode of surface deformation on real area of contact and pressure distribution », ASME Journal of Tribology, **137** (1), pp. 11401-1-11401-11.
- [2] N. Patir, H.S. Cheng (1978) « An Average Flow Model for Determining Effects of Three-Dimensional Roughness on Partial Hydrodynamic Lubrication », J. of Lubrication Tech, **100** (1), pp. 12-17.

# AMELIORATION DE LA REPONSE TRIBOLOGIQUE D'UN CONTACT ELECTRIQUE NiCr-AgPd PAR UN TRAITEMENT DE TRIBOFINITION

M. Isard<sup>1,2</sup>, J.M. Lanot<sup>2</sup>, I. Lahouij<sup>1</sup> et P. Montmitonnet<sup>1</sup>

1. MINES ParisTech, membre de PSL\* - CEMEF – CNRS UMR7635, Sophia Antipolis, France

2. Vishay SA, Nice, France

## MOTS CLES

Contact électrique, Graisse, Usure, Microbillage

## INTRODUCTION

Les rhéostats sont des composants électroniques qui comportent un élément résistif et un contacteur mobile, qui collecte une grandeur électrique analogique (tension, valeur ohmique...). Dans le cadre de cette étude, il s'agit d'une piste en alliage NiCr de géométrie périodique crénelée et d'un curseur en alliage AgPd. Pour assurer la fonctionnalité des rhéostats, un lubrifiant spécifique est déposé à l'interface curseur/élément résistif, afin d'en réduire le coefficient de frottement (CoF), diminuer l'usure et améliorer la qualité et la longévité du contact électrique.

Au cours de tests d'endurance, deux phénomènes impactant la performance ont été détectés : la dérive de la résistance électrique dans le temps et le bruit du signal électrique. Les premières analyses ont mis en évidence un lien entre l'usure du contact (piste et curseur)<sup>[1],[2]</sup> et la détérioration de la qualité du signal électrique. Dans ce contexte, l'objectif de cette présentation est de comprendre les mécanismes à l'origine de l'usure dans le contact et d'examiner des solutions d'amélioration des réponses tribologique et électrique du rhéostat.

## STRATEGIE EXPERIMENTALE

Les pièces sont soumises à un test d'endurance, à l'aide d'un programme d'actionnement (suite de cycles de mouvements contrôlés, adaptée au cahier des charges) qui permet de détecter les défaillances électriques liées au système tribologique et contribue à la compréhension des mécanismes d'usure.

Afin de comprendre en détail ces derniers, les surfaces de contact des pistes et curseurs ont été observées après frottement au Microscope Electronique à Balayage (MEB) et leur composition chimique analysée par spectrométrie de dispersion en énergie des rayons X (EDX).

L'influence du procédé de fabrication a été étudiée via un traitement final de « tribofinition » de la piste NiCr, qui réalise un polissage dans un tonneau en rotation rempli de billes de verre, d'eau déminéralisée et de particules d'alumine.

## RESULTATS

Les observations MEB ont montré une usure abrasive sous forme de stries dans la direction du mouvement relatif, dont la profondeur est significative par rapport à l'épaisseur de l'élément résistif (Fig1b). L'analyse EDX montre d'une part un transfert d'alliage d'argent sur la piste en NiCr, d'autre part un transfert de NiCr de la piste vers le curseur (Fig1c). Les zones de transfert (sombres) coïncident avec les stries de la piste, ce qui établit un lien de cause à effet entre transfert adhésif et usure abrasive.

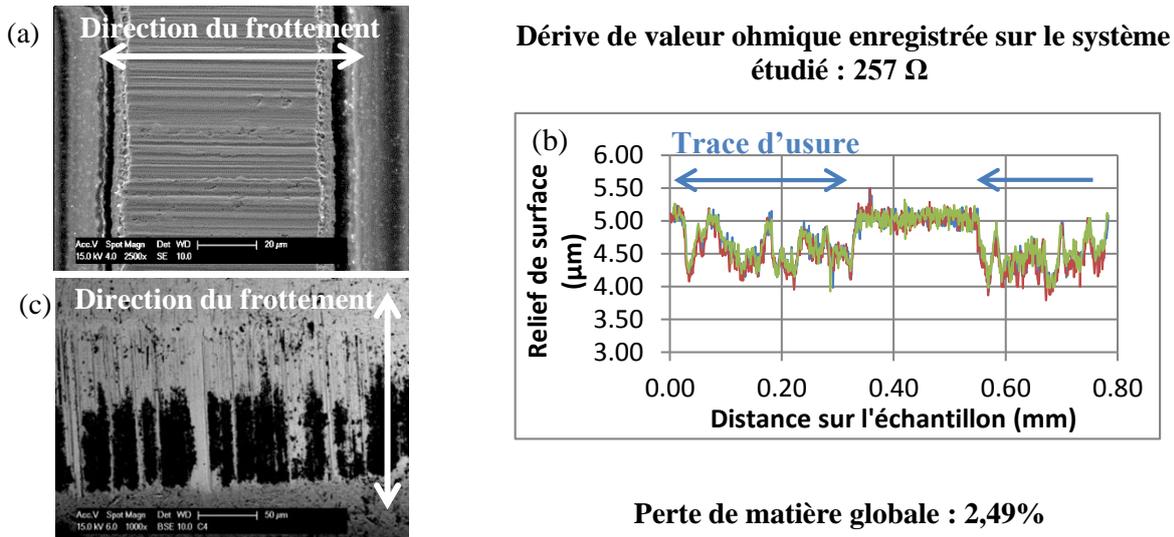


Figure 1 : Etat des surfaces frottantes. (a) Image MEB-SE du NiCr; (b) Profil typique du relief de la piste NiCr ; (c) Image MEB-BSE du curseur AgPd mettant en évidence un dépôt d'éléments plus légers (couleur noire), essentiellement Ni

Des analyses au MEB et EDX des surfaces tribofinies montrent qu'une partie de l'alumine reste adhérente aux surfaces de NiCr sous forme d'amas de taille comprise entre 1 et 5 $\mu\text{m}$ , ce qui a notamment pour effet d'augmenter la rugosité globale des surfaces des pistes de NiCr. La répartition des particules est d'égale densité sur la totalité des échantillons (Fig2).

Les premiers essais montrent une amélioration de la résistance à l'usure des pistes NiCr tribofinies ainsi qu'une nette amélioration de la qualité du signal électrique. Les mécanismes seront discutés dans la présentation.

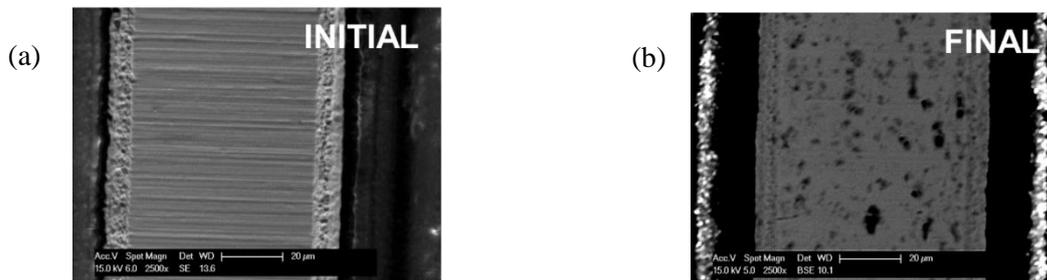


Figure 2 : Observations au MEB de la surface NiCr, (a) Image SE sans traitement microbillage (INITIAL); (b) Image BSE avec traitement microbillage (FINAL)

## CONCLUSION

L'impact d'un traitement de tribofinition sur la réponse tribologique et électrique d'un contact mobile (NiCr-AgPd) a été mis en évidence après comparaison avec des surfaces non traitées. Une nette amélioration de la tenue en service du contact a été constatée.

## Références

- [1] N. Saka, M. J. Liou, and N. P. Suh, "The role of tribology in electrical contact phenomena," *Wear*, vol. 100, pp. 77–105, 1984.
- [2] M. Antler, "Wear, friction and electrical noise phenomena in severe sliding systems," *ASLE Trans.*, vol. 5, no. 2, pp. 297–307, 1962.

# ASPECTS MACROSCOPIQUES ET MICROSCOPIQUES DE LA TRANSITION ENTRE LES REGIMES DE LUBRIFICATION

J. Bonaventure<sup>1</sup>, J. Cayer-Barrioz<sup>1</sup> et D. Mazuyer<sup>1</sup>

1. Ecole Centrale de Lyon, Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes, UMR CNRS 5513, 69134 Ecully Cedex, France

## MOTS CLES

Friction, rugosité de surfaces, courbe de Stribeck

## INTRODUCTION

Par analogie avec leurs capacités de mouillage, la réponse en frottement des surfaces dans contact lubrifié dépend fortement du couplage complexe entre leur rugosité et leur chimie. Dans ce cadre, l'optimisation de ces propriétés pour le contrôle du frottement, de la lubrification en film complet à la lubrification limite, doit tenir compte de trois principales caractéristiques :

- La rhéologie des lubrifiants est fortement non linéaire et dépend des effets de confinement produits dans et par le contact ;
- Un large éventail d'échelles de temps et de longueurs est couplé et doit être identifié ;
- Le rôle des interfaces moléculaires sur le comportement tribologique macroscopique du lubrifiant est généralement inconnu en raison du manque de mesures in-situ.

Dans cet exposé, nous illustrons les deux premiers points en analysant la réponse frictionnelle multi-échelle de contacts lubrifiés grâce à une approche basée sur l'analyse des courbes de Stribeck. Nous cherchons à comprendre l'effet de la rugosité sur le frottement en lubrification mixte (ML) et la lubrification élastohydrodynamique (EHL), notamment dans le cas de surfaces réalistes. Des expériences de roulement-glisement dans une huile de base piézo-visqueuse sont réalisées entre des aciers bruts obtenus avec différents procédés d'usinage, de polissage et de revêtement afin de représenter des conditions de surface réalistes typiquement rencontrées dans un moteur de voiture. Ces surfaces ont une texture complexe et multi-échelle nécessitant une description statistique. En utilisant le filtre le plus brut et le plus simple sur des mesures topographiques de surface de grande extension spatiale, nous corrélons l'écart-type le plus probable des surfaces à la friction pendant les expériences de Stribeck se produisant à la fois en ML et EHL sans usure mesurable. Afin de prédire les conditions conduisant à un frottement élevé en ML, nous proposons une définition du régime ML basée sur le frottement et décrivons le rôle joué par la pression et la rugosité sur le début de ML. Nous montrons ensuite que la transition vers le régime limite (BL), n'est plus uniquement gouvernée par la morphologie des surfaces mais dépend aussi de leur nature. Ce point sera illustré par les différences des comportements tribologiques observés entre des surfaces de DLC et d'acier de rugosité équivalente, sollicitées dans des conditions opératoires identiques.

## EXPERIENCES TRIBOLOGIQUES

Deux types d'expériences de frottement ont été réalisés: les tractions et les expériences de Stribeck. Dans une expérience Stribeck, la vitesse de glissement et la vitesse d'entraînement varient tout en restant proportionnelles entre elles. Le rapport des deux est appelé le ratio de glissement-roulement (SRR). En supposant que le fluide adhère aux corps en mouvement, la conservation du débit de lubrifiant impose que la distance entre les surfaces  $h$  augmente avec la vitesse de surface moyenne. Ainsi, à la fois la vitesse de glissement et l'épaisseur du film lubrifiant varient dans une expérience de Stribeck. La force de frottement est ensuite tracée en fonction du produit viscosité-vitesse d'entraînement. Dans une expérience de traction, la vitesse d'entraînement est maintenue

constante à une valeur permettant aux surfaces d'être entièrement séparées par une épaisseur de film de lubrifiant constante. La force de frottement est alors tracée en fonction de la vitesse de glissement.

## LA TRANSITION EHL/ML

Les mesures de la contrainte visqueuse du lubrifiant sous pression seront utilisées comme critère pour distinguer les régimes de frottement faible et élevé. La transition entre ML et EHL est alors définie par le produit viscosité x vitesse, appelé produit d'entraînement, en-dessous duquel la contrainte de cisaillement moyenne dépasse la contrainte visqueuse du lubrifiant mesurée à la même vitesse de cisaillement pendant une expérience de traction. Ainsi, la réponse en frottement de surfaces présentant différentes topographies peut être comparée. Les courbes résultantes montrent que la rugosité a peu d'influence sur les frottements EHD. A mesure que le produit d'entraînement diminue, ces courbes d'évolution de la contrainte interfaciale à la contrainte visqueuse divergent fortement de l'asymptote  $y = 1$  pour un produit d'entraînement donné caractéristique de la rugosité de surface. Ce nouveau critère est basé sur la valeur du frottement, ce qui le rend beaucoup plus sensible à un léger changement de rugosité que les autres critères traditionnellement utilisés dans la littérature pour définir la transition ML / EHL.

## LA TRANSITION ML/BL

Les surfaces utilisées sont des contacts acier-acier, acier-DLC et DLC-DLC, avec une rugosité allant du nanomètre au micromètre. Les contacts DLC-DLC présentent le niveau de frottement le plus bas avec pratiquement aucune influence de la rugosité de surface : leur dureté élevée évite une usure importante et le frottement limite provient du cisaillement d'une couche de fluide nanométrique. Les contacts impliquant de l'acier présentent des coefficients de frottement limites plus élevés dépendant de la rugosité. Pour les contacts rugueux, le frottement est contrôlé par la déformation plastique des aspérités. Pour les surfaces lisses, l'atténuation des aspérités empêche d'importantes augmentations locales de pression, mais les aspérités occupent une grande partie de la surface de contact. La zone disponible pour le lubrifiant dans les vallées est réduite et contrôle le niveau de frottement limite.

## CONCLUSION

Grâce à ce travail basée sur une analyse minutieuse de courbes de Stribeck, nous sommes donc en mesure de prédire la contribution visqueuse du lubrifiant à la friction globale et de caractériser sans ambiguïté le début de la lubrification mixte basée sur l'augmentation de la friction par rapport à la prédiction de la traînée visqueuse en EHL. Nous relierons de manière univoque le produit d'entraînement à partir duquel le frottement interfacial dépasse le frottement visqueux au mode de la rugosité RMS des surfaces extrait à partir de l'analyse d'images topographiques de plusieurs  $\text{cm}^2$ . Nous montrons que même à proximité de ML, il n'y a pas de couplage significatif entre la rugosité et la pression de contact moyenne, laissant inchangée la loi d'échelle liant les épaisseurs de films réels à la pression de contact. En lubrification limite, les contacts DLC-DLC a-C:H présentent les caractéristiques les plus intéressantes. Même lorsque le contact implique des aspérités pointues, la dureté élevée du matériau empêche l'apparition de la plasticité et la friction reste régie par la résistance au cisaillement visqueux du lubrifiant. Contrairement à la vision traditionnelle du fonctionnement d'un contact en lubrification limite, BL, souvent trouvée dans la littérature, la friction limite peut provenir du comportement rhéologique du lubrifiant en fonction de la pression et de la vitesse de cisaillement.

# COMPORTEMENT AU FRETTEMENT DES DEPOTS DLC, CrN, ALLIAGE NICKEL ET VERNIS DE GLISSEMENT SELON ASTM G 204

YM. Chen, K. Leclerc, D. Cazé, R. Jacques, C. Trévisiol

*Cetim, Laboratoire Tribologie, Pôle Matériaux Métalliques et Surface, Senlis, France*

## MOTS CLES

Fretting, ASTM G204, DLC, CrN, super-alliage base Nickel, vernis de glissement

## INTRODUCTION

Le fretting est un mode d'usure fréquent dans des composants mécaniques en déplacement à faible amplitude. Il peut entraîner des ruptures de câbles, des blocages d'actionneur, des destructions de roulement (effet faux Brinelling) et des déchaussements d'arbres cannelés et des défauts de contact électrique... Pour les pièces soumises à des contraintes cycliques, le fretting favorise l'initiation de fissure par fatigue (fretting fatigue). On observe la génération des particules fines souvent oxydées (fretting corrosion) autour de la zone de contact.

Afin de trouver des solutions pour réduire l'usure par fretting, de nombreuses études ont été réalisées notamment avec des technologies de lubrification de traitements de surface selon le cas d'application concerné. Comme l'usure par fretting est fortement influencée non seulement par l'amplitude, la fréquence et la trajectoire du mouvement, la pression et la géométrie de contact, mais également par le matériau, la rugosité des pièces en contact et l'environnement autour (graisse, humidité)... [1], il est donc difficile d'évaluer l'efficacité de chaque solution dans toutes les conditions susceptibles à avoir un risque de fretting.

L'essai selon la norme ASTM G204 a choisi un mode de contact simple (bille/plan) et des domaines de fréquence et d'amplitude représentatives des zones critiques des applications mécaniques. Les derniers résultats montrent que l'effet significatif d'une variation de 10% de dureté de l'acier sur les résultats des essais, ce qui démontre une très la bonne sensibilité de cet essai [2].

Afin de proposer un moyen représentatif des applications mécaniques pour les fournisseurs de matériaux et de traitements de surface, le Cetim a mené une étude exploratoire. L'objectif de cette étude est de réaliser des essais selon la norme ASTM G-204 avec une référence type 100Cr6/100Cr6 et des solutions courantes comme les dépôts DLC, CrN, un superalliage à base nickel et un vernis de glissement.

## SYNTHESE DES ESSAIS REALISES

Les essais ont été réalisés sur le tribomètre Plint TE-77 pion/ plan en mouvement alternatif. Le mouvement est généré par un système à came pour garantir la constance de l'amplitude en fonction du frottement (par rapport au système électromagnétique). La charge est appliquée par un système mécanique ressort et bras-levier, ce qui évite également des variations à cause des perturbations électromagnétiques. La force de frottement est mesurée par un capteur piézo-électrique et l'usure par un capteur à laser.

Les essais ont été faits en mode de contact bille/plan avec une charge de 25N, une amplitude de 50  $\mu\text{m}$  et une fréquence de 13 Hz, et une durée de 21h20 ( $10^6$  cycles) conformément à la norme ASTM

G204-10[3]. L'évolution de coefficient de frottement, l'usure linéaire et la résistance électrique du contact sont enregistrés au cours de l'essai. Deux essais ont été faits dans les mêmes conditions pour vérifier la répétabilité.

Cinq couples de matériaux ont été testés dans cette étude avec la bille toujours en 100Cr6 et la plaque en 100Cr6, 100Cr6 + CrN, 100Cr6 + DLC, 100Cr6 + vernis de glissement, et en alliage à base nickel. On note que le niveau de coefficient de frottement avec le dépôt DLC (0.15) est bien inférieur à celui des autres couples (ordre de 0.5 à 0.6). Mais le volume usé de la plaque revêtue de CrN est nettement plus faible (10 fois moins que celle des plaques non revêtues) que celui des autres matériaux testés (figures 1 et 2).

Afin de suivre la vie du troisième corps à l'interface, la conductivité électrique du contact a été mesurée à l'aide d'un système qui applique une tension constante de 50 mV entre le pion et la plaque. On note des variations importantes de cette tension pour certain couple au cours de l'essai, qui pourrait correspondre à la quantité et à la nature de débris générés à l'interface. On note que la conductivité du contact est nettement moins perturbée avec plaque en alliage à base de nickel au cours de l'essai, alors que celle avec la plaque en 100Cr6 sans dépôt est variable avec une grande amplitude.

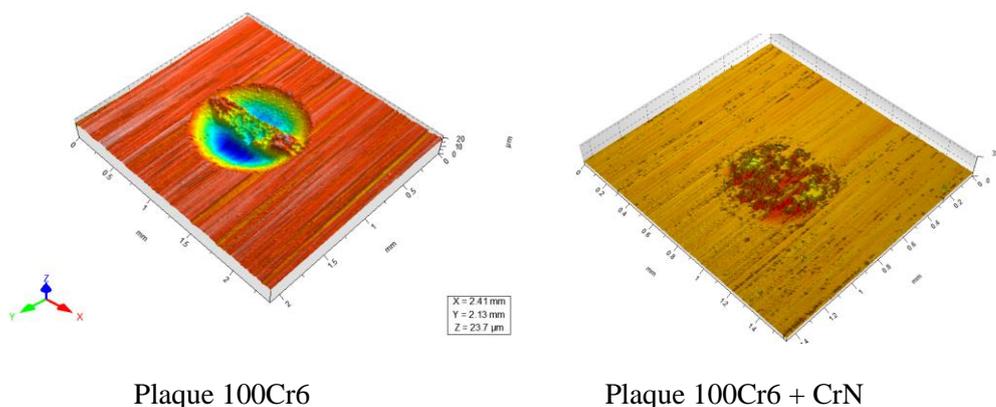


Figure 1. Comparaison de la trace d'usure de la plaque 100Cr6 sans et avec dépôt CrN

## CONCLUSION

Les résultats des essais montrent que les couples de matériaux testés dans ces conditions ont une bonne répétabilité. On note un très faible coefficient de frottement avec le dépôt DLC et une très faible usure avec le dépôt CrN. La conductivité électrique avec la plaque en alliage à base nickel est plus stable, ce qui est intéressant pour des applications aux contacts électriques.

## Références

- [1] R.B. Waterhouse, « Fretting wear », ASM Handbook vol. 18, Friction, Lubrication and Wear Technology (1990), P242-256.
- [2] K.G. Budinski, « Effect of hardness differential on metal-to-metal fretting damage », Wear 301 (S1-2), 2013, pp501-507.
- [3] Norme ASTM G204-10, « Standard Test Method for Damage to Contacting Solid Surfaces under Fretting Conditions », ASTM Int. , 2010.

## Lubrification EHD sous oscillations forcées

M. Yahiaoui<sup>1</sup>, D. Mazuyer<sup>2</sup>, J. Cayer-Barrioz<sup>2</sup>

1. Laboratoire Génie de Production (LGP), École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, Tarbes

2. Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes (LTDS), École Centrale de Lyon, CNRS UMR5513, Écully

### MOTS CLES

Lubrification EHD, Conditions transitoires, Épaisseur de lubrifiant

### INTRODUCTION

Un grand nombre d'applications mettent en jeu des contacts glissants lubrifiés à cinématique transitoire (p. ex. système piston/cylindre) ou opérants par intermittence (p. ex. arrêts et redémarrages). Nonobstant, la littérature est principalement orientée dans le domaine des mouvements à vitesse constante. Les régimes de lubrification sont alors souvent décrits par la présentation de courbes de Stribeck. Dans les contacts élastohydrodynamiques (EHD), la distribution des épaisseurs de lubrifiant est aussi parfaitement décrite par des modèles empiriques tels que celui de Hamrock et Dowson [1]. En conditions transitoires, l'épaisseur du lubrifiant est sujette à des phénomènes supplémentaires de piégeage (*Squeeze*), de sous-alimentation et de cavitation [2]. La prédiction des épaisseurs de lubrifiant nécessite alors la résolution de l'équation de Reynolds en incluant le terme transitoire.

Cette étude propose de s'intéresser à une résolution analytique de l'équation de Reynolds développée au LTDS [3], conjointement à sa validation par une confrontation à des résultats obtenus lors d'essais réalisés sur le tribomètre CHRONOS, pour des oscillations forcées [4]. Les mesures de la distribution des épaisseurs de lubrifiant au sein du contact sont alors classiquement obtenues par interférométrie optique [5].

### CALCUL DE L'ÉPAISSEUR DE LUBRIFIANT

L'équation de Reynolds unidimensionnelle suivant la direction de glissement est considérée (Équation 1) avec  $h(x,t)$  l'épaisseur de lubrifiant,  $p(x,t)$  la pression hertzienne,  $u(t)$  la vitesse d'entraînement et  $\eta$  la viscosité dynamique sous pression du fluide.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right] = 6u(t) \frac{\partial h}{\partial x} + 12 \frac{\partial h}{\partial t} \quad \text{Équation 1}$$

Pour la résolution analytique, l'hypothèse d'Ertel est utilisée en considérant que l'écoulement d'un fluide piézovisqueux de viscosité  $\eta$  sous le champ de pression  $p(x,t)$  est supposé équivalent à celui d'un fluide isovisqueux de viscosité  $\eta_0$  sous un champ de pression réduit  $q(x,t)$ . Cette hypothèse permet alors d'obtenir une forme de l'équation de Reynolds soluble dans le convergent puis par continuité dans le contact et enfin, dans le divergent.

Pour le calcul, une fonction vitesse d'entraînement  $u(t)$  triangulaire est utilisée en première approximation du déplacement réel sinusoïdal. Cela permet d'exprimer l'épaisseur de lubrifiant  $h(x,t)$  lors d'une première décélération à partir d'un régime établi à vitesse constante (c.-à-d.  $u(t=0) = u_0$ ) [3]. Puis le calcul est itéré à l'aide de deux nouvelles équations solutions des équations différentielles régissant les accélérations et décélérations successives.

Un premier résultat important montre alors que l'évolution de l'épaisseur de lubrifiant dans le contact converge vers sa forme définitive dès le deuxième cycle de glissement.

## VALIDATION EXPÉRIMENTALE

Pour valider les équations issues de cette démarche, des essais ont été réalisés sur le tribomètre CHRONOS avec une huile synthétique (PAO40) de viscosité 820 mPa·s, une pression de contact de 220 MPa, un débattement de 1 mm et une fréquence d'oscillation de 10 Hz. Les résultats montrent que l'évolution de l'épaisseur de lubrifiant calculée dans le contact est en adéquation avec celle mesurée lors des campagnes expérimentales dès la deuxième itération (Figure 1). Des effets dynamiques, tels que la chute d'épaisseur autour de la vitesse nulle et l'effet du *squeeze*, sont très précisément prédits ce qui permet de confirmer la validité des calculs.

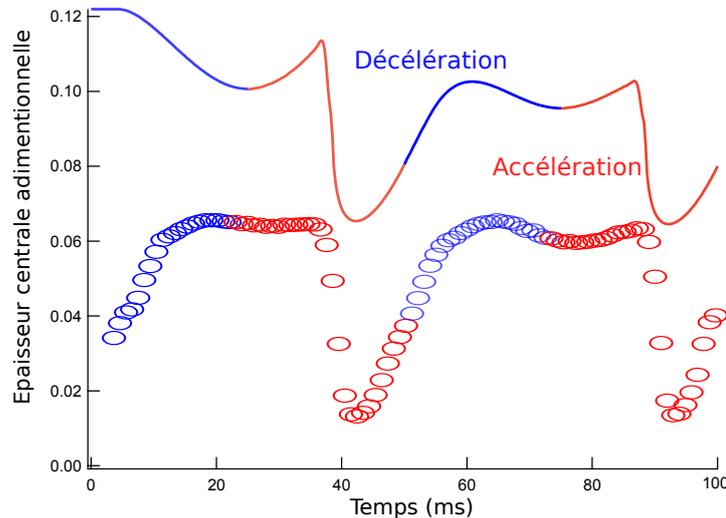


Figure 1 : Superposition du calcul d'épaisseur (courbe lisse du haut) et de l'épaisseur mesurée.

## CONCLUSION

Ce travail expose un modèle analytique simple permettant de décrire précisément l'épaisseur de lubrifiant dans un contact EHD en condition transitoire. Cette démarche permet de fournir une meilleure compréhension des mécanismes de lubrification, notamment en ce qui concerne les mécanismes liés au *squeeze* et aux changements de vitesse dans les contacts complètement lubrifiées.

## Références

- [1] B. Hamrock, D. Dowson (1977) « *Isothermal elastohydrodynamic lubrication of point contacts: Part III – fully flooded results* », Journal of Lubrication Technology, **13**, pp. 183-194.
- [2] E. Cuilli (2009) « *Non-steady state non-conformal contacts: friction and film thickness studies* », Meccanica, **44**, pp. 409-425.
- [3] D. Mazuyer, A. Ernesto, J. Cayer-Barrioz (2017) « *Theoretical modeling of film-forming mechanisms under transient conditions* », Tribology Letters, **65**, pp. 22-36.
- [4] M. Yahiaoui, E. Rigaud, D. Mazuyer, J. Cayer-Barrioz (2017) « *Forced oscillations dynamic tribometer with real-time insights of lubricated interfaces* », Review of Scientific Instruments, **83**, pp. 035101.
- [5] A. Cameron, R. Gohar (1966) « *Theoretical and experimental studies of the oil film in lubricated point contact* », Proceedings of the Royal Society A, **291**, pp. 520-536.

## ETUDE DE L'INFLUENCE D'UN TRAITEMENT DUPLEX SUR LES PROPRIÉTÉS TRIBOLOGIQUES D'UN ACIER AISI 316 LM

Anastasiia Pavlik<sup>1,2</sup>, Andrea Cappella<sup>1</sup>, Julien Vincent<sup>1</sup>, Mamadou Coulibaly<sup>1</sup>  
Laurent Faure<sup>1</sup>, Sylvain Philippon<sup>1</sup>, Gregory Marcos<sup>2</sup>, Thierry Czerwiec<sup>2</sup>

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

2. Institut Jean Lamour (IJL), Département CP2S, UMR 7198 CNRS, Université de Lorraine, 2 allée André Guinier, BP 50840, 54000 Nancy, France

### MOTS CLES

austénite expansée, texturation, nitruration ionique, aspérités de surface, ball-on-plate, coefficient de frottement, volume d'usure

### INTRODUCTION

Les aciers inoxydables possèdent une résistance mécanique importante, une conductivité thermique faible, une bonne résistance à la corrosion à froid en milieu humide ainsi qu'une bonne recyclabilité. L'acier inoxydable AISI 316 LM est particulièrement recherché dans la pratique chirurgicale pour sa résistance très élevée à la corrosion en milieu biologique. Toutefois, dans les conditions de ces applications, il peut être sujet à des contraintes tribologiques sévères pouvant conduire à de l'endommagement et de l'usure.

Dans cette étude, nous proposons de combiner deux traitements de surface dans le but d'améliorer les propriétés tribologiques de résistance à l'usure de l'acier austénitique AISI 316 LM causée par le frottement à sec. Pour fonctionnaliser la surface d'un acier, il est possible de la structurer avec des aspérités à géométrie contrôlée ou de réaliser un traitement thermo-chimique par plasma de nitruration à basse température. Le procédé de texturation permet d'abaisser le coefficient de frottement dynamique [réf 1], tandis que la nitruration améliore la dureté superficielle tout en conservant les propriétés de résistance à la corrosion [réf 2]. Ce traitement induit la formation d'une couche de diffusion nommée austénite expansée qui est le siège de fortes contraintes de compression donnant au matériau des propriétés tribologiques optimisées. [réf 3]. Un tribomètre en configuration « bille sur plan » (ball-on-plate) a été utilisé pour les études de frottement à sec et à basse vitesse afin de caractériser l'influence des traitements duplex sur la durée de vie des aspérités, le coefficient de frottement et les mécanismes d'usure. Les essais tribologiques ont été effectués par mouvements rectilignes alternatifs afin d'imposer une unique direction cinématique de la bille par rapport à la géométrie des aspérités de surface. De plus, cette configuration est particulièrement adaptée aux mécanismes alternatifs des articulations, comme celles de la hanche et des genoux.

### TECHNIQUE EXPERIMENTALE

Des gravures ioniques de l'acier AISI 316 LM sous mélange plasma Ar/H<sub>2</sub> (95/5 %) ont été effectuées grâce à un réacteur de type ECR [ref 4] (figure 1a). Différentes géométries de texture ont été réalisées en utilisant divers masques en acier percés par faisceau laser. La surface structurée se présente sous la forme d'une distribution régulière et unidirectionnelle de bandes (aspérités linéaires), dont la hauteur moyenne est de 15 ou 50 µm. Deux largeurs d'aspérités (100 et 250 µm) et trois distances entre aspérités consécutives (100, 200 et 300 µm) ont été étudiées. Ces paramètres géométriques caractérisent des densités de structuration différentes et, par conséquent, différentes longueurs réelles de piste d'usure (figure 1b).

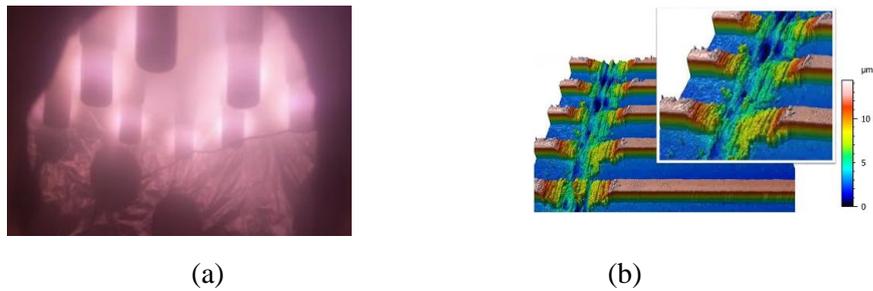


Figure 1 : Plasma créé autour des antennes microondes dans le réacteur DECR (a) ; Image de la surface texturée obtenue par interférométrie optique (b)

Les essais tribologiques ont été mis en œuvre à température ambiante sur des échantillons vierges et traités, contre une bille d'alumine sans lubrifiant. Les conditions expérimentales ont été paramétrées avec deux charges normales, de 5 et 10 N, pour différentes distances de glissement. Les mesures ont été effectuées pour la direction de glissement transversale à celle des aspérités.

## RESULTATS & CONCLUSIONS

L'étude paramétrique de ce traitement duplex a permis de caractériser le rôle de la géométrie des motifs de texture superficielle obtenus (rapport d'aspect, taux de couverture) sur les propriétés de la couche nitrurée (épaisseur, rugosité de surface, taille des grains).

Avec une charge de 10 N et sans nitruration, la présence de sillons a une forte incidence sur le coefficient de frottement : chute dont l'évolution est plus lente en présence d'aspérités de 40  $\mu\text{m}$  de hauteur par rapport à celles de 10  $\mu\text{m}$  de hauteur (figure 2.b). Après un traitement duplex (texturation puis nitruration), le coefficient de frottement est réduit et le volume d'usure semble plus faible (figure 2a et 2b).

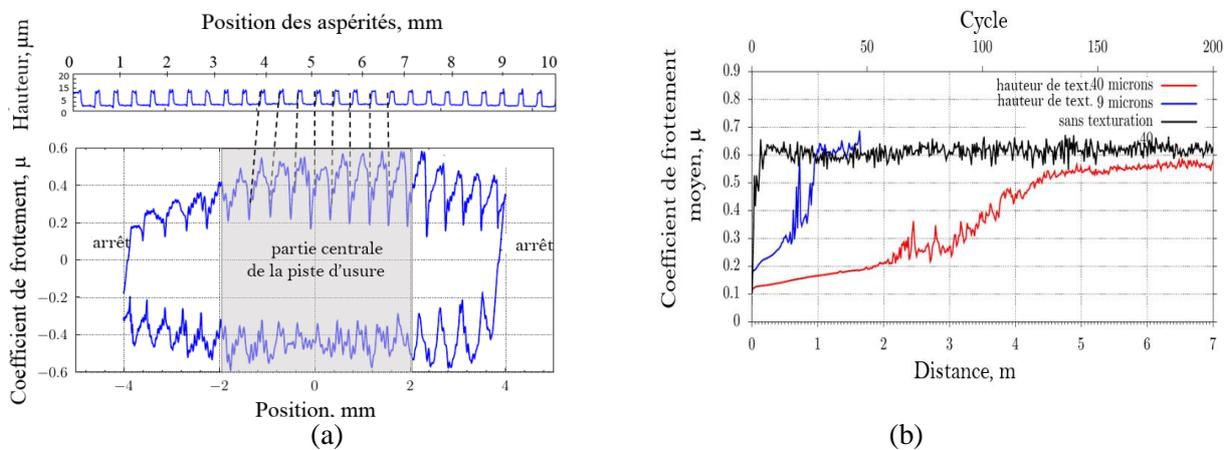


Figure 2 : a) Evolution du coefficient de frottement lors d'un cycle et b) évolution du coefficient de frottement moyen due au frottement alternatif pour différents traitements.

## REFERENCES

- [1] : Borghi, Aa, et al. "Tribological effects of surface texturing on nitriding steel for high-performance engine applications." *Wear* 265.7 (2008): 1046-1051.
- [2] : Bell, T. "Surface engineering of austenitic stainless steel." *Surface Eng.* 18.6 (2002): 415-422.
- [3] : Czerwiec, T., Marcos, G., Thiriet, T., Guo, Y., & Belmonte, T. (2009). Austenitic stainless steel patterning by plasma assisted diffusion treatments. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 5, No. 1, p. 012012). IOP Publishing.
- [4] : A. Lacoste, T. Lagarde, S. Bechu, Y. Arnal and J. Pelletier, *Plasma Sources Sci. Technol.* 11, 2002

## Tribochimie dans un contact lubrifié par dépôt sec MoS<sub>2</sub>/Ti : analyses par Spectrométrie de Masse d'Ion Secondaire en Temps de Vol

G. Colas<sup>1,2</sup>, A. Saulot<sup>3</sup>, D. Philippon<sup>3</sup>, Y. Berthier<sup>3</sup>, D. Léonard<sup>4</sup>

1 Department of Mechanical & Industrial Engineering University of Toronto, 5 King's College road, Toronto, ON M5S3G8, Canada

2 Univ BFC, CNRS, Institut Femto-St, Besançon, France

3 Univ Lyon, CNRS, LaMCoS UMR5259, INSA-Lyon, F-69621 Villeurbanne, France

4 Univ Lyon, CNRS, Université Claude Bernard Lyon 1, ENS de Lyon, Institut des Sciences Analytiques, UMR 5280, 5, rue de la Doua, F-69100 Villeurbanne, France

### MOTS CLES

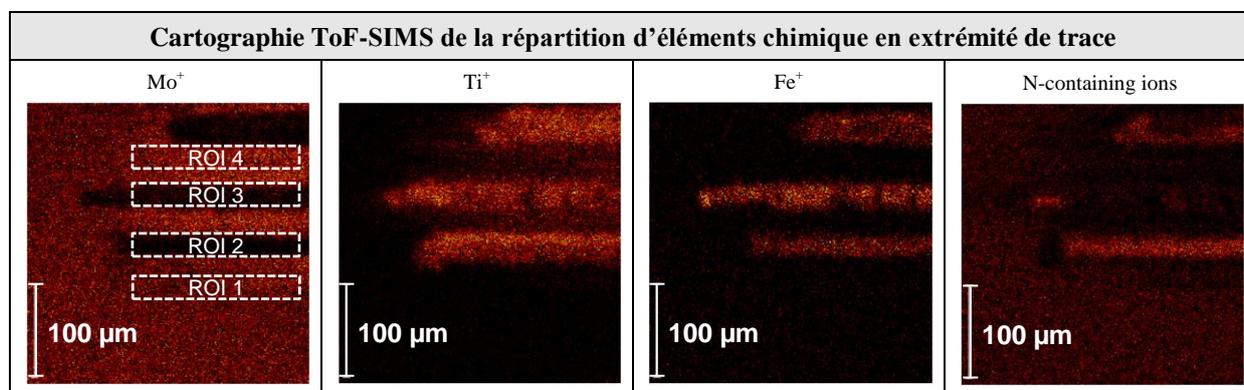
Tribochimie, vide, ToF-SIMS, 3<sup>ème</sup> corps

### CONTEXTE ET ETUDE

Contrôler et prédire le comportement tribologique d'un lubrifiant afin d'assurer un faible frottement et une longue durée de vie requière la compréhension des phénomènes tribochimiques survenant au sein du contact. Notamment lorsqu'il s'agit de prédire le comportement tribologique en fonction de l'environnement de travail. Cependant, la plupart des études ne prennent pas en compte le rôle des contaminants (issus de la technique de fabrication par exemple) contenus dans le matériau au profit d'études traditionnelles comparatives du comportement tribologique en fonction de l'humidité dans l'air ou de la pression atmosphérique (ultravide, atmosphère ambiante, etc.).

L'étude présentée ici se focalise sur la compréhension des processus tribochimiques intervenants dans un contact en acier AISI440C lubrifié par un dépôt mince, le MoS<sub>2</sub>/Ti, et les contaminants contenus dans ces matériaux. La Spectrométrie de Masse d'Ion Secondaire en Temps de Vol (ToF-SIMS) est utilisée afin d'étudier l'évolution de la composition chimique moléculaire des surfaces avant et après frottement. Des essais interrompus sont alors réalisés sous ultravide, à une échelle macroscopique afin de rester au plus proche de l'application réelle. L'adsorption et la désorption de gaz durant le frottement sont étudiées par un spectromètre de masse afin d'assurer un suivi le plus complet possible des processus tribochimiques qui ont lieu dans le contact.

### RESULTATS



L'étude montre une compétition entre les matériaux à base Ti et MoS<sub>2</sub> dans la création des 3<sup>ème</sup> corps via (i) une recristallisation du matériau à base MoS<sub>2</sub> et la création d'une phase

MoSxOy issue de réactions chimiques avec les contaminants internes au dépôt (a priori l'eau) ; (ii) des réactions entre le Ti et avec les contaminants eau et azote (N2) contenus eux aussi dans le dépôt. Un 3<sup>ème</sup> corps bi-phasique est alors généré dans le contact. La nature chimique de ce matériau est d'une grande similitude avec le 3<sup>ème</sup> corps bi-phasique conférant faible frottement et faible usure au contact, tel qu'observé après frottement sous air humide et sous environnement azote sec (N2). Cependant, sous ultravide, le comportement tribologique est mauvais du fait d'un volume trop faible de réactifs.

## CONCLUSION

L'étude démontre donc que la réponse tribochimique naturelle des matériaux dans des environnements dans lesquelles le frottement et l'usure sont faibles, peut être initiée via les contaminants internes contenus dans le volume de ces mêmes matériaux.

# *Session Posters*

# ANISOTROPIE ET CARACTERE FRACTAL DU FROTTEMENT POUR DES CONTACTS TRIBOLOGIQUES AA2024-T351/ UHMWPE

E. Pirva<sup>1</sup>, A. Gavrus<sup>2</sup>, A. Tudor<sup>1</sup>, N. Stoica<sup>1</sup> et S. Cananau<sup>1</sup>

1. Université Politehnica de Bucarest, 313 Splaiul Independentei, 060042 Bucarest, Roumanie

2. INSA Rennes – UBL, LGCGM – EA 3913, 20 Av. des Buttes de Coesmes, 35708 Rennes, France

## MOTS CLES

Contact aluminium/polymère, Surfaces anisotropes, Loi frottement anisotrope, Analyse fractale

## INTRODUCTION

Cette étude porte sur l'analyse du comportement tribologique anisotrope des tôles épaisses de l'alliage aéronautique AA2924-T351 lors des contacts mécaniques avec des matériaux polymériques rencontrés dans des couples mécaniques hybrides sollicités à faible vitesses et pressions de contact.

## ANISOTROPIE DES SURFACES ET DU FROTTEMENT

La rugosité et la topographie de surface joue un rôle majeur dans la tribologie de contacts mécaniques influençant les phénomènes liés au frottement, à l'usure et à la durabilité des couples mécaniques. Afin de déceler le caractère anisotrope en surface pour une tôle épaisse laminée de l'alliage AA2024-T351 une analyse plus approfondie a été réalisée à l'aide d'un profilomètre optique sur une plaque plane de 10 mm d'épaisseur. Dans la Fig. 1 l'on peut mentionner la distinction dans le plan x, y de la plaque des différents directions : LD ou DL – laminage, TD ou DT – transversale et DD – orientation de 45°. Avec l'angle  $\theta$  l'on définit une direction quelconque  $D(\theta)$  dans le plan de la tôle.

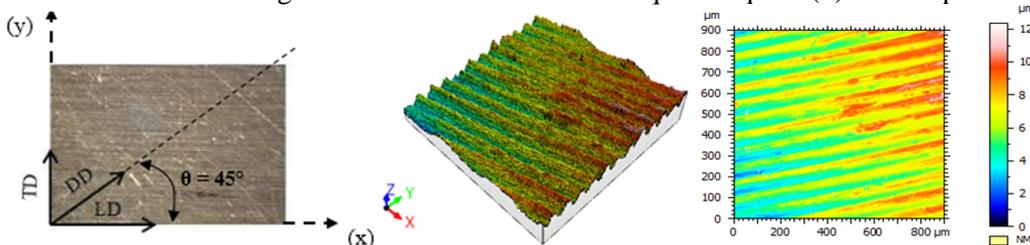
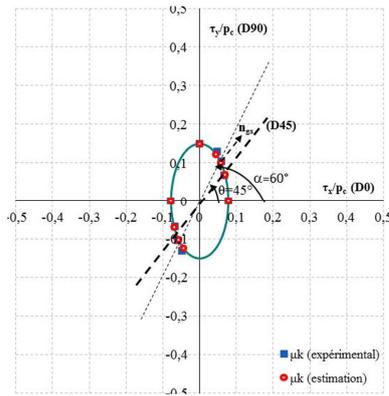


Figure 1: Topographie 3D de la surface d'une plaque plane AA2024-T351 avec épaisseur de 10 mm, longueur dans la direction de laminage de 30 mm et largeur dans la direction transversale de 25 mm.

Il est facile de constater dans la Fig. 1 que la morphologie et la distribution des rugosités montre une orientation privilégiée des aspérités suivant la direction de laminage avec une amplitude de maximum 10  $\mu\text{m}$  et une variation de type fractale [1] comme il a été détaillée par les auteurs dans des travaux récents [2]. L'anisotropie topologique de la surface conditionne tout phénomène de frottement à la fois pour des contacts élastiques et élasto-plastiques. Ainsi des essais de frottement type pion-plaque ont été réalisés sur un tribomètre type UMT de l'UPB. Les coefficients de Coulomb ont été mesurés lors du mouvement rectiligne à des vitesses de glissement  $v_g$  constantes (0.005, 0.05, 0.5, 1 et 5 mm/s) d'un pion en polymère dur (UHMWPE) de diamètre de 2 mm sur la plaque laminée d'épaisseur  $g=10$  mm de l'alliage AA2924-T351 suivant différentes directions ( $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$  et  $90^\circ$ ) et pour trois pressions de contact  $p_c$  (0.95, 1.59 et 2.22 MPa). Les résultats montrent une influence faible de la vitesse relative  $v_g$  et de la pression de contact sur les valeurs des coefficients de coulomb statiques  $\mu_s$  et cinétiques  $\mu_k$  (maximum 10%). Par contre une influence notable de la direction de glissement (50%) est observée (Tableau 1). Partant de la théorie du frottement anisotrope une fonction de charge dérivant d'un potentiel quadratique appelé critère elliptique [3] peut être utilisée et le coefficient de coulomb  $\mu(\theta)$  s'exprime (erreur d'environ 5% - 10% [4], Tab1 et Fig. 2) par:

$$\mu(\theta) = \sqrt{\mu^2(0^\circ)\cos^2(\theta) + \mu^2(90^\circ)\sin^2(\theta)} \text{ où } (\tau_x^2 / \mu^2(0^\circ)) + (\tau_y^2 / \mu^2(90^\circ)) = p_c^2 \text{ et } \text{tg}(\alpha) = [\mu(90^\circ) / \mu(0^\circ)]\text{tg}(\theta) \quad (1)$$



*Tableau 1 : Comparaison des coefficients expérimentaux du frottement cinétique et ceux estimés par le modèle anisotrope de type elliptique ( $p_c = 2.22 \text{ MPa}$ )*

Coefficient cinétique du frottement de Coulomb $\mu_k$	Exp.	Modèle anisotrope de frottement elliptique	Erreur [%]	$\alpha(^{\circ})$
D(0°) - DL	0.078	0.078	0	0°
D(30°) - D30	0.095	0.101	6.3	$\approx 45^{\circ}$
D(45°) - DD ou D45	0.120	0.119	-0.8	$\approx 60^{\circ}$
D(60°) - D60	0.139	0.136	-2.2	$\approx 70^{\circ}$
D(90°) - DT	0.150	0.150	0	90°

Figure 2: Modèle anisotrope elliptique du frottement cinétique lors des essais de glissement pion-plaque UHMWPE /AA2024-T351 pour  $p_c = 2.22 \text{ MPa}$  suivant différentes directions

### CARACTERISATION FRACTALE

Une étude plus approfondie sur la variation des coefficients de Coulomb avec la direction de glissement a été développée en utilisant une analyse fractale inspirée de celle utilisée pour l'analyse de la géométrie de surface [1,2]. Ainsi la Figure 3 illustre bien la dépendance de la dimension fractale  $D_{\mu}$  du coefficient de frottement [4], caractérisant le trajet minimal à prendre en compte pour l'estimation du  $\mu$  lors de la transition statique-cinétique, en fonction des directions et des vitesses de glissement avec des valeurs plus élevées suivant la direction de laminage et pour  $v_g$  entre 1 mm/s et 5mm/s.

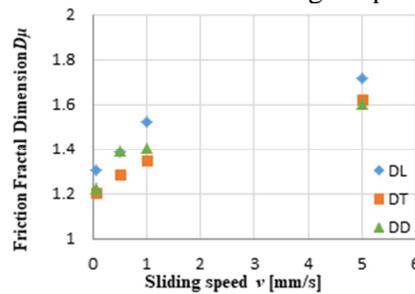


Figure 3: Dimension fractale du coefficient de frottement cinétique en fonction de la direction et la vitesse de glissement pour  $p_c=2.22 \text{ MPa}$  (contact pion-plaque UHMWPE /AA2024-T351)

### CONCLUSION

L'étude présentée montre que pour des tôles épaisses laminées AA2024-T351 en dehors d'un comportement volumique anisotrope les propriétés de surface relèvent aussi un frottement anisotrope décrit par un critère elliptique avec des caractéristiques fractales dépendant des directions de glissements ou des sollicitations mécaniques.

### Références

[1] Y. Morag and I. Etsion (2007) « Resolving the contradiction of asperities plastic to elastic mode transition in current contact models of fractal rough surfaces », *Wear* **262**, pp. 624-629.  
 [2] E Pirva, A Tudor, A Gavrus (2016) « Fractal analysis of surface micro-topography for a rolled anisotropic thick sheet of aluminium alloy (AA2024-T351) », *IOP Conf. Series: Mat. Sci. & Eng.* **147**.  
 [3] P. Montmitonnet (1993), « Lois de frottement et déformations plastiques », *Matériaux & Techniques* **1-2-3**, pp. 8-21.  
 [4] E. Pirva, A. Tudor, A. Gavrus, N. Stoica, S. Cananau (2017), « Some aspects regarding the influence of the anisotropy of an AA2021-T351 rolled thick plate on its tribological behaviour », *Congrès Français de Mécanique, Colloque Francophone*, 28 août - 1<sup>er</sup> septembre 2017, Lille, France.

## CARACTERISATION DE L'USURE ET DE L'ECHAUFFEMENT PAR FROTTEMENT DE MATERIAUX STRUCTURAUX AERONAUTIQUES

T. DEVO<sup>1,2</sup>, Y. DESPLANQUES<sup>2</sup> et E. DELETOMBE<sup>1</sup>

1. Onera - The French Aerospace Lab, F-59045, Lille, France

2. Univ. Lille, CNRS, Centrale Lille, FRE 2016 - LaMcube - Laboratoire de mécanique, multiphysique multiéchelles, F-59000 Lille, France

### MOTS CLES

Caractérisation, abrasion, système tribologique, atterrissage d'urgence

En situations d'atterrissage d'urgence ou de crash d'aéronefs, l'appareil se pose et termine sa course « sur le ventre », jusqu'à l'arrêt. Des éléments de structure (fuselage, moteurs) subissent des sollicitations extrêmes (mécaniques, thermiques, etc.), induit par le frottement sur le tarmac. L'amélioration de la compréhension de ces interactions piste-fuselage fait partie des objectifs de la convention de recherche PHYSAFE « crash et survivabilité » entre la DGAC et l'ONERA, cadre de la thèse.

L'objectif des travaux est la conception d'une expérimentation capable de rendre compte des mécanismes d'abrasion et d'échauffement de matériaux de structures aéronautiques dans des situations d'atterrissage d'urgence ou de crash. Une difficulté est de définir en laboratoire un triplet tribologique capable de reproduire une sollicitation représentative de ces situations, et pour laquelle peu d'information est disponible. Cette communication concerne des essais préliminaires d'investigation des mécanismes en jeu et de facteurs influant l'usure et l'échauffement des matériaux par frottement.

Les couples de matériaux étudiés sont un alliage d'aluminium Au2024 T3 et un matériau composite à matrice époxy à renforts de fibres de carbone T700/M21, représentatifs de matériaux de structure d'aéronefs, frottant sur un échantillon de béton simulant la piste. Les essais ont été réalisés sur un tribomètre rotatif disponible au laboratoire, capable de supporter les échauffements et de simuler des vitesses de glissement de plusieurs dizaines de mètres par seconde, de l'ordre de grandeur de la vitesse horizontale à l'atterrissage. Des estimations de masse des appareils, de profils de décélération, de rigidité de structure et de surfaces de contact considérées, permettent de définir une enveloppe du plan d'expérience tribologique (pression apparente, vitesse de glissement, durée, forme des échantillons) qu'il faudrait réaliser.



Figure 1: Etat de surface du disque en alliage d'aluminium (gauche) après contact avec un patin en béton (droite)

Cependant, la nature fondamentalement multi-échelle (variabilité locale des données) et multiphysique du problème nous amène à approfondir la réflexion sur la représentativité des configurations et conditions expérimentales, et sur un inévitable changement d'échelle permettant d'intégrer des aspects matériaux (microstructure, VER, etc.), aux considérations structurales (thermomécanique, voire dynamique).

Une première série d'essais a permis de mesurer et d'analyser un certain nombre de grandeurs expérimentales : champ de température à la surface du disque en rotation, effort dynamique résultant de l'interaction de contact, composition chimique des espèces fabriquées en surface des éprouvettes, etc. Les premières conclusions de ces analyses seront présentées à l'occasion de la conférence.

## Caractérisation tribologique de monocouches auto-assemblées grâce à un micro-tribomètre spécifique permettant d'appliquer de très faibles pressions de contact.

X. Roizard<sup>1</sup>, L. Carpentier<sup>1</sup>, JM Cote<sup>1</sup>, JM Melot<sup>2</sup> et F. Lallemand<sup>2</sup>

1. Institut FEMTO-ST, DMA UMR 6174, CNRS UFC ENSMM UTBM UBFC, FRANCE

2. Institut UTINAM, UMR 6213, CNRS UFC, FRANCE Affiliation Auteur2

### MOTS CLES

Tribomètre très basse pression de contact, monocouche auto-assemblée, frottement

### INTRODUCTION

De nombreux substrats métalliques peuvent être fonctionnalisés par greffage chimique de monocouches auto-assemblées (SAM's). Bien que l'épaisseur de ces dernières soit très faible (quelques nm), leur présence peut énormément transformer les propriétés tribologiques des substrats ainsi modifiés. L'étude des SAM's continue à faire l'objet de nombreux travaux de recherche académique ou appliquée dans le but de qualifier leur rôle de lubrifiant à l'échelle micrométrique [1].

La structure d'une molécule capable de former une SAM est bien connue : une extrémité de la molécule comporte un groupe ancreur qui permet le greffage chimique sur le substrat (métal, oxyde métallique) ; l'autre extrémité de la molécule comporte une tête fonctionnelle dont le rôle est de conférer de nouvelles propriétés à la surface - tribologiques dans le cas présent. Entre les deux extrémités, le groupe espaceur joue un rôle primordial sur l'organisation des chaînes carbonées et donc sur leur organisation et/ou leur compacité.

Des simulations en dynamique moléculaire [2] montrent qu'une structure ordonnée des chaînes alkyle entraîne une diminution notable des efforts de frottement ; une bonne organisation nécessite au minimum 8 à 10 groupes méthylène.

L'objet de cet article est de conforter expérimentalement cette observation. Or, à notre connaissance, aucun tribomètre ne permet une sollicitation de l'extrême-surface sur une aire suffisamment étendue. L'utilisation par les chercheurs de pointes AFM pour localiser la sollicitation en surface permet seulement l'activation simultanée d'un nombre restreint de chaînes : l'aspect organisationnel des chaînes entre elles ne peut donc être étudié. A une autre extrémité, les frotteurs de taille millimétrique entraînent des pressions de contact de plusieurs MPa, lesquelles conduisent rapidement une modification et/ou destruction rapide de la fonctionnalisation.

### TRIBOMETRE BASSE PRESSION DE CONTACT

Les formules de Hertz démontrent clairement que la pression maximale théorique sous le contact entre une bille et un plan dépend du rayon de la bille et de la charge appliquée selon :

$$P_{\max} = \sqrt[3]{\frac{6F(E^*)^2}{\pi^3 R^2}} \text{ avec } R : \text{ rayon du frotteur sphérique et } F \text{ la force appliquée.}$$

En considérant un substrat en acier et un frotteur sphérique en verre avec un diamètre de l'ordre du mètre et une force appliquée de l'ordre de 10 grammes la pression maximale de contact est inférieure à 2 MPa. L'aire de contact a dans ce cas, un diamètre supérieur à 300  $\mu\text{m}$ , très élevé comparé à la dimension des chaînes moléculaires ; par ailleurs, les déformations verticales des surfaces sont de l'ordre de quelques nanomètres, de l'ordre de l'épaisseur du film organique greffé. La sollicitation peut alors être considérée comme macroscopique à l'échelle de la surface, mais nanométrique à l'échelle de la déformation des surfaces (figure 1). Un tribomètre basse pression de contact, ayant ces spécificités, a été développé pour la caractérisation tribologique de SAM's.

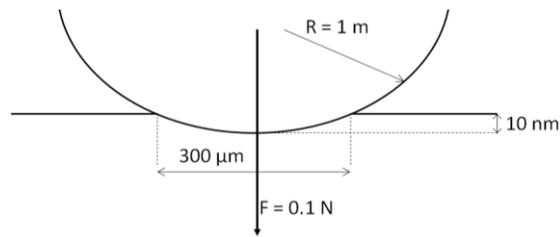


Figure 1: Schématisation du contact bille-plan  
pression maximale de contact égale à 2 MPa

## INFLUENCE DE LA LONGUEUR DE LA CHAÎNE ALKYLE

Nous avons synthétisé au laboratoire 6 acides phosphoniques présentant des chaînes alkyles avec  $n = 4, 8, 12, 16, 18$  et  $20$  atomes de carbones respectivement (molécules appelées  $C_n$ ). Ces molécules sont ensuite greffées sur un substrat en acier inoxydable ferritique (X2CrTiNb18-1.4509) par immersion des pièces dans une solution hydroalcoolique des molécules à une concentration de  $10^{-3}$  M pendant 6 heures. Enfin, les substrats fonctionnalisés sont placés dans une solution éthanolique et soumis à l'action des ultrasons afin d'ôter les espèces physisorbées.

La figure 2 montre les résultats en termes de « frottement moyen par cycle » des 6 substrats ainsi fonctionnalisés, lorsque le tribomètre basse pression de contact a produit une sollicitation linéaire alternative durant 15 cycles (ici  $P_{moy} = 2.4$  MPa).

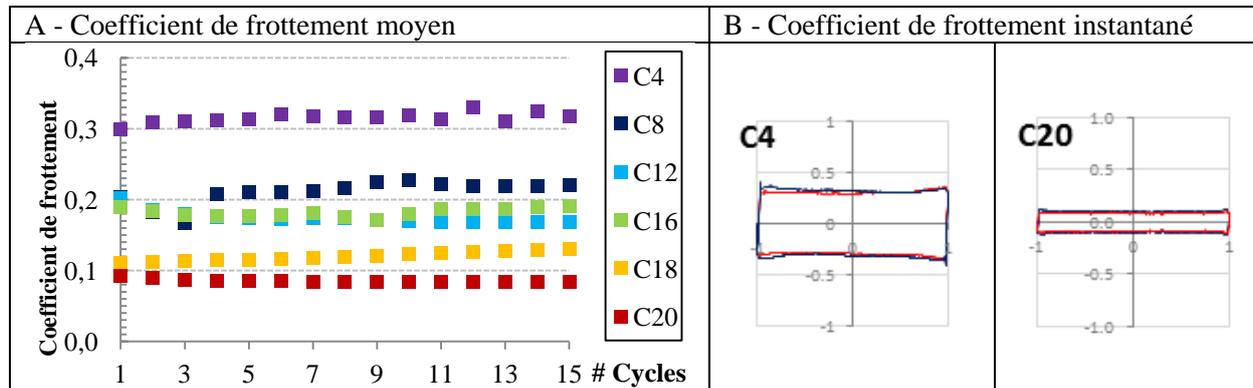


Figure 2 : A : évolution du coefficient de frottement moyen par cycle (de 1 à 15 cycles) ;  
B : évolution du coefficient de frottement instantané en fonction de la position durant les cycles 1 (en rouge) et 15 (en bleu)

Il est manifeste que le coefficient de frottement moyen par cycle diminue lorsque la longueur de la chaîne alkyle augmente. Dans tous les cas (figure 2B), le frottement instantané reste stable sur toute la longueur du cycle comme le montre les bûches de frottement des cycles 1 et 15 lorsque les substrats ont été fonctionnalisés avec de l'acide butylphosphonique (C4) ou eicosane-1-phosphonique (C20)

## CONCLUSION

Nous confirmons donc expérimentalement, sur un tribomètre à faible pression de contact, que la force de frottement dépend fortement de la longueur de la chaîne alkyl des molécules d'acide alkylphosphoniques auto-assemblées, ceci pour une même tête fonctionnelle « méthyle ».

## Références

- [1] MM Moine, X. Roizard, JM Melot, L. Carpentier, PH Cornuault, F. Lallemand, JM Rauch, O. Heintz, S. Lallemand, Surface&Coatings Technology., vol. 232, p. 567, 2013.
- [2] KJ. Tupper, DW Brenner, Thin Solid Films, vol 253 p 185, 1994

## Effet de la texturation laser sur les propriétés tribologiques de l'acier inoxydable 904L

H. Meliani<sup>1,2</sup>, M. Assoul<sup>1,2</sup>, M. Fontaine<sup>1,3</sup>, G. Monteil<sup>1,3</sup> et Vahan Malkhasyan<sup>1,2</sup>

1. Institut FEMTO-ST/UMR CNRS 6174, Département Mécanique Appliquée, 24 rue de l'Épitaphe, 25000 Besançon, France

2. Université Bourgogne Franche-Comté, 32 avenue de l'Observatoire, 25000 Besançon, France

3. ENSMM, 26 rue de l'Épitaphe, 25000 Besançon, France

### MOTS CLES

Texturation, coefficient de frottement, usure, micro-tribomètre

### INTRODUCTION

La structuration de surface par laser est une technique prometteuse pour modifier les propriétés tribologiques d'un matériau. Plusieurs chercheurs ont démontré que ce procédé réduisait le coefficient de frottement et l'usure dans différentes applications [1-2]. Cette méthode est utilisée, par exemple, pour améliorer la performance des outils de coupe en usinage. Différents types de structures comme des micro-trous [3] et micro-lignes [4] ont été étudiées. Cependant, peu de chercheurs ont travaillé sur l'effet des nanostructures obtenues par femto-seconde, comme celles appelées « ripples », sur les propriétés tribologiques.

### CONDITIONS D'ESSAIS

L'éprouvette texturée est en acier inoxydable grade 904L. La texturation a été réalisée avec un laser femto-seconde Ti-Saphir d'une énergie de 0,5 mJ/pulse, avec une durée d'impulsion de 130 fs, un taux de répétition de 5 kHz, une longueur d'onde de 800 nm et une polarisation linéaire du faisceau. Les « ripples » générées ont une fréquence d'ondulation moyenne de 650-730 nm et une profondeur moyenne de 220 nm. Elles ont été obtenues avec une fluence crête de 0,4 J/cm<sup>2</sup> et un rayon pour une fluence égale à 1/e<sup>2</sup> de la fluence crête, de 11 µm.

Les essais tribologiques ont été effectués sur un tribomètre alternatif linéaire avec un pion de frottement en carbure de tungstène de diamètre 5 mm, une force normale de 2 N, une fréquence de 1 Hz et une longueur de glissement égale à 1 mm. Une image AFM des structures réalisées est présentée sur la figure 1.

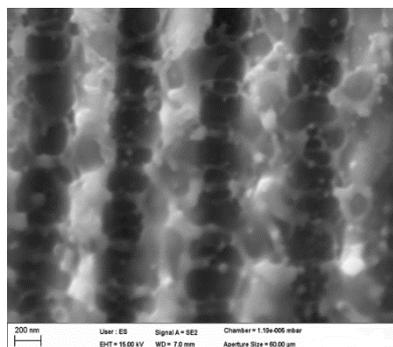


Figure 1: Image AFM des ripples produites sur l'acier inoxydable.

## RESULTATS ET DISCUSSION

Une série d'essais de frottement a été réalisée sous un régime lubrifié (huile Oil Form B2R) sur des zones texturées et non-texturées. Nous avons pu d'une part, mesurer l'évolution du coefficient de frottement au cours des cycles et, d'autre part, quantifier le volume d'usure de la surface frottée. Les zones texturées conduisent à un coefficient de frottement plus faible que les zones non-texturées comme le montre la figure 2. Cette réduction pourrait s'expliquer par le rôle des « ripples », qui agiraient comme des réservoirs à lubrifiant. Concernant l'usure de la surface frottée, nous avons également observé une réduction significative : un volume d'usure de  $21,5 \cdot 10^4 \mu\text{m}^3$  pour la surface texturée et  $5,83 \cdot 10^4 \mu\text{m}^3$  pour la surface non texturée.

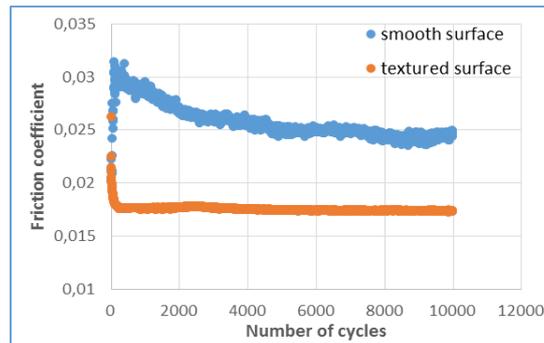


Figure 2: Evolution du coefficient de frottement en fonction du nombre de cycles.

## CONCLUSION

Ce travail a permis de mettre en évidence l'effet de la nano-texturation laser sur les propriétés tribologiques dans un contact acier inoxydable 904L/carbure de tungstène. Cette amélioration de performances s'expliquerait par une lubrification continue des surfaces texturées grâce à la capacité des ripples à retenir le lubrifiant.

## Références

- [1] I. Etsion (2005) «State of the art in laser surface texturing», J.Tribol Trans ASME, 127 (1): 248-53.
- [2] J. Kümmel, D. Braun, J. Gibmeier, J. Schneider, C. Greiner, V. Schulze and A. Wanner (2015) «Study on micro texturing of uncoated cemented carbide cutting tools for wear improvement and built-up edge stabilization», J. Mater. Process. Technol. 215, 62-70.
- [3] A. Arslan, H. H. Masjuki, M. Varman, M. A. Kalam, M. M. Quazi, K. A. H. Al Mahmud, M. Gulzar, and M. Habibullah (2015) «Effects of texture diameter and depth on the tribological performance of DLC coating under lubricated sliding condition», Appl. Surf. Sci. 356, 1135-1149.
- [4] T. Sugihara, T. Enomoto (2009) «Development of a cutting tool with a nano/micro textured surface- Improvement of anti-adhesive effect by considering the texture patterns», Precision Engineering 33, 425-429.

## Etude du champ de contraintes résiduelles induit par une indentation sphérique sur un monocristal de cuivre

S. Breumier<sup>1</sup>, A. Villani<sup>1</sup>, C. Maurice<sup>1</sup>, M. Lévesque<sup>2</sup>, G. Kermouche<sup>1</sup>

1. Univ Lyon, IMT Mines Saint-Etienne, Centre SMS, CNRS, LGF, F - 42023 Saint-Etienne France

2. Département de Génie Mécanique, École Polytechnique de Montréal, C.P. 6079, Succ. Centre-ville, Montréal, Québec, H3C 3A7 Canada

### MOTS CLES

Indentation, Contraintes résiduelles, Plasticité cristalline, EBSD haute-résolution, Monocristal

### RESUME

L'indentation instrumentée offre aujourd'hui une large palette de caractérisation des matériaux et des surfaces, grâce aux nombreuses études réalisées au cours des trente dernières années (mesure de contraintes résiduelles, estimation de la ténacité ou encore identification de lois de comportements).

Un certain nombre d'études [1,2,3] s'intéressent à la réponse à l'indentation d'un monocristal, soit dans le but de comprendre l'effet d'échelle ayant lieu aux faibles hauteurs d'indentation, soit afin d'identifier un comportement de plasticité cristalline ou des mécanismes de déformations. Ces études ont par exemple permis de valider ou d'exposer les limites de l'utilisation de modèles de plasticité cristalline associés aux éléments finis (CPFE) pour représenter le comportement des matériaux cristallins, (notamment par l'analyse du champ de désorientation cristalline, de la topologie résiduelle de l'indentation, de la forme des « pile-ups » ou des « sink-ins » ou encore, en estimant la quantité de Dislocation Géométriquement Nécessaires (GND) produite autour de l'indent).

Cependant, très peu d'études dans la littérature se sont intéressées au champ de contraintes résiduelles induit par une indentation sur un monocristal (ou un grain de grande taille). En conséquence, la validation de l'utilisation de modèles CPFE pour prédire ce champ n'a pas non plus été établie. Une des raisons est que les méthodes usuelles de mesures, telles que la Diffraction à Rayon X, ne sont applicables qu'à des matériaux cristallins à faibles taille de grains.

Par ailleurs, ces modèles sont de plus en plus utilisés pour estimer le champ de contraintes induit par certains procédés de traitement de surfaces impliquant des impacts sphériques, tels que le grenailage. De précédents travaux ont montré que le champ de désorientation cristalline induit par un impact de bille était semblable à celui induit par une indentation sphérique [4]. L'étude du champ de contraintes résiduelles produit par une indentation sphérique pourrait donc aider à la compréhension de celui produit par ces procédés.

Dans le travail présenté, une mesure de contraintes résiduelles après indentation sphérique sur un monocristal de cuivre, a été réalisée par EBSD Haute Résolution [5], à partir des résultats d'une étude réalisée précédemment à l'Ecole des Mines de Saint-Etienne [4].

En parallèle, l'essai d'indentation a été simulé par éléments finis, à l'aide du logiciel Z-Set. Une loi de comportement de plasticité cristalline de type Méric et Cailletaud, dont les coefficients ont déjà été identifiés pour le cuivre dans la littérature [6] a été utilisée pour simuler le comportement du matériau traité.

Les résultats expérimentaux présentent une bonne corrélation avec les résultats des simulations (Figure 1). La cartographie des contraintes obtenue après découpe de l'échantillon met en évidence la présence d'une importante zone de contraintes résiduelles de traction en sous-surface de la zone indentée, après une indentation dans la direction  $[0\ 1\ 0]$  du cristal. Des simulations réalisées pour différentes orientations cristallines montrent, de plus, que la taille de cette zone de traction dépend fortement de l'orientation du cristal indenté.

En perspective, la prise en compte de l'anisotropie de la plasticité cristalline, dans les simulations numériques de procédés de traitement de surfaces impliquant des impacts sphériques, pourrait donc

permettre de prévenir un état hétérogène du champ de contraintes résiduelles résultant ainsi que d'éventuelles zones de contraintes résiduelles de traction favorisant l'ouverture prématurée de fissures en fatigue.

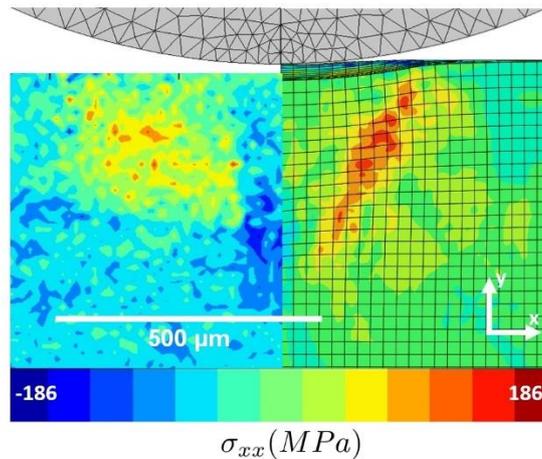


Figure 1: Contraintes résiduelles après indentation : mesure expérimentale par EBSD à Haute Résolution Angulaire à gauche et calcul Eléments Finis à droite

## Références

- [1] Zaafarani, N., Raabe, D., Singh, R., Roters, F., and Zaeferrer, S. (2006). Three-dimensional investigation of the texture and microstructure below a nanoindent in a cu single crystal using 3d EBSD and crystal plasticity finite element simulations. *Acta Materialia*, 54(7):1863 – 1876.
- [2] E. Renner, Y. Gaillard, F. Richard, F. Amiot, and P. Delobelle, “Sensitivity of the residual topography to single crystal plasticity parameters in berkovich nanoindentation on fcc nickel,” *International Journal of Plasticity*, vol. 77, no. Supplement C, pp. 118 – 140, 2016.
- [3] J. Alcalá, D. E. de los Ojos, and J. Očenášek, “Extracting uniaxial responses of single crystals from sharp and spherical hardness measurements,” *Mechanics of Materials*, vol. 84, no. Supplement C, pp. 100 – 113, 2015.
- [4] Pierre Juran, Pierre-Jacques Liotier, Claire Maurice, Frédéric Valiorgue, Guillaume Kermouche “Investigation of indentation-, impact- and scratch-induced mechanically affected zones in a copper single crystal,” *Comptes Rendus Mécanique*, vol. 343, no. 5-6, pp. 344-353, 2014.
- [5] C. Maurice, J. H. Driver, and R. Fortunier, “On solving the orientation gradient dependency of high angular resolution ebsd,” *Ultramicroscopy*, vol. 113, no. Supplement C, pp. 171 – 181, 2012.
- [6] L. Méric, G. Cailletaud, and M. Gaspérini, “F.e. calculations of copper bicrystal specimens submitted to tensioncompression tests,” *Acta Metallurgica et Materialia*, vol. 42, no. 3, pp. 921 – 935, 1994.

## **ETUDE DU COMPORTEMENT THERMOMECHANIQUE D'UN CONTACT DYNAMIQUE PION-DISQUE**

**N. Aderghal<sup>1,2</sup>, A. Bouchoucha<sup>2</sup>, T. Loulou<sup>3</sup>, H. Zaidi<sup>4</sup>**

*1. Département de Génie Mécanique, Université de Jijel BP 98 OuledAissa Jijel 18000 ALGERIE. E-mail : n.aderghal41@gmail.com*

*2. Laboratoire de Mécanique, Campus Chaab-Ersas, Université Constantine 1, Constantine 25000 ALGERIE.*

*3. Laboratoire d'Ingénierie des Matériaux de Bretagne, UBS -BP 92116 – 56321 Lorient CEDEX FRANCE.*

*4. Département Génie Mécanique et Systèmes Complexes, branche Mécanique des solides, CNRS, Université de Poitiers, ENSMA UPR 3346 SP2MI, Téléport 2, Boulevard Marie et Pierre Curie, Téléport 2, BP 30179,86962 Futuroscope Chasseneuil Cedex, France.*

### **MOTS CLES**

Couplage thermomécanique, contact dynamique, contraintes équivalentes de Von Mises, température de surface, frottement.

### **Résumé**

La thermomécanique est une partie de la tribologie. Elle associe les phénomènes décrits par la mécanique et la thermique des matériaux. La résolution d'un problème de thermomécanique demande la détermination de la température ainsi que les champs de contraintes. L'objectif de ce présent travail consiste à l'amélioration de la compréhension des phénomènes couplés, thermique et mécanique, et notamment la génération de la chaleur par frottement dans les contacts glissants. Pour cela, une étude thermomécanique du couple dynamique Cuivre-Acier a été effectuée en utilisant une configuration de contact de type pion-disque. Pour la résolution de ce problème, nous avons utilisé un code de calcul COMSOL qui nous a offert la possibilité de suivre l'évolution de la température et les contraintes de Von Mises en fonction de temps et de bien localiser les zones les plus affectées par le passage de la source de chaleur. Ce qui est difficile à réaliser expérimentalement, vu la complexité du phénomène de frottement ainsi que la difficulté d'implantation des thermocouples au niveau de l'interface du contact. Les résultats obtenus par cette modélisation montre qu'il existe des paramètres qui ont une influence significative sur la variation de la température et des contraintes de Von Mises tels que : la charge appliquée et la vitesse de glissement. Nous avons trouvé que les maximums des températures de surface se situent au voisinage de la sortie du contact. Les contraintes de Von Mises augmentent d'une manière notable lorsque les deux aspects, thermique et mécanique, sont couplés. L'augmentation de la vitesse de disque entraîne l'augmentation de la température et par la suite des contraintes équivalentes de Von Mises. Le temps d'établissement des températures augmente avec l'élévation de la charge appliquée et diminue avec l'augmentation de la vitesse.

# ETUDE DU COMPORTEMENT THERMOMECHANIQUE D'UN REVETEMENT ABRADABLE A BASE ALSI-PE SUR BARRES DE KOLSKY

S. Skiba<sup>1,2</sup>, B. Martinet<sup>1,2</sup>, A. Cappella<sup>2</sup>, L. Faure<sup>2</sup>, S. Philippon<sup>2</sup> et J. Papisidero<sup>1</sup>

1. Safran Aircraft Engines, Rond-Point René Ravaud, 77550 MOISSY CRAMAYEL, France

2. LEM3, Université de Lorraine, CNRS, Arts et Métiers ParisTech, F-57000 METZ, France

## MOTS CLES

Revêtement abrasable, Comportement dynamique, Barres de Kolsky, Température

## INTRODUCTION

Des joints d'étanchéités dits abrasables sont utilisés dans les turboréacteurs afin d'améliorer le rendement global en réduisant les jeux fonctionnels entre le rotor et le stator. La proximité ainsi permise entre les aubes tournantes et le carter augmente fortement les opportunités de contact. En conséquence, le joint d'étanchéité abrasable doit permettre d'accommoder ces interactions [1]. Dans ce système, le bout d'aube doit user préférentiellement le revêtement abrasable projeté thermiquement sur le carter sans subir d'endommagement.

Aujourd'hui, le seul moyen d'estimer l'efficacité d'un tel joint est de le tester sur des dispositifs expérimentaux spécifiques [2-6]. Par ailleurs, les simulations numériques des interactions entre le bout d'aube et le revêtement abrasable ont le potentiel d'optimiser l'efficacité des joints d'étanchéités dynamique avant de mener des investigations expérimentales coûteuses en temps et en moyens [7].

Cependant un des points critiques d'une telle approche est la connaissance du comportement thermomécanique des matériaux abrasables. Leur nature poreuse et hétérogène couplées aux conditions extrêmes de service du turboréacteur et à la difficulté de les reproduire rendent les essais mécaniques complexes. Cette étude présente des essais de compression dynamique sur barres de Kolsky, avec mise en température, sur un matériau abrasable à base aluminium-silicium polyester généralement utilisé dans le compresseur basse pression des turboréacteurs.

## TECHNIQUE EXPERIMENTALE

Un revêtement abrasable d'une dizaine de millimètres, à base d'aluminium-silicium et de polyester a été projeté par torche plasma atmosphérique sur des substrats métalliques. Pour créer des éprouvettes de géométrie cohérente avec les moyens d'essais utilisés, un protocole d'extraction d'échantillons cylindriques a été mis au point.

Les échantillons sont soumis à des essais de compression pour une large gamme de vitesse de déformation. Une machine de compression standard a été utilisée pour avoir accès aux vitesses les plus faibles ( $<10^{-1} \text{ s}^{-1}$ ). Les barres de Kolsky permettent d'accéder à des vitesses de déformations en compression de l'ordre de  $10^2$  à  $10^4 \text{ s}^{-1}$  [8]. La figure 1 schématise l'arrangement général du dispositif. L'ensemble de mise en température comprenant notamment un four tubulaire (température atteinte  $350^\circ\text{C}$ ) et un système de préhension robotisé permet la chauffe des éprouvettes et leur mise en place dans les barres de manière rapide (inférieur à une seconde) et répétable.

L'impact d'un projectile sur la barre incidente va créer une onde de compression élastique dite incidente, se propageant vers l'échantillon. La rupture d'impédance mécanique créée par l'échantillon engendre une transmission partielle de cette onde dans la barre de transmission définie comme l'onde transmise. Tandis que le reste de l'onde incidente est réfléchié en tant qu'onde de traction et représentera l'onde réfléchié. Des jauges de déformation localisées sur les barres mesurent les

déformations locales engendrées par les passages des différentes ondes. L'exploitation des mesures de ces jauges est basée sur la théorie de propagation d'ondes élastiques unidimensionnelles et permet de déduire l'état de contrainte, de déformation et de vitesse de déformation dans l'échantillon [9].

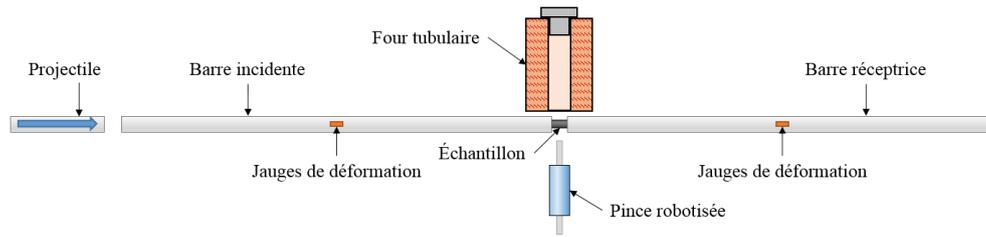


Figure 1: Arrangement des barres de Kolsky avec le système de chauffe de l'échantillon.

## RESULTATS & CONCLUSIONS

Un essai quasi-statique à  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$  à température ambiante a été réalisé pour servir de référence aux essais dynamiques. Ces derniers explorent une gamme de vitesse allant de  $1100 \text{ s}^{-1}$  à  $2200 \text{ s}^{-1}$ . La gamme d'essais en température réalisés sur les barres de Kolsky regroupe un essai à l'ambiante et des essais allant de  $100 \text{ °C}$  à  $350 \text{ °C}$  par pas de  $50 \text{ °C}$ .

Les signaux des jauges d'un essai à température ambiante à  $1100 \text{ s}^{-1}$  sont présentés en Figure 2a. Le dépouillement de cet essai abouti à la relation contrainte vraie-déformation vraie pour une vitesse de déformation en Figure 2b.

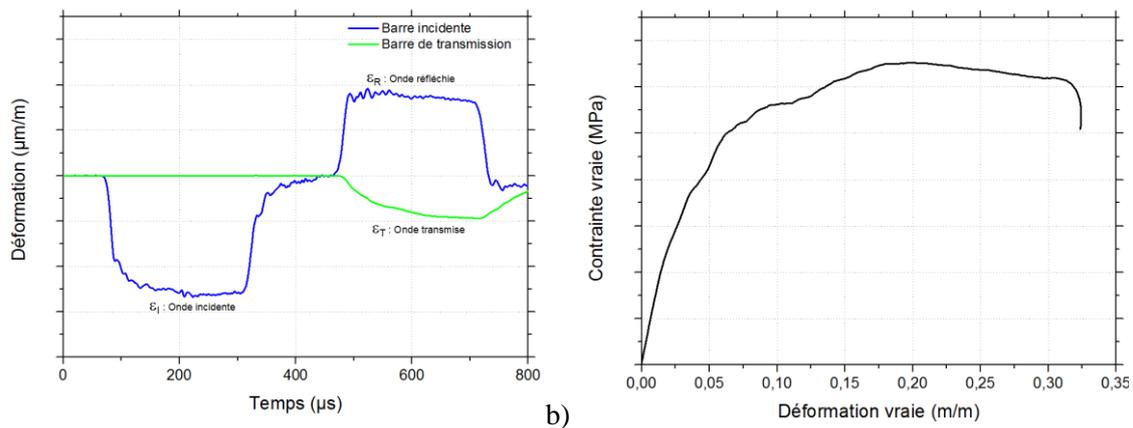


Figure 2: a) Signaux des jauges typiques d'un essai de compression dynamique sur revêtement abrasable base aluminium-silicium polyester. b) Courbe contrainte-déformation de l'essai.

Cette étude montre que les barres de Kolsky sont adaptées à la caractérisation du comportement en compression dynamique des matériaux abrasables à base AlSi-PE. Un comportement ductile aux hautes vitesses est observé avec l'établissement d'un plateau de contrainte entre 15% et 30% de déformation. Les essais montrent une insensibilité à la vitesse de déformation entre  $1100 \text{ s}^{-1}$  et  $2200 \text{ s}^{-1}$ . La sensibilité à la température se traduit par une diminution de la contrainte plateau d'un facteur supérieur à 4 entre l'ambiante et  $350 \text{ °C}$ .

## REFERENCES

- [1] M. Dorfman et al. (2002) *Gas turbines use 'abrasable' coatings for clearance control seals*, Sealing Technology, **2002** (1), pp. 7-8
- [2] M. Bounazef et al. (2007) *Blade protection and efficiency preservation of a turbine by a sacrificial material coating*, Advanced Powder Technology, **18** (2), pp. 123-133

- [3] U. Rathmann et al. (2007) *Sealing Technology – Rub Test Rig For Abrasive/Abradable Systems*, Proceedings of the ASME Turbo Expo
- [4] A. Dadouche et al. (2008) *Experimental Evaluation of Abradable Seal Performance at High Temperature*, Proceedings of the ASME Turbo Expo
- [5] R. Mandard et al. (2015) *Interacting force estimation during blade/seal rubs*, Tribology International, **82**, pp 504-513
- [6] J. Vincent et al. (2017) *Enhancement of an experimental method to measure accurately the evolution of forces during short-lived interactions : application to blade-abradable material contacts in turbomachines*, Measurement, **98**, pp 167-178
- [7] B. Berthoul et al. (2018) *Phenomenological modeling of abradable wear in turbomachines*, Elsevier, **98**, pp 770-785
- [8] H. Kolsky (1949) *An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading*, Proceedings of the Physical Society, Section B, **62** (11), pp 676-700
- [9] R. Davies (1948) *A critical study of the hopkinson pressure bar*, Philosophical Transactions of the Royal Society of London A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences, **240** (821), pp 375-457

## ÉTUDE TRIBOLOGIQUE DE PEEK VIERGE ET DE PEEK RENFORCÉ AVEC DES FIBRES DE VERRE

M. Doumeng<sup>1</sup>, F. Ferry<sup>1</sup>, K. Delbé<sup>1</sup>, T. Mérian<sup>1</sup>, F. Chabert<sup>1</sup>, F. Berthet<sup>2</sup>, O. Marsan<sup>3</sup>, V. Nassiet<sup>1</sup>, J. Denape<sup>1</sup>

1. Laboratoire Génie de Production (LGP), Université de Toulouse, INP-ENIT, Tarbes, France

2. Institut Clément Ader (ICA), Université de Toulouse, École des Mines, Albi, France

3. CIRIMAT, Université de Toulouse, INP-ENSIACET, Toulouse, France

### MOTS CLÉS

PEEK, fibre de verre, tribologie, spectroscopie Raman

### INTRODUCTION

Dans le domaine des transports et plus particulièrement de l'aéronautique, l'amélioration du rapport poids/puissance est capitale. Il est ainsi possible de remplacer des matériaux initialement en alliages métalliques par des matériaux polymères. Le PEEK est un excellent candidat pour participer à cette évolution des matériaux compte tenu de ces performances mécaniques [1-3]. Toutefois, les environnements parfois sévères poussent les élaborateurs à proposer des matériaux composites dont les renforts participent à l'émergence de propriétés mécaniques augmentées. L'étude proposée vise à présenter les propriétés tribologiques de ces matériaux en gardant à l'esprit qu'il s'agit de propriétés d'usage qui diffèrent par nature des propriétés mécaniques intrinsèques.

### DESCRIPTION DES ESSAIS

L'étude comparée de PEEK semi-cristallin (27 %) et de PEEK renforcés avec 30 % vol. de fibres de verre (PEEK-GF) a permis de décrire méthodiquement les mécanismes de dégradation observés lors du frottement entre une sphère en acier (440C, diamètre 9,5 mm). Les essais tribologiques ont été menés en frottement alternatif, sans lubrification, avec une charge normale de 25 N, une fréquence de 5 Hz et sur un débattement de 10 mm. Les mesures sont complétées par des analyses en microscopie électronique à balayage et en spectroscopie Raman pour déterminer l'origine des débris et à la nature du troisième corps généré par les deux couples de frottement acier/PEEK et acier/PEEK-GF. La spectroscopie Raman apporte dans cette étude une contribution originale car elle permet de déterminer le taux de la cristallinité du PEEK et son évolution entre le début et la fin des essais [4] avec la comparaison de l'intensité des bandes à 1146 cm<sup>-1</sup> (déformation du groupement -C-CO-C-) et à 1645 cm<sup>-1</sup> (allongement de la liaison C=O) [5]. La description du comportement de ces matériaux en frottement et usure tient compte ainsi des évolutions physico-chimiques consécutives au contact glissant.

### RÉSULTATS

L'ajout de fibres de verre ne fait pas significativement évoluer le coefficient de frottement entre PEEK semi cristallin ( $\mu = 0,33 \pm 0,02$ ) et PEEK-GF ( $\mu = 0,36 \pm 0,03$ ) mais entraîne des mécanismes de dégradation très différents. Les fibres de verre jouent le rôle d'éléments agressifs dans le contact et conduisent à la formation d'oxydes sur la contre face en acier, alors que dans le même temps elles participent à la rigidification du composite. Le lit de débris est essentiellement composé de polymère et de fibre de verre. Quelques particules d'acier y sont aussi détectées. Ce film tribologique protège le composite plan d'une dégradation excessive. Toutefois, la bille est martyrisée. Son usure est significative en présence de PEEK-GF alors qu'elle est indétectable dans le cas du PEEK pur. La spectroscopie Raman réalisée sur du PEEK semi cristallin (27 %) et du PEEK amorphe a mis en

évidence une augmentation du rapport des intensités entre les modes à 1146 et 1598  $\text{cm}^{-1}$ . Cette augmentation du rapport  $I_{1146}/I_{1598}$  est donc concomitante avec la diminution de la cristallinité (Figure 1). Des spectres enregistrés dans les traces d'usure (Figure 2) montrent que la cristallinité dans la zone usée du PEEK a diminué par rapport à celle du matériau non frotté.

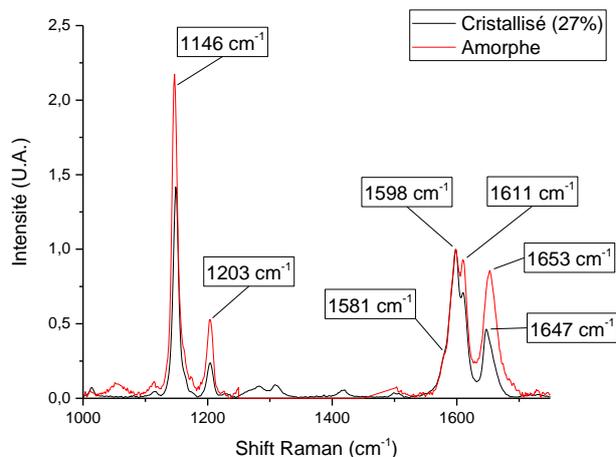


Figure 1 : Spectres Raman normalisés et indexés du PEEK amorphe et du PEEK semi-cristallin (27%)

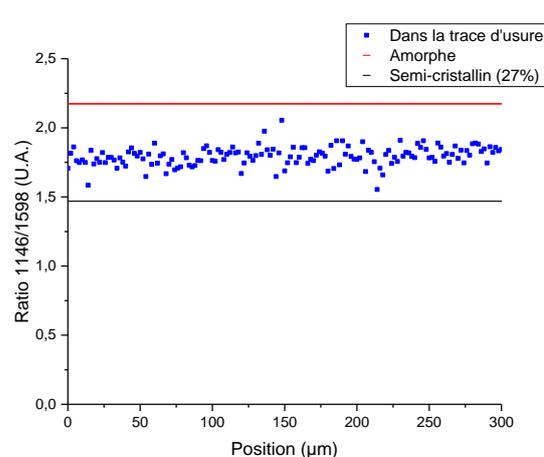


Figure 2 : Evolution de la cristallinité sur la moitié de la largeur d'une trace d'usure d'un PEEK semi-cristallin (27%)

## CONCLUSION

Bien que le renforcement par les fibres de verre soit favorable à une augmentation du module d'Young et des modules de cisaillement ( $G'$  et  $G''$ ) du composite à matrice PEEK semi-cristallin, il conduit à des résultats contrastés du point de vue tribologique. Le coefficient de frottement reste du même ordre de grandeur pour les deux matériaux. Toutefois, dans le cas du PEEK-GF, les fibres de verre détériorent la bille, provoquent la production de débris de polymère, de fibre et des particules d'oxyde qui s'incrustent dans le polymère ou qui sont évacués hors de la trace alors que ces mécanismes sont absents lors des essais avec le PEEK. En outre, la structure du PEEK dans la trace d'usure tend à évoluer vers une structure amorphe.

## Références

- [1] J. Song, Y. Liu, S. Wang, Z. Liao, W. Liu (2015) « *Study on the wettability and tribological behaviors of glass fiber reinforced poly(ether-ether-ketone) against different polymers as bearing materials for artificial cervical disc* », *Biotribology*, **4**, pp. 18-29.
- [2] J. P. Davim, R. Cardoso (2009) « *Effect of the reinforcement (carbon or glass fibres) on friction and wear behaviour of the PEEK against steel surface at long dry sliding* », *Wear*, **266** (7), pp. 795-799.
- [3] K. Friedrich, J. Karger-Kocsis, Z. Lu (1991) « *Effects of steel counterface roughness and temperature on the friction and wear of PEEK composites under dry sliding conditions* », *Wear*, **148** (2), pp. 235-247.
- [4] B. H. Stuart (1997) « *The application of Fourier transform Raman spectroscopy to polymer tribology* », *Spectrochimica Acta*, **53** (1), pp. 111-118.
- [5] J. K. Agbenyega, G. Ellis, P. J. Hendra, W. F. Maddams, C. Passingham, H. A. Willis, J. Chalmers (1990) « *Applications of Fourier transform Raman spectroscopy in the synthetic polymer field* », *Spectrochimica Acta*, **46A**, pp. 197-216.

# **Fabrication, Observation and Tribological Characterization of Acrylic Composite Materials for Bone Biomodel for Surgical Drilling**

**Y. Muramoto<sup>1,2</sup>, G. Bouvard<sup>2</sup>, M. Ohta<sup>3,4</sup>, V. Fridrici<sup>2</sup>, Ph. Kapsa<sup>2</sup>**

*1. Graduate School of Biomedical Engineering, Tohoku University, Japan*

*2. Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes (LTDS), UMR CNRS 5513 ECL-ENISE, Ecole Centrale de Lyon - Université de Lyon, France*

*3. Institute of Fluid Science, Tohoku University, Japan*

*4. ELYTmaX UMI 3757, CNRS – Université de Lyon – Tohoku University*

## **MOTS CLES**

Biomodel, Drilling, Bone, Composite

## **INTRODUCTION**

Biomodel plays a role in medical field such as evaluation of medical devices, preoperative planning, training for young doctors or obtaining informed consent from patients[1, 2]. Since the biomodel covers a broad range of use applications, a model that meets each purpose thus should be developed. Bone biomodels currently available in the market have not yet reached to reproduce unique mechanical properties of natural bone, despite the advantage of ease of handling or reproducibility compared to natural bone[3]. Moreover, the evaluation of medical devices especially in orthopaedics or dentistry includes not only static analysis but also dynamic analysis as represented by surgical drilling. Authors aim to develop acrylic composite materials for bone biomodel that show realistic mechanical / tribological behavior of natural bone. Tribological aspects of acrylic resin, polyurethane foam and porcine bones have previously reported[4]. In this study, acrylic composite materials were fabricated and studied in order to achieve the target model.

## **MATERIALS**

Poly(methyl methacrylate) (PMMA), so called acrylic resin, was chosen as a base of composite material. Obtained dental PMMA included monomer liquid and polymer powder (Miky liquid and Miky blue, Nissin Dental Products Inc.). PMMA was polymerized by quick polymerization method; mixing the monomer and the polymer. Additives shown in table 1 were obtained. Additives were respectively mixed with PMMA during the mixing step. The amount of each additive was indicated at weight ratio, which was defined as (Additive) / (PMMA + Additive). In addition, conventional bone biomodels made of polyurethane with 2 kinds of density (called PU20 and PU50) (Solid Rigid Polyurethane Foam, Pacific Research Laboratories, Inc., Vashon, WA, USA) were obtained as controls. Every sample was cut into a cube 20 mm on a side for drilling tests.

Porcine femoral bone was obtained by butcher. The bone shaft was taken out and cleaned. Then, the bone specimen was sunk in ethanol for a day, and dehydrated at room temperature.

## **METHODS**

Drilling tests were performed using a drilling tribometer (developed by LTDS, Ecole Centrale de Lyon based on a spindle Electrobroche SD 5084, Precise, France). Dental implant drill (Twist drill, Nobel Biocare Japan Co., Ltd) was used to reproduce surgical drilling for a series of tests. The implant drill had a diameter of 2.0 mm. machining conditions such as 1000 rpm of spindle speed, 20 N of thrust force and 10 mm of drilling depth were applied. Friction torque was recorded at a sampling rate of 100 Hz. Time and displacement were also measured. All the experiments were performed at room temperature without any fluid flow.

Table 1: Material lists prepared in this study

Number	Name, Combination ratio (Additive)/(Total weight)	Notation	Number	Name, Combination ratio (Additive)/(Total weight)	Notation
1	Acrylic resin, 100wt%	PMMA	8	Silica powder, 1wt%	SP
2	Wood flour, 4wt%	WF	9	Silica balloon, 3wt%	SB
3	Cellulose fiber, 10wt%	CF	10	Almina cement, 20wt%	Al
4	Cellulose nano fiber, 20wt%	CNF	11	Zirconia powder, 33wt%	Zr
5	Graphite powder, 10wt%	Gr	12	Polyurethane foam 20pcf	PU20
6	Silicone oil, 20wt%	S20	13	Polyurethane foam 50pcf	PU50
7	Silicone oil, 40wt%	S40	14	Porcine femoral bone	Bone

## RESULTS AND DISCUSSION

Figure 1 shows average maximum torque and drilling time for representative specimens. Acrylic composite materials show a variety of values of maximum torque and drilling time. PU20 and PU50 show relatively shorter drilling time, while bone shows longer drilling time compared to PMMA. It implies that the additives used have possibility of controlling drilling behavior respectively.

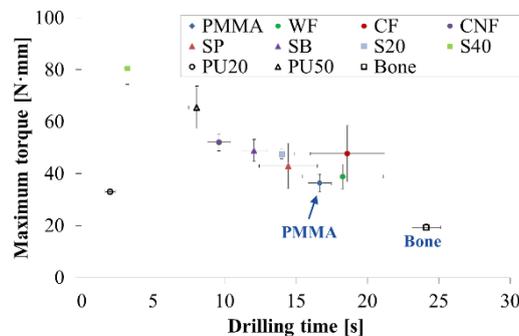


Figure 1: Average maximum torque and drilling time for each material from drilling tests

## CONCLUSION

Acrylic composite materials using various kinds of both organic and inorganic additives were successfully fabricated and then drilling tests were performed. The additives used in the present study can respectively differentiate the values on friction torque and drilling time, and therefore those additives are helpful to control a base material towards reproducing the drilling behavior of bone.

## Références

- [1] S. Lohfeld, V. Barron, and P. E. Mchugh (2005), “*Biomodels of Bone: A Review*” Ann. Biomed. Eng., vol. 33, no. 10, pp. 1295–1311.
- [2] P. Cosman, J. M. Hemli, A. M. Ellis, and T. J. Hugh (2007), “*Learning the surgical craft: A review of skills training options*” ANZ J. Surg., vol. 77, no. 10, pp. 838–845.
- [3] J.-T. Hausmann (2006), “*Sawbones in Biomechanical Settings - a Review*” Osteo and Trauma Care, vol. 14, no. 4, pp. 259–264.
- [4] Y. Muramoto, V. Fridrici, P. Kapsa, G. Bouvard, and M. Ohta (2015), “*Tribological aspects of drilling bone biomodel*” Proc. JIFT 2015, pp. 81–89.

## Acknowledgements

This work was partly supported by the JSPS Core-to-Core Program, the ImPACT Program, the Program for Leading Graduate Schools, IFS collaborative research project, the Program "Investissements d'Avenir" (ANR-11-IDEX-0007) operated by the French National Research Agency. ELyT Global is also acknowledged.

## **Fonctionnalisation de surface de finition cosmétique par modifications texturales et morphologiques induites par nano-peening**

**A. B. LEVY<sup>1</sup>, B.M. EL MANSORI<sup>2</sup>, C. S. MEZGHANI<sup>3</sup> et D. J. CABRERO<sup>1</sup>**

*1. Saint-Gobain C.R.E.E, 550 Avenue Alphonse Jauffret, 84300 Cavaillon, France.*

*2. Arts et Métiers ParisTech d'Aix-en-Provence, Laboratory of Mechanics, Surface and Materials Processing (MSMP-EA7350), 2 cours des Arts et Métiers, 13617 Aix-en-Provence – France*

*3. Arts et Métiers ParisTech de Châlons-en-Champagne, Laboratory of Mechanics, Surface and Materials Processing (MSMP-EA7350), Rue Saint-Dominique, 51000 Châlons-en-Champagne – France*

### **MOTS CLES**

Nano-peening, Grenailage de finition, Fonctionnalisation, Texturation.

### **INTRODUCTION**

Le grenailage de finition (ou Cosmetic finishing) est une application récente du grenailage. Cette étape intervient en fin de processus industriel et permet, par exemple, de fonctionnaliser la surface en terme de propriétés optiques. De nombreux industriels cherchent à maîtriser la réflexion spéculaire des métaux tout en limitant la déformation des pièces. En ce sens, il est possible de texturer les surfaces via un procédé de « nano-peening » qui favorise l'obtention d'un ensemble d'état de surface répondant aux attentes de son fonctionnel cosmétique.

Cet article s'attachera à montrer le lien intrinsèque entre la réalisation d'une surface fonctionnelle et le procédé de grenailage au travers de la cratérisation des signatures surfaciques générées.

### **METHODE**

Des particules en céramique parfaitement connues (densité, dureté, dimension...) permettront de réaliser le traitement des cibles.

Les cibles en Al 6063 sont grenillées sous différentes conditions dans une grenailleuse à venturi. Les paramètres procédés tels que l'intensité Almen, le taux de recouvrement et la pression de grenailage sont déterminés.

Toutes les données précédentes sont corrélées avec des mesures de brillance pour déterminer l'impact du mélange de média et des procédés machines sur la texture de la surface. Les surfaces, après opération de grenailage, sont caractérisées grâce à un suivi du gloss, de la rugosité et des observations MEB.

### **CONCLUSION**

Cette étude a révélé qu'il était possible d'obtenir des surfaces cosmétiques uniques à partir d'un procédé de nano-peening. Ce dernier, par une optimisation fonctionnelle des paramètres du procédé, crée une texturation unique de la surface qui oriente la lumière à l'origine de ces rendues visuelles particulières. Ces travaux ont mis en lumière de manière indéniable la corrélation entre propriétés de la charge active et morphologie transmise à la cible.

## **INFLUENCE D'UN TRAITEMENT DE SURFACE PAR VOIE CHIMIQUE SUR UN ALLIAGE DE TITANE TA6V**

**C. Perderiset<sup>1</sup>, F. Georgi<sup>1</sup>, J.-L. Bouvard<sup>1</sup>, P. Montmitonnet<sup>1</sup>, A. Grunenwald<sup>2</sup>, V. Joudon<sup>2</sup>**

*1. MINES ParisTech, membre de PSL\* - CEMEF – CNRS UMR7635, Sophia Antipolis, France*

*2. Division Matériaux et Procédés, Safran Aircraft Engines, Moissy Cramayel, France*

### **MOTS CLES**

Titane et alliages, mise en forme, traitement de surface, adhésion

### **INTRODUCTION**

Depuis toujours, les secteurs de pointe tels que l'automobile ou l'aéronautique cherchent à alléger leurs structures afin de limiter la consommation en carburants, sans perdre en performances mécaniques. Dans cette optique, les matériaux composites sont de plus en plus utilisés pour des applications structurales. Parmi ces applications, le moteur LEAP récemment co-développé par Safran Aircraft Engines et General Electric intègre le collage structural d'un renfort en titane TA6V sur le bord d'attaque d'une aube fan composite à l'aide d'un primaire et d'un adhésif.

Préalablement au collage structural, une attaque chimique de la surface du titane est systématiquement réalisée [1 – 2].

Notre étude s'intéresse à l'influence du procédé de mise en forme de ces renforts sur la microstructure observée après décapage chimique en milieu alcalin. Celle-ci a été caractérisée par des techniques déjà utilisées dans la littérature : MEB-FEG, EDS, XPS et rugosimétrie optique [3]. Au vu de la différence microstructurale importante observée, la seconde partie de cette étude a consisté à caractériser la couche d'oxyde fragile et formée sur le titane après décapage, retirée par le biais d'un scotch en s'inspirant de la norme NF EN ISO 2409.

### **INFLUENCE DU PROCEDE SUR LA MICROSTRUCTURE APRES DECAPAGE**

Deux renforts en titane TA6V ont été obtenus respectivement par formage pour l'un et par forgeage pour l'autre, à partir de semi-produits différents en provenance du même fournisseur. Il a été remarqué sur la Figure 1 une importante différence d'aspect de surface entre ces deux renforts ayant pourtant subi le même traitement de décapage en milieu alcalin.

Les oxydes créés en surface présentent des morphologies différentes, l'une plutôt grossière en forme de « pétales » (Fig.2.a) et l'autre avec un aspect un peu « poudreux » (Fig.2.b). Les observations à plus fort grossissement ont révélé qu'il s'agit dans le cas de la Fig.2.b d'une morphologie lamellaire très fine, alternativement composée de lamelles en relief (~ 30 nm) espacées de ~ 300 nm. Cette morphologie résulte de la structure partiellement lamellaire du TA6V et d'une attaque différentielle des deux phases.

### **ETUDE DE L'OXYDE SUR UN SCOTCH NORMALISE**

Le ruban adhésif a été appliqué manuellement puis retiré des surfaces oxydées. Le taux surfacique et la morphologie des particules de titane ont été analysés par Microscopie Electronique à Balayage (MEB). La Figure 3 présente des cartographies élémentaires obtenues par dispersion en énergie des rayons X (EDS), afin de révéler les particules de TA6V présentes sur le scotch.

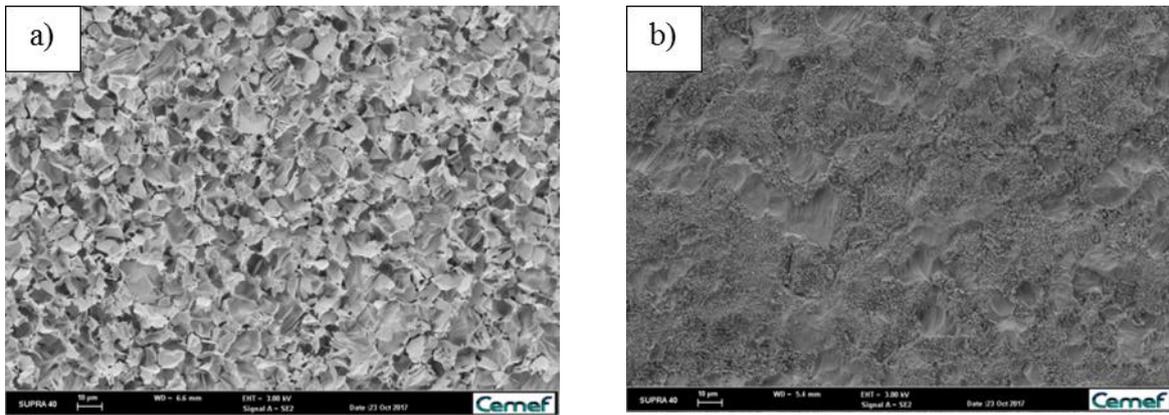


Figure 1 : Différence d'aspect après décapage observée entre un renfort a) formé et b) forgé (la barre d'échelle représente 10 µm)

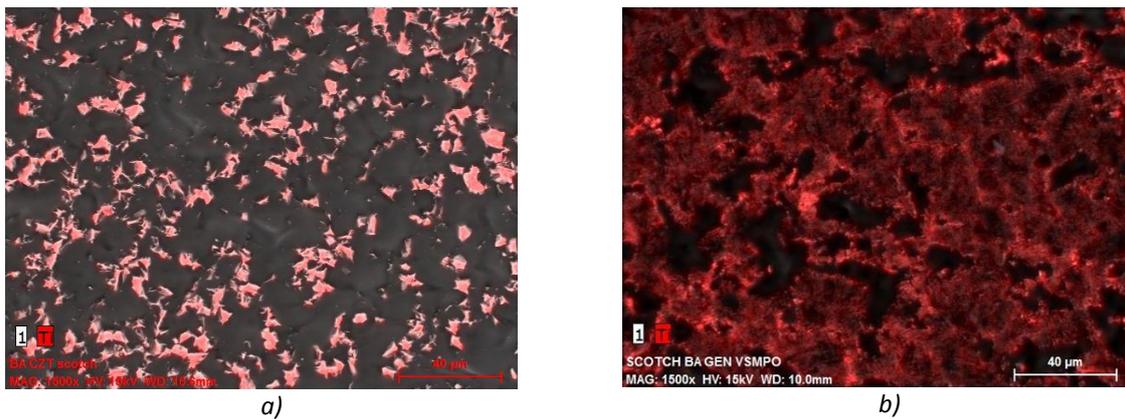


Figure 2 : Particules sur le scotch : a) le renfort formé et b) le renfort forgé

Les particules ne présentent pas la même morphologie. 63% de la surface du scotch est recouverte de titane pour le renfort forgé (Fig.3.b) contre 23% pour le renfort formé (Fig.3.a).

## CONCLUSION

Ces travaux ont révélé les différences de microstructures induites par les procédés de mise en forme du TA6V. Ceci influe directement sur la morphologie de la surface oxydée après décapage alcalin. Ainsi, le renfort formé qui donne une microstructure plus rugueuse conduit après décapage à un retrait de grosses particules de titane en faible proportion sur le scotch, différent de celui du renfort forgé (fines particules de titane mais en plus grande proportion surfacique).

Ce travail présente l'originalité d'aborder l'influence du procédé de mise en forme du TA6V. Dans la suite, les propriétés finales d'adhésion seront étudiées en lien avec ces paramètres.

## Références

- [1] C. Matz. (1988). **Optimization of the durability of structural titanium adhesive joints.** *International journal of adhesion and adhesives*, 8, pp. 17 – 24.
- [2] M. Marín-Sánchez, A. Conde, M. García-Rubio, A. Lavia, and I. García. (2016). **Durability of titanium adhesive bonds with surface pretreatments based on alkaline anodisation.** *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 70, pp. 225-233.
- [3] T. Mertens, and H. Kollek, (2010). **On the stability and composition of oxide layers on pre-treated titanium.** *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 30, pp. 466-477.

## La tribologie pour les connexions OCTG ; Analyse Thermique des Essais Falex et Couronne/Couronne

N. Marouf<sup>1</sup>, X. Cauvin<sup>1</sup>, C. Charlier<sup>1</sup> et E. Desdoit<sup>1</sup>

1. Vallourec Research Center France

### MOTS CLES

Thermique, Grippage, Plasticité

### INTRODUCTION

Pour proposer des solutions d'assemblage respectueuses de l'environnement, Vallourec développe la gamme de produit CLEANWELL®. Pour remplacer les graisses de vissage tout en protégeant efficacement du grippage et de la corrosion, ces produits sont constitués d'un empilement de revêtements incluant une couche de polymère. Un des enjeux majeurs dans le développement d'une nouvelle solution tribologique pour les connexions filetées utilisées pour la production du pétrole et du gaz est l'évaluation des performances en grippage et en endurance ainsi que des lois de frottement.

Pour limiter le nombre d'essais sur connexions, la sélection d'essais tribologiques pertinents est cruciale. L'un des jeux majeur de cette sélection est la maîtrise de la température des surfaces de contact pendant l'essai. Celle-ci a un effet important sur les propriétés mécaniques d'un revêtement polymérique et sur l'apparition du grippage. Dans cette présentation l'essai pin & vee block et un essai de type couronne/couronne développé au LTDS seront analysés sous l'angle de leur comportement thermique.

### Thermique de l'essai Pin & Vee block à faible vitesse

Dans ce travail, des essais de pin & vee ont été réalisés à des niveaux de puissance inférieurs à 10W en utilisant des vitesses et des charges faible (10-120 tr.min<sup>-1</sup>, 800-1500 N). Une première série d'essai a été réalisée en instrumentant les Vees Block avec des thermocouples positionnés à différentes distances de la surface testée. Ces essais ont permis de mettre en valeur une dépendance de la température à la puissance et des gradients de température importants.

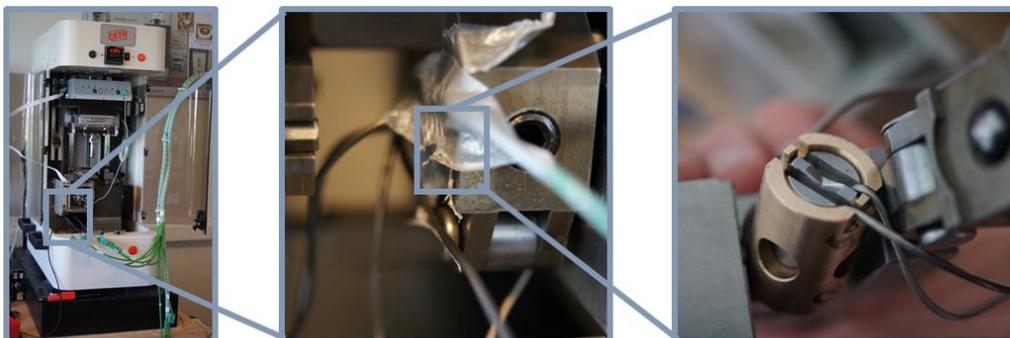


Figure 1 : Instrumentation de l'essai Pin & Vee Block

Pour estimer de manière plus directe la température dans le contact, une méthodologie originale a été mise en place. L'idée est d'utiliser des revêtements présentant une transition thermique de leur comportement tribologique. Ainsi deux types de cire ont été utilisés. Pour déterminer l'évolution du comportement tribologique, des essais de rayures ont été réalisés à différentes

températures. Ensuite des essais de pin & vee à puissance croissante ont été réalisés et ont permis d'identifier, pour chaque cire, une puissance à laquelle une discontinuité de la valeur de coefficient de frottement est observée. Cette transition correspond à la fusion de la cire. Ces essais ont donc permis de mieux connaître les conditions de test et ainsi une meilleure interprétation des résultats d'essais.

### ANALYSE THERMIQUE DE L'ESSAI COURONNE/COURONNE

L'essai couronne/couronne développé au LTDS permet d'évaluer le comportement au grippage de différente solution tribologique. Pour comprendre l'impact de la rhéologie de l'acier sur les modes de plastification dans le contact, un modèle thermomécanique a été réalisé. Les lois de comportement de différents matériaux ont été obtenues en utilisant le logiciel JMatPro. Et les différentes conditions de test ont été explorées (vitesse de rotation et force normale). L'étude de la plasticité et des régimes transitoires où une augmentation de température est observée ont permis d'identifier les régimes de plastification suivants :

- 1) absence de déformation plastique
- 2) apparition d'une déformation plastique sous-jacente
- 3) déformation plastique sous-jacente initiale
- 4) apparition de déformation plastique en surface
- 5) déformation plastique en surface initiale

Ce travail a permis de tracer sur le plan [vitesse de rotation, force normale] une carte de réponse en plasticité. Les cartes de réponse de différents matériaux ont ensuite été construites. Ces résultats soulignent l'importance des valeurs de conductivité thermique et de la stabilité de la limite d'élasticité avec l'augmentation de température sur les modes de plasticité obtenus.

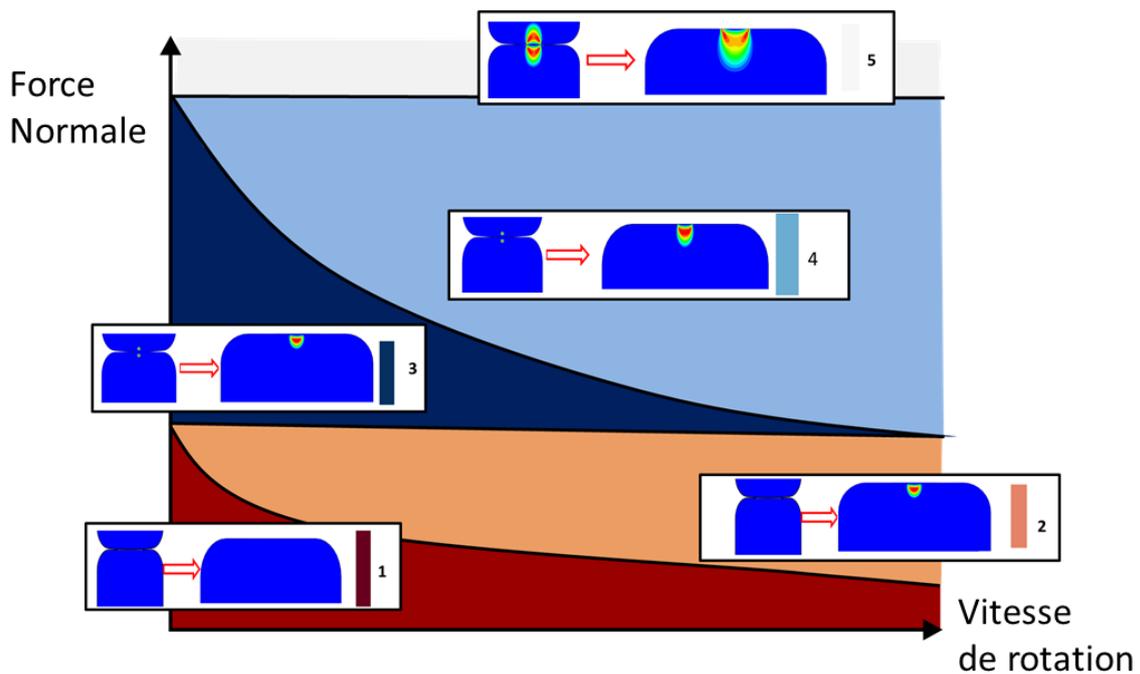


Figure 2 : Cartographie des modes de déformation plastique dans l'essai couronne/couronne

# NOUVEAU TRIBOMETRE POUR FROTTEMENT A SEC SOUS HAUTE PRESSION EN CONDITIONS QUASI-STATIQUES

Clément DUREAU<sup>1,2</sup>, Roxane MASSION<sup>1,2</sup>, L. FAURE<sup>1,2</sup> et S. PHILIPPON<sup>1,2</sup>

1. Laboratoire d'Etude des Microstructures et de Mécanique des Matériaux (LEM3), UMR 7239, CNRS / Université de Lorraine, Metz, France

2. Laboratory of Excellence on Design of Alloy Metals for low-mAss Structures (DAMAS), Université de Lorraine, Metz, France

## MOTS CLES

Frottements, haute pression, hyper-déformations, alliages d'aluminium.

## RÉSUMÉ

Le frottement est un élément clé pour les procédés de mise en forme qui utilisent le contact entre les matériaux. Il est donc important de connaître leurs interactions afin d'être capable d'augmenter ou de diminuer le frottement en cas de besoin.

Ces dernières années, une collaboration entre le LEM3 et le LABPS, deux laboratoires messins, a permis de concevoir un premier prototype afin de mettre en évidence et de vérifier les coefficients de frottement dans les mêmes conditions d'essai que les procédés d'hyper-déformations (Severe Plastic Deformation) qui nous intéressent [1,2].

Le but de ce récent travail est de présenter le développement d'un nouveau tribomètre fonctionnant dans des conditions spécifiques: hautes pressions et faibles vitesses de glissement.

Des mesures ont été réalisées pour obtenir les coefficients de frottement en fonction de la pression normale sur des matrices rectifiées. Les échantillons étaient des alliages d'aluminium (Al 1050 et Al 1370). Les essais ont été effectués à température ambiante, dans des conditions de contact quasi statique et à sec. Des pressions très élevées ont été appliquées jusqu'à 2000 MPa, afin de reproduire les conditions d'essai dans les procédés d'hyper-déformations (ECAP, HPT, ...).

Les résultats obtenus ont montré une diminution des coefficients de frottement avec la contrainte normale appliquée. Ces valeurs vont à présent être implémentées dans des codes de simulations par éléments finis afin d'ajuster au mieux les modélisations des procédés d'hyper-déformations.

## Références

[1] Pougis, Philippon, Massion, Faure, Fundenberger, Toth (2013) « *Dry friction of steel under high pressure in quas-static conditions* », Tribology International, Vol. 67, pp. 27-35.

[2] Pougis, Fundenberger, Faure, Philippon, Arruffat (2012) « *Mesure du coefficient de frottement sec sous haute pression – Application aux procédés d'Hyperdéformation* », JIFT2012, Aix-en-Provence, France.

*Présentation sur poster souhaitée*

# TRANSITION VERS LE GLISSEMENT D'INTERFACES TEXTUREES

M. De Souza<sup>1</sup>, D. Dalmas<sup>1</sup>, J. Scheibert<sup>1</sup>

1. Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes, LTDS, Univ Lyon, Ecole Centrale de Lyon, ENISE, ENTPE, CNRS, UMR5513, Ecully, France

## MOTS CLES

Frottement, Aire de contact réel, Texturation

## CONTEXTE

Le frottement est un phénomène largement observé dans les systèmes d'ingénierie [1]. Au cours de ces trente dernières années, l'étude de ce phénomène a permis de fournir une image relativement satisfaisante du chargement statique d'un contact en cisaillement et du régime de glissement établi lorsque deux solides sont en mouvement. Néanmoins, la transition du frottement statique au frottement cinématique reste encore peu comprise d'autant plus lorsque du désordre est introduit à l'interface (rugosité, chimie de l'interface, ...) [2-4]. Une meilleure compréhension du passage entre ces deux régimes de frottement est cependant cruciale dans divers domaines allant des problèmes d'usure dans les nano-dispositifs aux problèmes de tremblements de terre ou de contact plus classiques (ex : pneu sur route ou piston/seringue).

Dans ce contexte, nous avons étudié ce régime transitoire dans des interfaces texturées. L'objectif est d'introduire progressivement un désordre contrôlé dans une interface glissante à méso-échelle pour pouvoir étudier son impact lors de test de mise en glissement via des mesures et des observations in-situ.

## METHODE

L'observation *in situ* de l'aire de contact réelle dans une interface est une méthode efficace pour comprendre la dynamique de mise en glissement de celle-ci [4-7]. Par conséquent, nous avons réalisés des essais sur un tribomètre développé au laboratoire qui permet ce type d'observations in-situ entre un frotteur (Sphère unique, multi-sphères, plan rugueux, etc...) en polydiméthylsiloxane réticulé (PDMS) et un plaque de verre lisse à différentes charges normales (Figure 1).

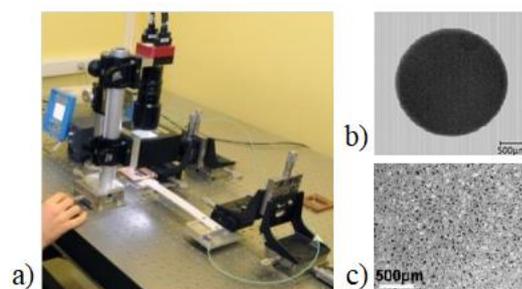


Figure 1: Tribomètre d'observation *in situ* (a). Vue *in situ* de mono-contact (en noir) dans une interface lisse PDMS/Verre (b.) Vue *in situ* des multi-contacts (en noir) dans une interface rugueuse PDMS/Verre (c).

## ANALYSE

Dans cette étude, nous discuterons du rôle du désordre dans la mise en glissement pour différentes configurations de contact allant d'un mono-contact sphérique modèle au cas des interfaces rugueuse plus réalistes.

Pour introduire un désordre maîtrisé dans nos interfaces, deux techniques de texturation ont été utilisées et combinées. La première est basée sur le dépôt de différentes couches minces par pulvérisation magnétron (procédé de dépôt physique en phase vapeur) à travers un masque sur un substrat de verre pour modifier localement les propriétés de frottement de l'interface sans modifier la topographie. La deuxième est basée sur des modifications topographiques effectuées par micro-fraisage pour reproduire une rugosité avec une géométrie contrôlée.

Finalement, nous montrerons qu'il est possible d'optimiser la texturation pour permettre l'émergence et la détection de précurseurs au glissement suffisamment en avance par rapport au glissement macroscopique globale de l'interface.

## Références

- [1] B.N.J. Persson (2000) « *Sliding friction: physical principles and applications* », Springer, Berlin
- [2] C. Cattaneo (1938) « *Sul contatto di due corpi elastici : distribuzione locale degli sforzi* », Rend. Accad. Naz. Lincei, **27** (6), pp. 342–348.
- [3] R. D. Mindlin (1949) « *Compliance of elastic bodies in contact* », J. of Appl. Mech., **16**, pp. 259-268.
- [4] A. Prevost, J. Scheibert, G. Debrégeas (2013) « *Probing the micromechanics of a multi-contact interface at the onset of frictional sliding* », European Physical Journal E, **36** (2), pp.1–4.
- [5] B. A. Krick, J. R. Vail, B. N. J. Persson, W. G. Sawyer (2012) « *Optical in situ micro tribometer for analysis of real contact area for contact mechanics, adhesion, and sliding experiments* », Tribol. Lett., **45** (1), pp. 185–94.
- [6] O. Ben-David, G. Cohen, J. Fineberg (2010) « *Short-time dynamics of frictional strength in dry friction* », Tribol. Lett., **39** (3), pp. 235–245.
- [7] R. Sahli, G. Pallares, C. Ducottet, I. E. Ben Ali, S. Al Akhrass, M. Guibert, J. Scheibert (2018) « *Evolution of real contact area under shear and the value of static friction of soft materials* », Proceedings of the National Academy of Sciences, **115** (3), pp. 471-476.

# Tribocorrosion of Nickel in Citrate Buffer Solution Sliding against Alumina

Junxiao Du<sup>1</sup>, Shoufan Cao<sup>1</sup>, et Stefano Mischler<sup>1</sup>

1. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Tribology and Interface Chemistry Group (SCI-STI-SM), Station 12, 1015 Lausanne, Switzerland

E-mail address : junxiao.du@epfl.ch (J. Du)

## MOTS CLES

Tribocorrosion; nickel; alumina; polishing wear; surface roughness

## INTRODUCTION

The degradation rate of passive metals worn in corrosive solutions is usually significantly higher than the situations without wear due to the continuous remove and regeneration of passivation films [1,2]. Therefore, tribocorrosion studies focus on the complex interaction between wear and corrosion.

As a typical passive metal, nickel offers great corrosion resistance together with high strength and ability to maintain hardness at elevated temperatures [3]. Nickel is used to provide hardwearing decorative and engineering coating as nickel-plating [4], which encounters tribocorrosion issues.

The aim of this work was to evaluate the tribocorrosion behaviour of pure nickel under the controlled chemical and electrochemical conditions and rationalize the tribocorrosion results using existing tribocorrosion models.

## EXPERIMENTS

The tribocorrosion experiments were performed on a reciprocating tribometer incorporated with electrochemical set-up. The pure nickel disk was rubbed by alumina ball in citrate buffer solution (pH 4.5) at potentiostatic condition at room temperature. The applied load was 2.74 N. The sliding distance was 5 mm and the frequency was 1 Hz. A dwell time of 0.25 s was applied at the end of each stroke, which resulted in a sliding speed of 20 mm/s. Different potentials were selected from the polarisation curve: two in passive domain ( $-0.1 V_{MSE}$  and  $0.4 V_{MSE}$ ) and one in cathodic domain ( $-1.5 V_{MSE}$ ).

Friction and anodic current were recorded spontaneously during the rubbing. The worn surfaces of both nickel and alumina samples were observed using a white light interferometer and from which the total wear volumes were determined. Chemical wear was calculated from the current and mechanical wear was determined as the different between total wear and chemical wear.

## RESULTS

The coefficients of friction (CoF) for all experiments in passive domain were between 0.3 and 0.4. The CoF in cathodic domain was lower at around 0.2.

The wear results didn't show clear difference on the wear of nickel between the two passive potentials. The wear of nickel at cathodic potential was found significantly reduced. Surprisingly, wear was found on the alumina balls. The wear volume of the alumina ball was approximately 10% of the wear of the nickel samples.

For the topography of the worn surfaces, both of the nickel disks and the alumina balls showed a lot of scratches inside the wear track along the sliding direction. However, from Fig1.a.b, between the scratches and on the wall of the scratches, the surface was very smooth. This clearly showed a polishing wear mechanism, which is also manifested by the high conformity between the ball and disk worn surfaces (Fig1.c).

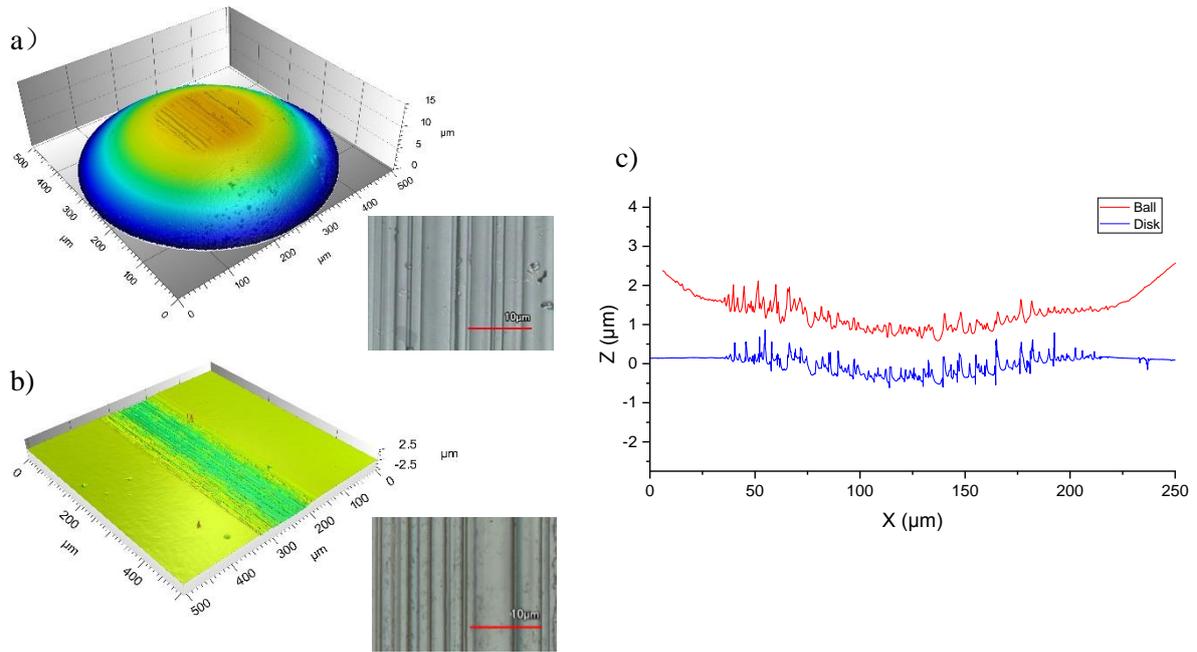


Figure 1: a) 3D Profile of Alumina Ball; b) 3D Profile of Nickel Disk; c) Line Profile at Contact Area

Finally, these results were attempted to be rationalised through a tribocorrosion model which incorporated the surface roughness effect on tribocorrosion of passive metals.

## REFERENCES

- [1] Mischler, S. (2008) « *Triboelectrochemical techniques and interpretation methods in tribocorrosion: a comparative evaluation.* » Tribology International 41.7, pp. 573-583.
- [2] Ponthiaux, P., et al. (2004) « *Electrochemical techniques for studying tribocorrosion processes.* » Wear 256.5, pp. 459-468.
- [3] Takadom, J. (1996) « *The influence of potential on the tribocorrosion of nickel and iron in sulfuric acid solution.* » Corrosion science 38.4, pp. 643-654.
- [4] Sharma, A. K., et al. (1998) « *Electroless nickel plating on magnesium alloy.* » Metal finishing 96.3, pp. 10-19.

## VARIATION DE LA RUGOSITE ET SON EFFET SUR LE COMPORTEMENT TRIBOLOGIQUE

H. Bouhabila<sup>1,2</sup>, A. Bouchoucha<sup>1</sup>, R. Benzerga<sup>3</sup>, C. Le Paven<sup>3</sup>

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

2 Département de Génie Mécanique, Faculté des Sciences et sciences appliqués, Université Oum el bouaghi, Algérie

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

### MOTS CLES

Rugosité, Tribologie, Frottement, Usure, Contact tribologique

### INTRODUCTION

En production industrielle, l'objectif est d'obtenir une qualité meilleure en produit définie par la rugosité. L'état de surface est l'un des caractéristiques mécaniques les plus pertinentes dans la coupe des métaux, puisqu'il représente la phase de contrôle finale du cycle de production [1].

Il est donc nécessaire de choisir le métal le plus performant, et de définir l'influence des facteurs (vitesse de coupe  $V_c$ , vitesse d'avance  $f$  et rayon de bec  $R_c$ ) dans la coupe afin d'en choisir les plus appropriés qui permettent d'atteindre la qualité des surfaces désirée [2, 3].

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.

L'étude tribologique du couple acier-acier: 42CrMo4-20MnCr5, a été réalisée en fonction de la rugosité ( $R_a$ ) résultat de la coupe du même cylindre monté sur le mandrin d'un tour en contact permanent avec un pion. Le coefficient de frottement  $\mu$  (sec ou lubrifié) et le taux d'usure  $W$  (perte de masse du pion) sont déterminés grâce à un dispositif d'acquisition.

Le traitement et les résultats constatés sont présentés dans la suite de ce travail.

### ETUDE EXPERIMENTALE

9 pistes ont été réalisées sur un disque de nuance 42CrMo4 et de dimensions (de diamètre  $\phi = 40$  mm, de longueur  $L = 134$  mm) avec différents paramètres de coupe choisis : la vitesse de coupe ( $V_c$ ) variant de 800 à 1600 m.min<sup>-1</sup>, une vitesse d'avance d'outil ( $f$ ) variant de 0.1 à 0.2 mm.tr<sup>-1</sup> et un rayon de bec de l'outil ( $R_c$ ) variant de 0.5 à 1.5 mm. L'opération effectuée est le chariotage en finition de 0.5 mm de passe sur un tour parallèle [4]. La deuxième pièce est un pion de nuance 20MnCr5 et de dimensions ( $\phi = 10$  mm,  $L = 20$  mm), voir figure1.

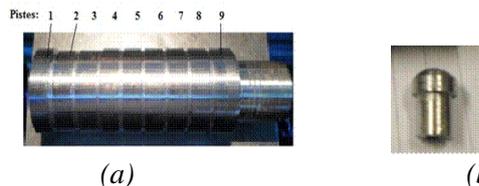


Figure 1 : Pièces usinées : (a) Cylindre de nuance 42CrMo4 et (b) Pion de nuance 20MnCr5

Le principe est de réaliser dans la surface du cylindre des rugosités différentes réparties en plusieurs pistes, en contact permanent avec un pion, afin d'étudier le comportement tribologique en frottement et en usure.

## COMPORTEMENT TRIBOLOGIQUE

L'étude tribologique du couple acier-acier de nuances (42CrMo4 et 20MnCr5) a été réalisée en utilisant un tribomètre pion-cylindre équipé d'un dispositif d'acquisition figure 2 [5]. Les essais se sont déroulés dans une ambiance atmosphérique. Les essais à secs ont permis d'obtenir des valeurs du coefficient de frottement ( $\mu$  proche de 0.9). C'est la raison pour laquelle, on a utilisé de l'huile commerciale 20W40 pour lubrifier le contact dynamique [6]. Dans ces conditions,  $\mu$  diminue ( $\mu = 0.4$ ) figure 2 (b).

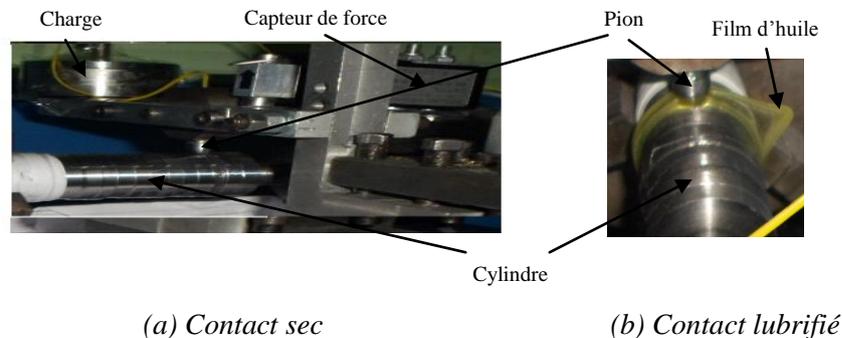


Figure 2 : Contact pion-cylindre

## CONCLUSION

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

- Suite à l'essai tribologique, une diminution de la valeur maximale de la rugosité  $R_z$  (issue de l'usinage) et disparition des pics dues aux fortes contraintes de cisaillement au niveau des aspérités.
- Une variation du coefficient de frottement et du taux d'usure (sec ou lubrifié) qui dépendent de la rugosité de surface en contact de la piste du cylindre.
- Après essai à sec, présence des microfissures (le long des surfaces usées) et des débris d'usure sous formes de bourrelets aux bords des surfaces du pion ce qui explique la facilité d'enlèvement de matière.
- Pendant la déformation plastique, présence des oxydes dus à l'augmentation de la température.
- Afin de faciliter le glissement des surfaces en contact, on a 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] R. Suresh (2012), « *Some studies on hard turning of AISI 4340 steel using multilayer coated carbide tool* », Measurement, vol (45), pp. 1872–1884.
- [4] M. Sortino (2013), « *Dry turning of sintered molybdenum* », Journal of Materials Processing Technology, vol (213), pp. 1179–1190.
- [5] Y. Mouadji (2013), « *Effets du courant électrique sur le mécanisme de croissance de la couche d'oxyde à l'interface des contacts électrodynamiques cuivre-graphite et graphite-graphite* », thèse de doctorat, Université Constantine 1,
- [6] T. Leppert (2011), « *Effect of cooling and lubrication conditions on surface topography and turning process of C45 steel* ». International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol (51), pp. 120–126.

## WEAR OF ELASTOMERIC AUTOMOTIVE BELTS

L.Montalban<sup>1\*</sup>, I. Lahouij<sup>1</sup>, P.Montmitonnet<sup>1</sup>, K. Le Gorju<sup>2</sup>, D.Tricoche<sup>3</sup>

1. MINES ParisTech, membre de PSL\* - CEMEF – CNRS UMR7635, Sophia Antipolis, France

2. Hutchinson Research and Innovation Center, 2 rue Gustave Nourry, 45120 Chalette sur Loing, France

3. Hutchinson Transmission Systems, 23 Rue des Martyrs, 37300 Joué-lès-Tours, France

### KEYWORDS

Elastomers, wear, friction

### ABSTRACT

Poly-V belts are flexible members used for power transmission between rotational elements of a machine (see figure 1). A typical application of these belts is power transmission in automobile engine drives due to their compact mechanical structure, operating stability, high power transmission capacity, reduced noise, inexpensive maintenance and low production cost. The main factor that limits the lifetime of the belts is wear.

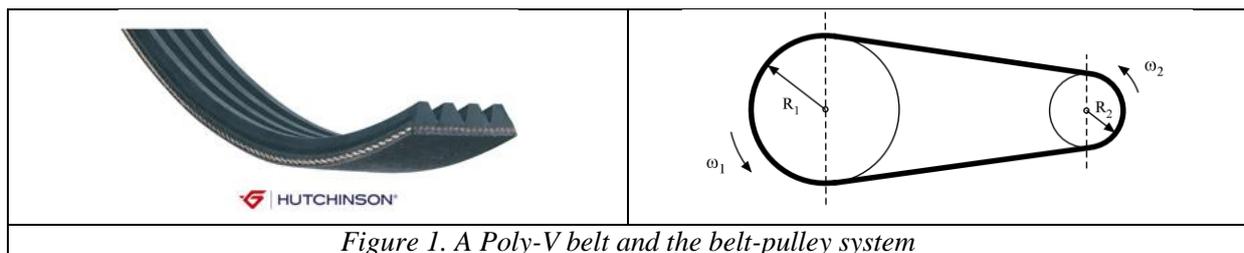


Figure 1. A Poly-V belt and the belt-pulley system

Wear is inevitable because friction between the belt and the pulley is needed for the transmission of momentum. Additionally, a slip induced by the resistant torque between the belt and the pulley, contributes significantly to the wear. Operating conditions also play an important role on the increase of the wear rate. For automotive engines, the initial tension, the temperature produced by the sliding and mechanical dissipation as well as the periodic irregularities on the rotation of the crankshaft (acyclism) can produce significant damage to the surface of the belts. Consequently, premature failure of power transmission belts might lead to an increase in costs due to the continuous maintenance and replacement of worn out components.

The aim of this study is to understand the wear mechanisms of the surface of the present Poly - V belts. First, the wear features of the Poly-V belts were identified by optical characterization. The surface of the Poly-V belts abraded under real operating conditions was observed using Scanning Electron Microscopy (SEM).

Secondly, the influence of operating parameters on the morphology of the abraded surface and wear properties was investigated. Abrasion tests were carried out in a pin on disc tribometer in order to reproduce the wear mechanisms previously identified for our Poly-V belts. Normal load and sliding

velocity were used as control parameters, whereas wear properties such as the temperature at the contact and the coefficient of friction (COF) were measured during the wear test (see figure 2). In addition, the volume loss was calculated using the wear track profile after the test.

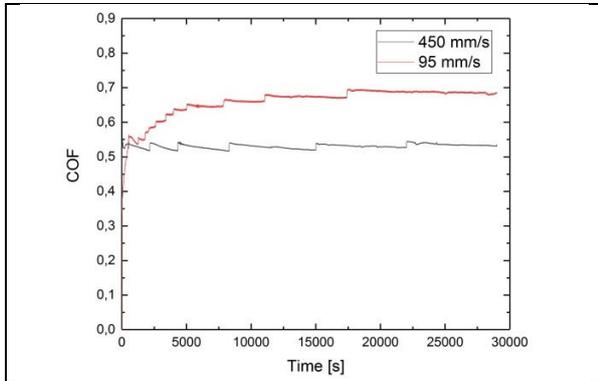


Figure 2. Evolution of the COF with time for different sliding velocities

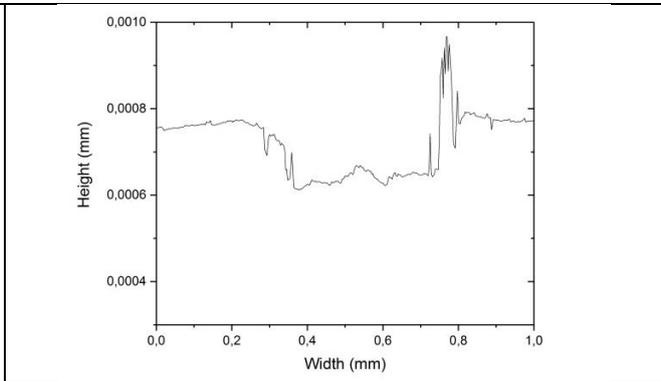


Figure 3. Profilometry of the wear track

Preliminary results indicate that the dominant wear mechanism in these Poly-V belts is “abrasion patterns” [1-2]. These features are sets of parallel ridges that are perpendicular to the sliding direction (see figure 4 and 5). From these ridges, wear debris are detached repeatedly. In the same way, the influence of operational parameters on the morphology of the wear features (e.g. ridge spacing), wear rate and COF is discussed in detail in this work.

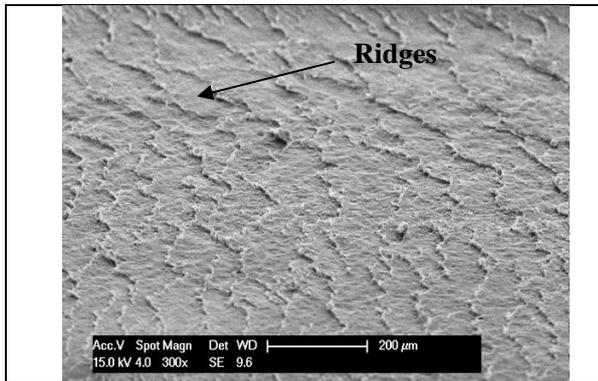


Figure 4. Abrasion patterns on the surface of a Poly-V belt

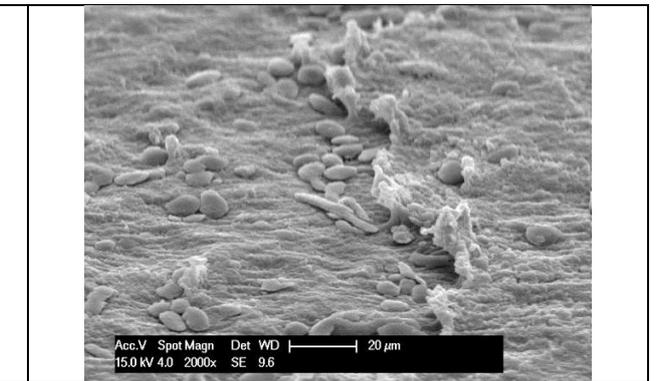


Figure 5. Detail of a ridge in the surface of a Poly-V belt

**References**

[1] Schallmach. A (1958) « Friction and abrasion of rubber », *Wear*, **Vol 1**(5), pp. 384-417.  
 [2] Moore. D (1980) « Friction and wear in rubbers and tires », *Wear*, **Vol 61**(2), pp.273-282.

\*Corresponding author: [laura.montalban@mines-paristech.fr](mailto:laura.montalban@mines-paristech.fr) – Tel. 04 93 95 74 54

*Jeudi 17 Mai*

# APPORT D'UNE APPROCHE TRIBOLOGIQUE SUR LA MAITRISE DU PROCEDE DE SOUDAGE DU BOIS PAR FROTTEMENT

P-H. Cornuault, L. Carpentier

Institut Femto-ST, UMR 6174, Département de Mécanique Appliquée, Université de Bourgogne-Franche-Comte, CNRS/ENSMM/UFC/UTBM, 25000 Besançon, France

## MOTS CLES

Procédé, Soudage, Frottement, Bois

## INTRODUCTION

Mis en évidence en 2003 [1], le soudage du bois est effectué par le mouvement relatif de deux pièces de bois sous une pression appliquée perpendiculairement au plan de l'interface. En raison de l'augmentation de température de l'interface due aux efforts de frottement, le matériau se transforme localement en un troisième corps visqueux issu de la dégradation et des réarrangements moléculaires de certains polymères constitutifs tels que la lignine et les hémicelluloses qui, après frottement, se solidifient pour former un cordon de soudure. Bien que les processus chimiques de dégradation de l'interface aient été déjà étudiés [1, 2], aucune approche tribologique du procédé, à notre connaissance, n'a encore été menée. L'objectif de ces travaux est de révéler l'apport de la tribométrie dans le contrôle du procédé et dans la compréhension des phénomènes mis en jeu.

## TRIBOMETRIE ET MOYENS DE CARACTERISATION POST-ESSAIS

Des essais de frottement alternatifs linéaires ont été réalisés en configuration pion/plan à partir de tourillons et blocs de bois de hêtre présentant une humidité relative  $HR$  contrôlée allant de 0 à 25%. Ces essais ont été menés à l'aide d'un tribomètre Cameron-Plint TE77 instrumenté, avec une amplitude de débattement du tourillon de  $\pm 2,2$  mm conduite à 50 Hz, une vitesse maximale de  $0,88$  m.s<sup>-1</sup>, et une pression apparente initiale allant de 1,8 à 4 MPa appliquée par un ressort. Au cours des essais, les signaux de force normale  $F_N$ , de force tangentielle  $F_T$ , et de déplacement  $d$  ont été acquis avec une fréquence d'échantillonnage égale à 10 kHz. Le post-traitement des signaux a permis de calculer le coefficient de frottement énergétique moyen  $\mu_{moy}$  pour chaque cycle.

Certains essais de frottement ont été suivis d'un maintien pendant 2 min du contact tourillon/bloc sous une pression apparente de 4 MPa de manière à aboutir au soudage des deux pièces. La morphologie du cordon de soudure a alors été analysée de manière non-destructive par tomographie aux rayons X, et la résistance mécanique de l'assemblage a été mesurée en traction uniaxiale. D'autres essais ont été interrompus à différents instants du cyclage. Dans ce cas, une analyse des surfaces au MEB a permis de suivre l'évolution de la morphologie du 3<sup>ème</sup> corps au cours du procédé.

## COMPORTEMENT TRIBOLOGIQUE LORS DU PROCEDE

La Figure 1, qui montre l'évolution de  $\mu_{moy}$  et  $F_N$  en fonction du nombre de cycles, témoigne de l'existence de cinq phases successives associées à des mécanismes tribologiques bien distincts. Lors de la 1<sup>ère</sup> phase (jusqu'à  $N_A$ , cf Figure 1), la faible valeur de  $\mu_{moy}$  a été attribuée au rôle lubrifiant des molécules d'eau présentes dans le contact. En effet,  $N_A = 0$  si  $HR = 0$ , et  $N_A = 104$  cycles si  $HR = 25\%$ . La 2<sup>ème</sup> phase (entre  $N_A$  et  $N_B$ ) s'accompagne d'une importante production de vapeur d'eau [2] induisant une considérable augmentation de  $\mu_{moy}$ .

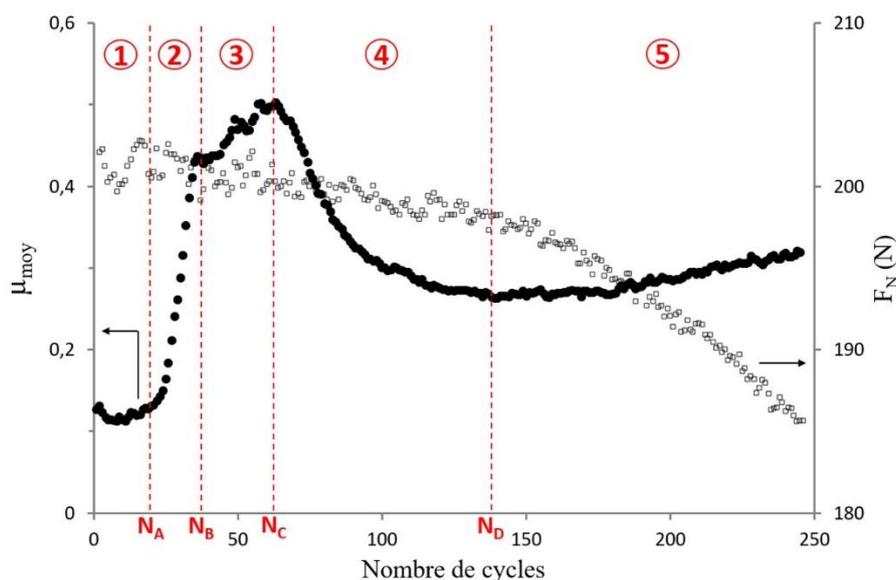


Figure 1: Evolution de  $\mu_{moy}$  (●) et  $F_N$  (□) en fonction du nombre de cycles lors du frottement d'échantillons à 12% d'humidité et sous une pression de contact apparente initiale de 4 MPa.

Entre  $N_B$  et  $N_C$  (3<sup>ème</sup> phase), la dégradation de l'interface conduit à la création de débris prenant la forme de rouleaux qui sont orientés perpendiculairement au déplacement du tourillon. Ces rouleaux s'étalent ensuite progressivement sur l'ensemble de la surface de contact au cours de la 4<sup>ème</sup> phase. La décroissance de  $\mu_{moy}$  entre  $N_C$  et  $N_D$  a été attribuée au changement d'état du 3<sup>ème</sup> corps dû à la hausse de température. Au-delà de  $N_D$  (5<sup>ème</sup> phase), la chute de  $F_N$  traduit une usure accrue du contact. Ces considérations permettent de circonscrire l'aboutissement de l'opération de soudage entre  $N_C$  et  $N_D$ .

## RESISTANCE MECANIQUE DES ASSEMBLAGES

Des assemblages bloc/tourillon soudés sous une pression apparente de 3,5 MPa et après différents nombres de cycles compris entre  $N_C$  et  $N_D$  ont été ensuite soumis à des essais de traction uniaxiale. Les résultats ont montré que la contrainte de rupture  $\sigma_R$  des assemblages est corrélée au  $\mu_{moy}$  atteint à l'issue des cycles de frottement, bien que la dispersion des résultats soit non-négligeable. Cette dispersion a été attribuée à l'hétérogénéité géométrique du cordon de soudure tel qu'il apparaît à la suite de sa caractérisation par tomographie aux rayons X.

## CONCLUSION

Ces travaux ont permis de mettre en évidence la richesse des mécanismes tribologiques ayant lieu lors du procédé de soudage du bois par frottement. De plus, cette étude montre l'intérêt du suivi du coefficient de frottement afin de maîtriser le procédé et prédire la résistance mécanique des assemblages obtenus. En effet, l'hétérogénéité structurale et hygrométrique du bois ne permettant pas de prédire le nombre de cycles de frottement optimal, le suivi du coefficient de frottement s'avère plus pertinent.

## Références

- [1] B. Gfeller, M. Zanetti, M. Properzi, A. Pizzi, F. Pichelin, M. Lehmann, L. Delmotte (2003) « *Wood bonding by vibrational welding* », J. Adhesion Sci. Techn., **17** (11), pp. 1425-1590.
- [2] P. Omrani, E. Masson, A. Pizzi, H.R. Mansouri (2008) « *Emission gases and degradation volatiles from polymeric wood dowels friction welding* », Polymer Degrad. & Stabil., **93**, pp. 794-799.

# CARACTERISATION TRIBOLOGIQUE ET MICROSTRUCTURALE DU TITANE PUR FABRIQUE PAR MICRO-FUSION LASER: EFFET DU TRAITEMENT THERMIQUE IN-SITU

N. Coniglio<sup>1,#</sup>, N. Kang<sup>1,2,#</sup>, M. El Mansori<sup>1</sup>, and C. Coddet<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Arts et Métiers ParisTech d'Aix-en-Provence, Laboratory of Mechanics, Surface and Materials Processing (MSMP-EA7350), 2 cours des Arts et Métiers, 13617 Aix-en-Provence – France

<sup>2</sup>ICB UMR 6303, CNRS, Univ. Bourgogne Franche-Comté, UTBM, F-90010 Belfort, France

# Ces auteurs ont également contribué

## MOTS CLES

Micro-fusion laser, titane de pureté commerciale, traitement thermique in-situ, gradient de microstructure, nano-tribologie

## RESUME

Le procédé de micro-fusion laser (ou SLM) est une technique de fabrication additive par fusion localisée par laser d'un lit de poudre métallique afin de fabriquer des pièces de géométrie complexe [1]. Cette fabrication se fait à partir d'une conception numérique en 3D qui est divisée en couches fines (entre 20 et 100 µm). Chaque couche est ensuite fabriquée successivement par fusion sélective au laser ce qui est accompagné par une solidification très rapide. Cependant, la pièce dans sa globalité ne présentera pas de propriétés homogènes et isotropes. En effet, la microstructure d'une couche sera influencée par le nombre de couches déposées à posteriori par le traitement thermique in-situ induit par la chaleur de fusion des couches suivantes [2]. Le travail présenté étudie l'effet du traitement thermique in-situ sur la microstructure et les propriétés tribologiques pour des pièces fabriquées par SLM en titane de pureté commerciale. La microstructure et la résistance au rayage ont été caractérisées. Un gradient de microstructure a été observé jusqu'à 250 µm de profondeur induit par le traitement thermique in-situ inhérent au procédé SLM. Ce gradient explique en partie la variabilité des comportements tribologiques mesurés.

## Références

[1] I. Yadroitsev, P. Bertrand, I. Smurov (2007) « *Parametric analysis of the selective laser melting process* », Appl. Surf. Sci. 253, pp. 8064-8069.

[2] L. Thijs, F. Verhaeghe, T. Craeghs, J. Van Humbeeck, J.P. Kruth (2010) « *A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V* », Acta Mater. 58, pp. 3303-3312.

## **Amélioration des propriétés tribologiques du PEEK par combinaison d'un revêtement de carbone amorphe et de la texturation de surface par laser**

**J. Dufils<sup>1</sup>, F. Faverjon<sup>1</sup>, C. Héau<sup>1</sup>, C. Donnet<sup>2</sup>, S. Benayoun<sup>3</sup> et S. Valette<sup>3</sup>**

1. IREIS, HEF group, ZI Sud – Rue Benoît Fourneyron, 42162 Andrézieux-Bouthéon, France

2. Univ Lyon, Université Jean Monnet, Laboratoire Hubert Curien, UMR 5516, 18 rue Professeur Benoît Laurus, 42000 Saint-Etienne, France

3. Univ Lyon, Ecole Centrale de Lyon, Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes, UMR 5513, 36 avenue Guy de Collongue, 69134 Écully, France

### **MOTS CLES**

PEEK, Carbone amorphe hydrogéné, Texturation laser

### **INTRODUCTION**

Le poly-aryl-éther-éther-cétone (PEEK) est un polymère thermoplastique qualifié de haute performance. Celui-ci suscite l'intérêt de la recherche et de l'industrie pour ses propriétés mécaniques remarquables et sa grande stabilité chimique. Malgré des propriétés mécaniques et chimiques notables, le PEEK reste relativement sensible à l'usure. Une manière efficace pour réduire l'usure et/ou le frottement d'un système mécanique à moindre coût est de réaliser un traitement de surface. Le dépôt de revêtements tels que les revêtements de carbone amorphe hydrogéné (a-C:H) à la surface des pièces mécaniques est un type de traitement de surface permettant de réduire l'usure et/ou le frottement. La réalisation d'une texturation de surface est un autre type de traitement de surface qui peut être utilisé pour contrôler l'usure et/ou le frottement des pièces mécaniques.

L'objectif est alors de combiner le dépôt d'un revêtement dur de carbone amorphe hydrogéné et la réalisation d'une texturation de surface par laser sur PEEK en vue de l'amélioration des performances tribologiques du PEEK.

### **RÉALISATION D'UN REVÊTEMENT DLC ADAPTÉ À UN DÉPÔT SUR PEEK**

Différents revêtements a-C:H ont été déposés par PECVD sur PEEK [1]. Parmi les revêtements réalisés, un revêtement a-C:H qualifié de polymer-like carbon (PLC), s'est montré particulièrement intéressant à déposer sur PEEK. Ce revêtement PLC permet de protéger le PEEK de l'usure lors d'essais tribologiques menés en milieu eau distillée et en milieu sérum bovin contre une bille en alumine. La présence de protéines dans le milieu sérum bovin s'est révélée être d'une grande influence sur le comportement tribologique du revêtement PLC en termes d'usure mais aussi de frottement (Figure 1).

### **EFFET DE LA TEXTURATION SUR LES PROPRIÉTÉS TRIBOLOGIQUES DE L'ENSEMBLE DLC-PEEK**

Un réseau hexagonal de cavités circulaires de diamètre 30  $\mu\text{m}$ , de profondeurs variables  $h$  ( $h = 2, 12$  ou  $21 \mu\text{m}$ ) et de densités variables  $A$  ( $A = 10$  ou  $30 \%$ ) a été texturé à la surface du PEEK à l'aide d'un laser femtoseconde avant de procéder au dépôt du revêtement PLC [2].

En milieu eau distillée, une baisse du coefficient de frottement est observée quand la densité de surface texturée augmente. La présence de protéines dans le sérum bovin affecte grandement la manière dont la texturation influence les performances tribologiques du revêtement PLC déposé sur PEEK (Figure 2). Les différences de comportement en termes de frottement semblent être conditionnées par la formation d'un tribofilm sur la bille antagoniste.

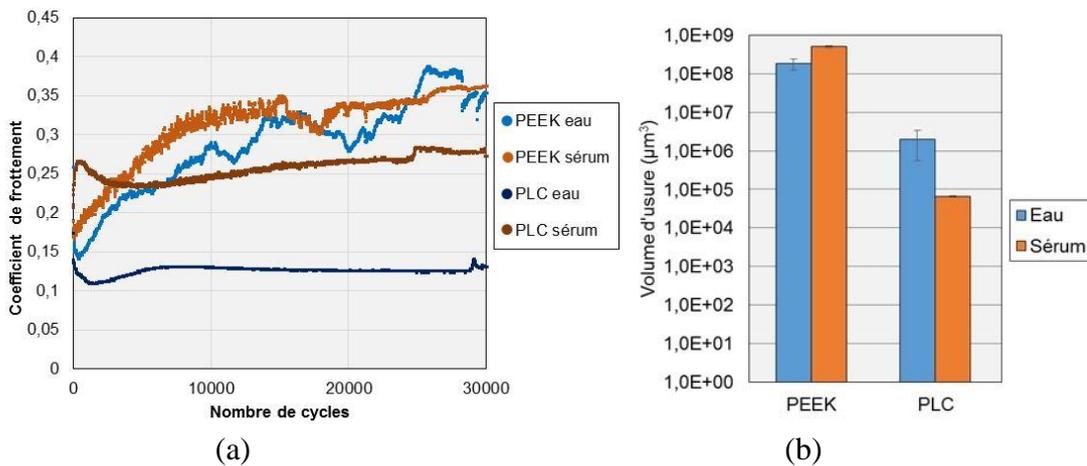


Figure 1.: (a) Evolution du coefficient de frottement en fonction du nombre de cycles pour le PEEK non revêtu et le revêtement PLC sur PEEK en milieu eau distillée et sérum bovin, (b) volumes d'usure associés après 30 000 cycles

L'influence des protéines sur le comportement tribologique des revêtements texturés se manifeste aussi sur l'usure de ces derniers. L'usure du revêtement texturé diminue en eau distillée comparé au revêtement déposé sur PEEK lisse alors qu'en milieu sérum bovin, l'usure n'est inférieure à celle du revêtement déposé sur PEEK lisse que pour une densité de texturation de 10 %. Il a été montré que la présence de protéines dans le milieu favorise le piégeage et la rétention des débris d'usure dans les cavités mais cela n'a qu'un léger effet bénéfique sur l'usure.

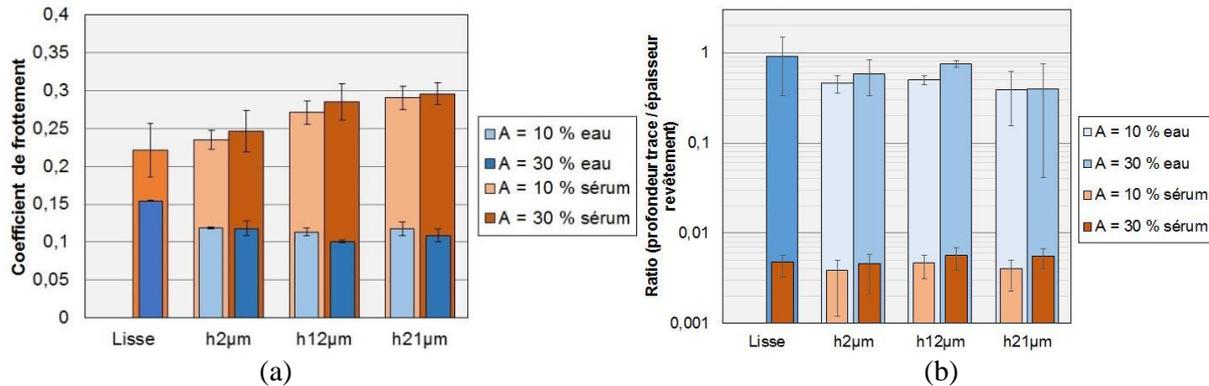


Figure 2 : (a) Coefficients de frottement pour les différentes texturations en milieu eau distillée et sérum bovin, (b) rapports de la profondeur de la trace d'usure et de l'épaisseur du revêtement associés après 30 000 cycles

## CONCLUSION

Pour les essais tribologiques réalisés, il a été montré que le dépôt d'un revêtement polymer-like carbon permet de protéger efficacement le PEEK de l'usure tout en réduisant le frottement. La réalisation d'une texturation sur le PEEK avant le dépôt du revêtement permet de réduire légèrement l'usure du revêtement. L'apport de la texturation en termes de frottement dépend fortement du milieu considéré.

## Références

- [1] J. Dufils, F. Faverjon, C. Héau, C. Donnet, S. Benayoun, S. Valette (2017) « Evaluation of a variety of a-C:H coatings on PEEK for biomedical implants », *Surface & Coatings Technology*, **313**, pp. 96-106.
- [2] J. Dufils, F. Faverjon, C. Héau, C. Donnet, S. Benayoun, S. Valette (2017) « Combination of laser surface texturing and DLC coating on PEEK for enhanced tribological properties », *Surface & Coatings Technology*, **329**, pp. 29-41.

# INTERET D'UNE APPROCHE MULTI-ECHELLE DANS LA MISE EN ŒUVRE DES FILMS DLC DANS L'AUTOMOBILE

Y. Gachon<sup>1</sup>, C. Héau<sup>1</sup>, P. Maurin Perrier<sup>1</sup>

1. IREIS Avenue Benoit Fourneyron CS42077 42162 Andrézieux Bouthéon cedex

## MOTS CLES

lubrification, taC, DLC, transmission automobile

## INTRODUCTION

Les revêtements de carbone diamant amorphe (DLC) sont aujourd'hui utilisés de manière courante dans l'automobile notamment sur les pièces de distribution que sont les linguets et les poussoirs. Ces revêtements doivent s'insérer dans un système tribologique complexe et cela a nécessité une progression dans l'approche tribologique entre le banc de laboratoire et le banc d'organe. L'exposé montre la contribution respective de chacun des moyens d'essais dans le développement d'un film. Aujourd'hui ces méthodes d'essai vont toutes être réunies dans un laboratoire commun.

### Etape 1 : L'échelle laboratoire

Les films DLC sont en fait des structures multicouches avec une base métallique dopée ou non pour atténuer le gradient de dureté avec le substrat, une couche d'accroche (base semi-conducteur ou métal dopé carbone) et la couche carbonée de surface. La première étape du développement des DLC a consisté à optimiser les paramètres d'élaboration pour éviter les problèmes de fragilité intrinsèque du film ou de l'empilement. Cela peut se faire à l'aide de l'essai bille disque. Mais si on souhaite étudier la tenue à l'usure du film, il faut déjà changer ses habitudes d'essais.

### ETAPE 2 : le passage au tribomètre industriel

L'interaction avec le lubrifiant avait été négligée dans un premier temps, au motif que les réactions avec les additifs ne se produisent pas sur une couche carbonée. Les procédures d'essai précédemment définies ont mis en évidence que le tribofilm qui se forme sur l'acier pouvait provoquer une usure tribochimique du film DLC. Pour cela il a fallu intégrer des moyens d'essai permettant de balayer les différents régimes de lubrification imparfaite (limite et mixte). La stratégie de l'étape 1 a permis de faire un premier tri parmi les additifs mais la notion d'énergie d'activation des réactions chimiques a nécessité de mettre en œuvre des essais apportant davantage d'énergie dans le contact. Cela nécessite le passage au tribomètre bague/plan.

### Etape 3 : Le passage au banc d'organe

La topographie de surface avait été évacuée dans un premier temps par la nécessité de polir les pièces à revêtir de DLC. La rugosité de la contre pièce va également avoir une influence dans le comportement du contact, notamment sur la formation des tribofilms sur la pièce antagoniste. Ces questions sont d'autant plus importantes avec l'entrée en jeu des films taC (tetraedral amorphous carbon) qui sont beaucoup plus durs que les films aCH. Cette fois il est également important d'intégrer toutes les composantes de défauts géométriques donc de passer à un banc d'organe

### ETAPE 3 : le passage à l'échelle 1

Ce dernier aspect est essentiel à titre de validation finale car le gain de frottement sur le système complet est souvent moins spectaculaire que sur l'essai laboratoire et il faut veiller aux interactions éventuelles avec le reste de l'environnement.

La mise en œuvre des films DLC sur les pièces automobiles a fait appel à une large palette de moyens d'essais tribologiques.

**Références**

[1] A. Auteur1, B. Auteur2 (année) « *Titre de l'article cité* », Nom du Journal, **xx** (yy), pp. 000-000.

## **Un nouvel instrument de caractérisation : le tribomètre béton**

**M. Fajfrowski<sup>2</sup>, Chafika Djelal<sup>1</sup>, Yannick Vanhove<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Univ. Artois, EA 4515, Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE), Béthune, F-62408, France

<sup>2</sup>Michalex SARL, Fr- 92500 Rueil Malmaison

### **MOTS CLES**

Béton, agent de démoulage, tribomètre, coefficient de frottement, rugosité.

### **INTRODUCTION**

Le béton est un matériau qui, bien que très connu, connaît des évolutions techniques profondes. Un des défis majeurs auquel il doit faire face aujourd'hui est de s'adapter au développement durable à savoir la prise en compte des contraintes environnementales qui s'imposent aujourd'hui. Un autre défi consiste à le décliner dans les très nombreuses applications auquel il est destiné. Ces demandes varient profondément selon que l'on considère des finalités domestiques, des ouvrages d'art ou des caractéristiques particulières comme la légèreté, l'ouvrabilité, la finition, la durabilité.

### **UN OUTIL DE CARACTERISATION**

Les formulateurs sont ainsi poussés à créer de nouveaux produits comme les liants hydrauliques, les adjuvants, les ultrafines, les huiles de démoulage afin d'améliorer la mise en œuvre, la durabilité et la résistance de ces nouveaux bétons.

Le cas des huiles de démoulage est particulièrement prégnant car celles-ci doivent maintenant être d'origine végétale. Comme tout nouveau matériau, celui-ci doit être testé et maîtrisé avant sa mise en œuvre sur le marché. Ces huiles sont d'une importance fondamentale car elles interviennent à différentes étapes du processus de fabrication, notamment lors du démoulage et pour l'obtention de l'état de surface final.

Pour pouvoir atteindre cette connaissance, un tribomètre dédié au béton frais a été mis au point par le Laboratoire de Génie Civil géo-Environnement de l'université d'Artois. Cet instrument présente des caractéristiques uniques et spécifiques à la problématique du béton frais. Il offre également la possibilité de tester les argiles et les matériaux granulaires.

Nous présenterons son principe de fonctionnement, ses caractéristiques ainsi que quelques résultats provenant des applications précitées, à savoir la caractérisation des huiles de démoulage [1], [2], [3], [4].

### **CONCLUSION**

Un accord de partenariat entre la recherche publique, sa société d'accélération de transfert de technologies ( SATT Nord ) et une PME d'ingénierie d'instrumentation scientifique française a permis l'industrialisation d'une invention issue de l'université d'Artois : le tribomètre béton. Cet instrument a permis notamment de différencier les

interactions huiles surface liées aux agents de démoulage d'origine végétale ou minérale. Il a permis également de mettre en évidence l'influence de la composition du béton frais contre le coffrage. Enfin, des adaptations sont possibles avec l'ajout de modèles analogiques pour modéliser des micro-phénomènes à l'échelle du milieu considéré.

### **Références**

- [1] Yannick Vanhove, thèse « *Contribution à l'étude du frottement d'un béton auto-plaçant contre une surface métallique-Application aux poussées contre les coffrages* », (2001).
- [2] Laurent Libessart, thèse « *Compréhension des phénomènes intervenant à l'interface béton/paroi lors de la mise en place des bétons dans les coffrages-Influence des agents de démoulage* », (2006).
- [3] Samir Bouharoun, thèse « *comportement tribologique des huiles de décoffrage à l'interface béton/coffrage- Influence de la formulation du béton* », ( 2011).
- [4] Khadija El Cheikh, thèse « *Modélisation du frottement d'un milieu granulaire sur une paroi rugueuse* », ( 2014).

# FROTTEMENT DE TORONS ET DE FIBRES DE CARBONE : INFLUENCE DE L'ANGLE DE CONTACT

M. Tournalias<sup>1</sup>, G. Fassi<sup>1</sup>, Y. Wielhorski<sup>2</sup> et M.-A. Bueno<sup>1</sup>

1. Laboratoire de Physique et Mécanique Textiles, EA4365, Université de Haute-Alsace, Mulhouse

2. Safran Aircraft Engines - Rond-point René Ravaud - 77550 Moissy-Cramayel

## MOTS CLES

Frottement, Fibres de carbone, Angle de contact

## INTRODUCTION

De nos jours, l'utilisation des matériaux composites dans l'industrie mondiale est croissante, en particulier car ils constituent une des voies d'allègement des véhicules. Dans le secteur aéronautique l'utilisation de ces matériaux constitue un véritable enjeu non seulement environnemental mais également commercial. Les pièces composites peuvent avoir des formes particulièrement complexes. Les renforts fibreux sont alors réalisés par une technique de tissage spécifique et sont mis en forme avant injection de la résine par le procédé RTM. La conception de ces pièces, dont le tissage et la mise en forme, fait appel à des techniques de simulations avancées. Ces simulations nécessitent de disposer de certaines données d'entrée expérimentales comme les propriétés axiales de la fibre ou du fil mais également les propriétés en frottement. Nombre de ces matériaux sont constitués de renforts à base de fibres et notamment de carbone. Des études sont menées par quelques laboratoires afin de mieux comprendre le comportement des fibres et fils utilisés, d'un point de vue frottement, pour améliorer les processus de mise en œuvre, mais également pour anticiper leur comportement par des modèles [1-5].

Ce travail consiste donc à étudier expérimentalement, tant à l'échelle du toron (ou fil) qu'à celle de la fibre individuelle, l'influence de divers paramètres et plus particulièrement de l'angle de contact entre les éléments frottants.

## EXPERIENCE

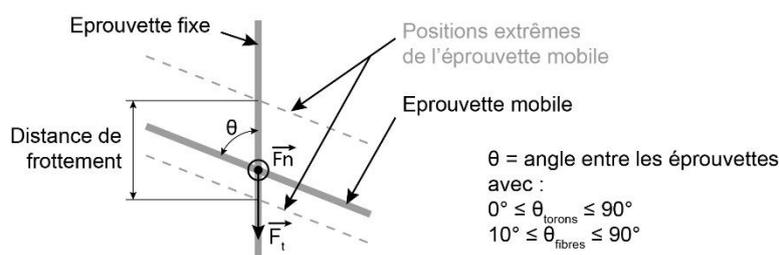


Figure 1: Principe expérimental.

La mesure consiste à faire frotter deux érouvettes avec un angle de contact choisi ( $\theta$ ), fixe au cours de l'essai (cf. Fig. 1). Les angles de contacts ( $\theta$ ) balayent la plage de  $0^\circ$  (érouvettes alignées) à  $90^\circ$  pour les torons mais seulement de  $10^\circ$  à  $90^\circ$  pour les fibres. Du fait de la fixation et du diamètre des fibres (inférieur à  $7 \mu\text{m}$ ), à  $0^\circ$ , la mesure intégrerait le frottement entre les porte-échantillons, mais également la colle utilisée. L'évolution de la force normale ( $F_n$ ) est mesurée au cours du test de frottement, ainsi que la force tangentielle ( $F_t$ ). Le coefficient de frottement (COF) peut alors être calculé. Les conditions expérimentales ont été choisies pour être transposables de la fibre au fil. Les érouvettes sont placées sur des supports dédiés, sous une prétension longitudinale de l'ordre de

0.15 mN/fibre, la charge normale initiale correspond à 5mN/fibre et la vitesse de frottement est de  $1\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ . Il s'agit de fibres de carbone de type IM7 (Hexcel) dont le diamètre est de  $5,2\mu\text{m}$ . Les torons testés ont jusqu'à 12000 fibres (12K). Les valeurs de  $F_n$ ,  $F_t$  et COF moyen sont suivis au cours de l'essai.

## RESULTATS ET DISCUSSION

A l'échelle du toron ou celle de la fibre individuelle, le COF diminue lorsque l'angle de contact augmente. Ceci peut s'expliquer par la modification des aires de contact réelles entre les éprouvettes. De plus, à l'échelle du toron, il y a une interpénétration des deux éprouvettes, augmentant encore les forces de frottement (cf. Fig. 2). Cette tendance confirme les études menées précédemment [6] sur des nappes de fils parallèles frottées à différents angles, par Chakladar, *et al.* [1], Cornelissen, *et al.* [2] qui ont testé des torons de carbone par la méthode du cabestan, en enroulant les torons avec divers angles et dans une étude précédente menée au LPMT [7].

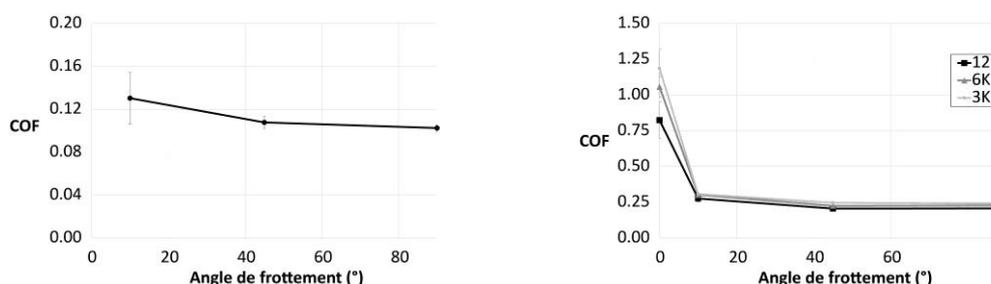


Figure 2: COF en fonction de l'angle de contact à l'échelle de la fibre (a) et du toron (b).

## CONCLUSION

Cette étude a donc permis de visualiser l'importance de l'orientation des fibres et de fils de carbone en interaction sur le coefficient de frottement qu'il est possible de mesurer lors du glissement de l'un sur l'autre, ce coefficient de frottement intégrant les parts de déformation et d'adhésion des éléments.

## Références

- [1] N.D. Chakladar, P. Mandal et P. Potluri (2014) «Effects of inter-tow angle and tow size on carbon fibre friction» Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, **65**, pp. 115-124.
- [2] B. Cornelissen, B. Rietman et R. Akkerman (2013) «Frictional behaviour of high performance fibrous tows: Friction experiments» Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, **44**, pp. 95-104.
- [3] M. Tournalias, M.-A. Bueno et D. Poquillon (2017) «Friction of carbon tows and fine single fibres» Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, **98**, pp. 116-123.
- [4] B. Cornelissen, M.B. de Rooij, B. Rietman et R. Akkerman (2013) «Frictional behaviour of high performance fibrous tows: A contact mechanics model of tow-metal friction» Wear, **305** (1-2), pp. 78-88.
- [5] B. Cornelissen, M.B. de Rooij, B. Rietman et R. Akkerman (2014) «Frictional behavior of carbon fiber tows: a contact mechanics model of tow-tow friction» Text. Res. J., **84** (14), pp. 1476-1488.
- [6] B.S. Gupta (2001) «Frictional Properties of Textile Materials», in: C.M. Pastore, P. Kiekens (Eds.) Surface Characteristics of Fibers and Textiles, New York/Basel: Marcel Dekker, pp. 59-92.
- [7] M. Tournalias et M.-A. Bueno (2016) «Experimental simulation of friction and wear of carbon yarns during the weaving process» Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, **80**, pp. 228-236.

# LE COMPORTEMENT EN FROTTEMENT DE FILMS DE MOLECULES AUTO-ASSEMBLEES D'ACIDE ALKYLPHOSPHONIQUE, REVELE PAR LA TECHNIQUE DE TRIBOMETRIE OSCILLANTE EN RELAXATION

M. Belin<sup>1</sup>, P-H. Cornuault<sup>2</sup>, E. Rigaud<sup>1</sup>, X. Roizard<sup>2</sup>, J-M. Melot<sup>3</sup>

1. Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes, UMR CNRS 5513, Université de Lyon, Ecole Centrale de Lyon, 36 avenue Guy de Collongue, 69134 Ecully, France

2. Institut Femto-ST, UMR CNRS 6174, Département de Mécanique Appliquée, UBFC, 24 rue de l'építaphe, Besançon, France

3. Institut UTINAM, UMR CNRS 6213, UBFC, 41bis avenue de l'Observatoire, Besançon, France

## MOTS CLES

Molécules auto-assemblées, mouvement oscillant libre-glissant, frottement visqueux, frottement coulombien, amortissement, énergie dissipée.

## RESUME

Des études antérieures ont mis en évidence l'intérêt des acides alkylphosphoniques comme lubrifiant pour le procédé d'emboutissage [1-3]. Cette méthode de fonctionnalisation consiste en l'auto-adsorption de nanomolécules, initialement faiblement concentrées dans un solvant, sur des surfaces métalliques oxydées. Les principaux intérêts pratiques de cette méthode pour les procédés de mise en forme des tôles sont : la simplicité de la méthode de greffage, un très faible impact environnemental, et enfin l'absence d'opérations de nettoyage habituellement nécessaires à l'issue de la fonctionnalisation.

Mais par-dessus tout, des essais tribologiques classiques en condition alternatif-linéaire ou pion-disque ont démontré les performances lubrifiantes élevées de cette méthode de fonctionnalisation par rapport aux lubrifiants traditionnellement utilisés dans les procédés d'emboutissage. Des études ont montré que le coefficient de frottement macroscopique (inférieur à 0,1) est dû à l'établissement d'un troisième corps sur la piste de frottement [1-3]. Ce troisième corps provient de la destruction puis de l'étalement de cristallites d'acides alkylphosphoniques qui se sont formées sur la surface après évaporation du solvant. Néanmoins, la nature du comportement tribologique de ce troisième corps reste méconnue et sa caractérisation constitue le but de la présente étude.

Des essais de frottement ont été réalisés à l'aide d'un dispositif original, appelé tribomètre oscillant en relaxation [4], permettant de générer des oscillations libres amorties d'une bille frottant sur un plan fonctionnalisé. Certains tests ont été effectués à sec sous une pression de contact hertzienne maximale de 350 MPa. D'autres essais ont été réalisés en immersion dans le solvant. Pour ces derniers essais, les molécules d'acide alkylphosphonique ont été introduites au cours d'une série d'oscillations libres consécutives. La simulation mécanique de l'ensemble du tribosystème (comprenant le contact étudié) en tant qu'oscillateur mécanique amorti à un degré de liberté permet de discriminer les composantes coulombienne et visqueuse des efforts dissipées par frottement. Ainsi, le coefficient d'amortissement visqueux et le coefficient de frottement de l'interaction entre la bille et la surface fonctionnalisée ont pu être quantifiés sans aucune mesure de force [4, 5, 6]. Les composantes de l'énergie mécanique dissipée à la fois par le frottement coulombien et par le frottement visqueux ont également été calculées.

Les principaux résultats mettent en évidence la nature significativement visqueuse du comportement tribologique du troisième corps aussi bien à sec qu'en condition immergée (cf Figure 1). Cette composante de frottement non-coulombienne (dépendant de la vitesse) est plus élevée pendant les premiers cycles de frottement (cf Figure 2). Les résultats sont ensuite discutés.

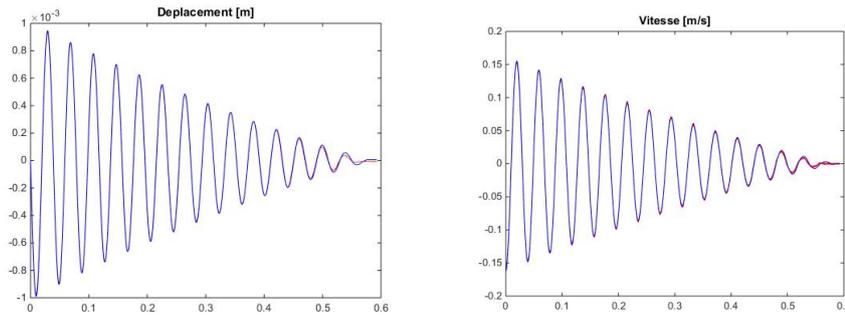


Fig. 1: Evolution temporelle du déplacement et de la vitesse du corps oscillant, contact acier inoxydable/acier 100C6, lubrifié par des SAMs (molécules C16 à  $2.10^{-2}$  mol/L dans l'éthanol), force normale appliquée : 150 mN. L'arrêt est ici obtenu à l'issue de 14 oscillations environ. En rouge : les données expérimentales, en bleu : les valeurs calculées à l'aide du modèle.

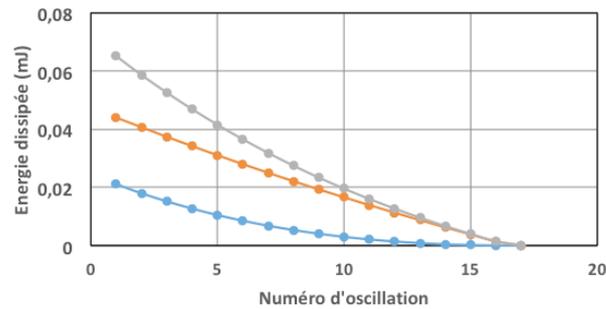


Fig. 2: Analyse de la dissipation typique dans le contact en glissement. On met en évidence l'évolution : des contributions du frottement de type "coulombien" (courbe en orange), du frottement de type "visqueux" (courbe en bleu) et de la dissipation totale (courbe en gris). au cours des oscillations, jusqu'à l'arrêt.

## Références

- [1] X. Roizard, J. Heinrichs, A. Buteri, S. Jacobson, M. Borgeot, L. Carpentier, J-M. Melot, F. Lallemand (2018) "Friction behavior of ferritic stainless steel in a strongly diluted alcohol solution of alkylphosphonic acid", Tribology International, **118**, pp. 465–473.
- [2] X. Roizard, J. Heinrichs, A. EtTaouil, S. Jacobson, M. Olsson, J-M. Melot, F. Lallemand (2016), "Insights into sliding wear and friction behavior of copper in ethanol containing alkylphosphonic acid molecules", Tribology International, **96**, pp. 141–148.
- [3] M.M. Moine, X. Roizard, J-M. Melot, L. Carpentier, P-H. Cornuault, F. Lallemand, J-M. Rauch, O. Heintz, S. Lallemand (2013), "Grafting and characterization of dodecylphosphonic acid on copper: Macro-tribological behavior and surface properties", Surface and Coatings Technology, 2013, **232**, pp. 567-574.
- [4] E. Rigaud, J. Perret-Liaudet, M. Belin, L. Joly-Pottuz, J-M. Martin (2010), "An original dynamic tribotest to discriminate friction and viscous damping", Tribology International, **43**, pp. 320-329.
- [5] F. Majdoub, M. Belin, J.M. Martin J.M., J. Perret-Liaudet, M. Kano, K. Yoshida (2013), "Exploring low friction of lubricated DLC coatings in no-wear conditions with a new relaxation tribometer", Tribology International, **65**, pp. 278-285.
- [6] E. Rigaud, D. Mazuyer, J. Cayer-Barrioz (2013), "An interfacial friction law for a circular EHL contact under free sliding oscillating motion", Tribology Letters, **51**, pp. 419-430.

## Sur l'utilisation d'essais nanomécaniques pour analyser les évolutions de microstructure générées par des sollicitations de contact.

G. Kermouche<sup>1</sup>, G. Guillonau<sup>2</sup>, C. Courbon<sup>3</sup>, R. Chromik<sup>3</sup>, J. Michler<sup>4</sup>

1. Univ Lyon, IMT Mines Saint-Etienne, Centre SMS, CNRS, LGF, F - 42023 Saint-Etienne France

2. Univ Lyon, Ecole Centrale de Lyon, LTDS UMR5513 CNRS, Ecully, France

3. Univ Lyon, ENI de Saint-Etienne, LTDS UMR5513 CNRS, Saint-Etienne, France

4. McGill University, Mining and materials engineering department, Montreal QC, Canada

5. Empa - Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology, LMMN, Thun, Schweiz

### MOTS CLES

NanoIndentation, Micropilier, Grenailage, Contact frottant, Recristallisation, Déformation plastique sévère

### RESUME

Les traitements de surface mécaniques, tels que le grenailage, le galetage, le martelage sont connus pour leur efficacité vis-à-vis de leur effet bénéfique sur la résistance à l'usure et à la fatigue. Ils reposent sur des chargements de contacts répétés (tribologiques) qui induisent des déformations plastiques sévères en sous-surface, générant ainsi des champs de contraintes résiduelles compressifs et un affinement local des grains (Surfaces Tribologiquement Transformées), ce qui conduit à un gradient significatif de propriétés mécaniques. Nous présentons ici une méthodologie reposant essentiellement sur l'utilisation de tests nanomécaniques – micro-compression, nanoindentation – en complément de caractérisations microstructurales pour expliquer les changements de microstructure induits par de tels traitements [1].

Cette méthodologie est appliquée à divers cas allant du grenailage sévère aux contacts frottants ou glissants. Nous montrons que le grenailage sévère d'un fer pur peut générer un raffinement significatif de la taille de grain sur plus de 100  $\mu\text{m}$  de profondeur. Le durcissement significatif a pu être mis directement en relation avec l'effet Hall-Petch (Fig 1). Dans le cas des contacts frottants, l'échauffement, associé à une augmentation de la vitesse de glissement, combiné à la déformation plastique de la sous-surface permet de créer de forts gradients de microstructures. La méthodologie proposée a permis d'identifier les phénomènes physiques – recristallisation, fragmentation de grains - conduisant à de tels résultats, dans le cas modèle d'un cuivre pur soumis à des contacts tribologiques à haute vitesse.

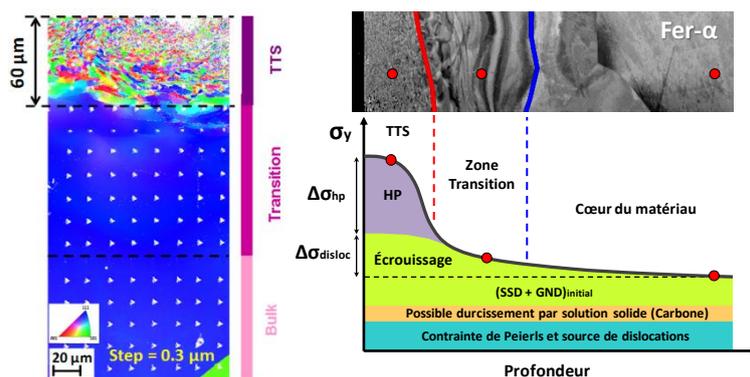


Figure 1 – A gauche -coupe transverse d'un fer pur grenailé intensivement (cartographie EBSD et empreintes de nanoindentation), A droite –Mécanismes de durcissement de la sous-surface.

### Références

[1] D-Y Tumbajoy, X. Maeder, G. Guillonau, S. Sao-Joao, S. Descartes, J.M. Bergheau, C. Langlade, J. Michler, G Kermouche, Microstructural and micromechanical investigations of surface strengthening mechanisms induced by repeated impacts on pure iron, **Materials & Design**, In Press

# EFFECT OF UNIAXIAL STRETCHING ON SCRATCH RESISTANCE OF POLYPROPYLENE TAPES

J. Pepin<sup>1,2</sup>, A. Rubin<sup>1</sup>, T. Roland<sup>1</sup> and C. Gauthier<sup>1</sup>

1. Institut Charles Sadron (ICS), UPR22/CNRS, 23 rue du Loess, BP84047, F-67034 Strasbourg, France

2. Dutch Polymer Institute (DPI), P.O. Box 902, 5600 AX Eindhoven, the Netherlands

## KEYWORDS

semi-crystalline polymer, orientation, scratch, anisotropy

## INTRODUCTION

In industrial applications, polymeric surfaces often undergo damages like scratches or are used for moving mechanical parts where friction and wear properties are important. In this context, it is of prime importance to improve the scratch resistance of these materials. In case of semi-crystalline polymers, it was shown by molecular dynamics that orientation of macromolecular chains could decrease the coefficient of friction towards the elongation direction [1]. The aim of this work is to investigate the influence of macromolecular orientation after uniaxial drawing on the scratch resistance of isotactic polypropylene tapes (iPP).

## RESULTS AND DISCUSSION

Scratch experiments were performed on both un-oriented and uniaxially oriented iPP tapes during which in-situ images containing geometrical information of the contact area are taken. The analysis of these images has firstly revealed that oriented samples are more tough than the isotropic one. On the other hand, these results highlight that the appearance of plasticity is delayed for the oriented iPP leading to smaller plastic pads and thus a lower apparent friction for identical sliding conditions (normal load, velocity) as compared with the isotropic sample.

Focusing on the contact shape, the latter is elliptical for the oriented iPP contrary to the isotropic case where the contact is circular. It is thus possible to determine both contact tilt and ellipticity for the oriented samples. The contact tilt is defined as the angle between the sliding direction and the minor axis of the ellipse. Results are presented in Figure 1.

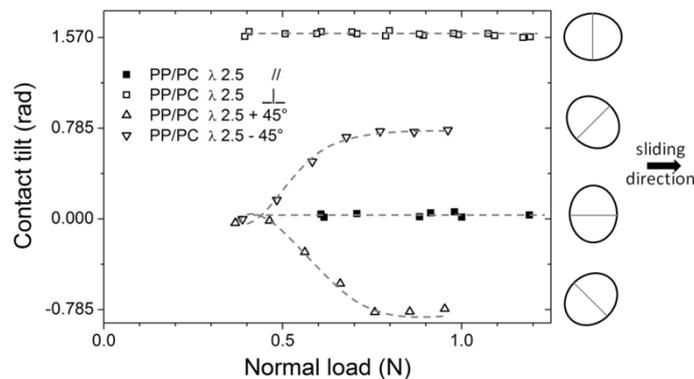


Figure 1: Evolution of the contact tilt of the elliptical contact as a function of normal load and sliding direction.

The contact ellipticity emerges from the anisotropy of the mechanical properties induced during uniaxial stretching. Indeed, the mechanical properties increase according to the drawing axis resulting in a lower contact radius as compared with the transverse directions. Consequently, the minor axis of the elliptical contact is always oriented towards the stretching axis whatever the sliding direction as illustrated by Figure 2.

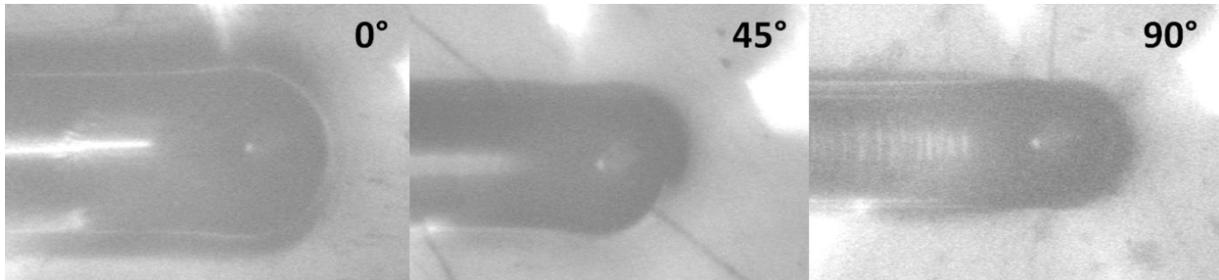


Figure 2: Pictures of scratches on oriented iPP depending on the sliding direction ( $0^\circ$  = parallel to the drawing axis)

Figure 2 also revealed differences on both frontal push pad and lateral track pad. When scratch takes place towards the stretching axis, the lateral track pad is the first to appear whereas at  $90^\circ$  it appears after the frontal push pad. This could be explained by the fact that the yield stress is higher towards the drawing axis than perpendicularly so plasticity appears later parallel to the drawing axis.

Regarding damages induced during scratches, the observations of the grooves left for identical conditions in each direction highlight that the iPP surface is more damaged when the scratch is perpendicular to the drawing axis. For an orientation of  $45^\circ$ , only a half of the groove shows damages. It is noticeable that these damages are less important for the oriented material than for the isotropic sample even for a scratch perpendicular to the macromolecular chains for same normal load and velocity.

## CONCLUSION

Scratch experiments reveal that both contact shape and orientation depend on the stretching direction versus the sliding direction. Comparison between scratches performed on un-oriented and uniaxially drawn iPP has shown that stretching improves scratch resistance by allowing less brittle scratches towards the drawing axis.

## ACKNOWLEDGEMENTS

This research forms part of the research program of DPI, project #783ft15. The authors thank the Department of Mechanical Engineering of TU/e (The Netherlands) for providing the un-oriented iPP tapes together with the UMET laboratory (Lille, France) for the orientation of the iPP tapes.

## References

- [1] S.J. Heo, I. Jang, P.R. Barry et al (2008) "Effect of the sliding orientation on the tribological properties of polyethylene in molecular dynamics simulations", *Journal of Applied Physics* **103** 083502

## **Effet de la texturation par laser femto seconde de l'alliage de titane sur la raideur de contact et les forces exercées par les cellules**

**H. Zahouani<sup>1</sup>, V. Dumas<sup>1</sup>, C. Mauclair<sup>2</sup>**

*1. Université de Lyon, Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes. UMRS 5513 CNRS. ENISE- ECL - ENTPE*

*2. Université de Lyon, Laboratoire Hubert Curien, UMR 5516 CNRS, St Etienne*

### **MOTS CLES**

Laser Femtoseconde, texturation multi-échelle, Raideur de contact, modèle élastique, Bio-fonctionnalisation des surfaces

### **INTRODUCTION**

Les biomatériaux métalliques (encore appelés matériaux biocompatibles) représentent un enjeu économique et sociétal important. Du fait d'une part de l'augmentation de l'espérance de vie (plus de 21% de la population âgée de plus 65 ans en 2020) et d'autre part de l'exigence de confort de vie, l'amélioration de la durabilité et de la fonctionnalité des implants médicaux est un champ d'investigation crucial. Les matériaux des implants doivent cependant avoir une biocompatibilité autant biologique que mécanique. Les alliages de titane offrent, de ce point de vue, un potentiel d'application important.

Au fil des années et du retour d'expérience, les alliages de titane utilisés ont cependant fortement évolué. Plusieurs méthodes de traitements de surface, mécaniques ou chimiques, ont été développées pour rendre ce matériau bioactif et améliorer sa fixation biologique au tissu osseux. Cependant, la plupart de ces méthodes conventionnelles créent une texture grossière à la surface de l'implant (non-structurée et incontrôlée), ceci rend difficile la compréhension du contact mécanique : cellule – substrat rugueux.

Le laser femtoseconde fournit une méthode unique pour générer des topographies contrôlées multi-échelles sur des surfaces métalliques. Dans ce travail, des texturations au laser femto seconde ont permis d'identifier l'effet des échelles des motifs des textures sur la raideur de contact, le taux de portance et les forces exercées par les cellules sur un substrat en titane texturé finement.

### **Raideur de contact, taux de portance et forces de contact**

La plupart des cellules des tissus ne peuvent survivre en suspension dans un fluide. Leur devenir dépend donc des conditions d'ancrage à leur environnement. Or, le substrat solide sur lequel adhèrent les cellules peut être de nature très variée et ainsi avoir des propriétés mécaniques très diverses. Les interactions entre les cellules et leur support génèrent des forces contractiles qui sont transmises au substrat via des structures d'adhésion transcellulaires. La rigidité du substrat sur lequel les cellules adhèrent et se déplacent peut ainsi modifier ces interactions et induire une réorganisation interne de l'architecture cellulaire. Comprendre la façon dont les cellules s'adaptent à la rigidité de leur substrat d'adhésion est un domaine de recherche en pleine émergence grâce notamment au développement de techniques expérimentales permettant de changer la raideur de contact de la matrice et de mesurer précisément les interactions cellule-substrat[1]. Au cours de la locomotion, la cellule est non seulement capable d'exercer des forces mais également de « sonder le terrain » et de répondre, à travers une réorganisation de son cytosquelette, à la résistance mécanique du matériau qu'elle rencontre, qu'il s'agisse d'un substrat synthétique, de la matrice d'un tissu ou encore des cellules voisines. La réponse mécanique des cellules à la raideur de contact de leur environnement induit un réarrangement de son architecture interne via des boucles de rétroaction entre l'intérieur et l'extérieur de la cellule, un peu à la manière d'un muscle qui adapte le travail à effectuer en fonction de la charge appliquée.

L'amélioration de la surface des implants est essentielle pour réaliser une ostéointégration rapide. Techniquement, la création d'un motif précis sur une surface en alliage de titane est difficile. Ici, le

laser femtoseconde a été choisi comme une technologie innovante pour texturer avec précision une topographie nano-micro. En ajustant les paramètres laser, trois textures biomimétiques ont été fabriquées sur la surface en titane : deux des texturations (A et B) sont composées d’une superposition de micro-cratères et de ripples (600nm) et la 3ème texture (C) comporte uniquement des ripples. Le contrôle des paramètres laser permet de maîtriser le diamètre (30µm) et la profondeur (800nm) des micro-cratères ainsi que la localisation et l’orientation des ripples.

La présence de textures multi-échelle modifie considérablement la distribution des contraintes et la raideur de contact au voisinage des surfaces en contact. La prise en compte de textures multi-échelles surfaciques à l’échelle microscopique constitue souvent une clé pour appréhender et modéliser un grand nombre de phénomènes de contact cellule/substrat observés à l’échelle de la cellule tels que le la raideur de contact normale et tangentielle, les forces de contact, le taux de portance, l’adhésion et le frottement. Ce travail porte sur la caractérisation multi-échelle des textures imprimées par laser femto seconde et la modélisation du contact élastique entre un plan de cellule et les textures (A, B & C). L’analyse de la topographie a permis de montrer la diversité morphologique des motifs imprimés sur la surface du titane, avec un caractère particulier des motifs en ripples dont la dimension fractale est plus élevée par rapport aux motifs en cratère. La figure (1) montre la décomposition multi-échelle des motifs sous forme d’un arbre morphologique qui tient compte de l’altitude des motifs et de leur densité, de leurs longueurs d’onde ainsi que de leur anisotropie [2].

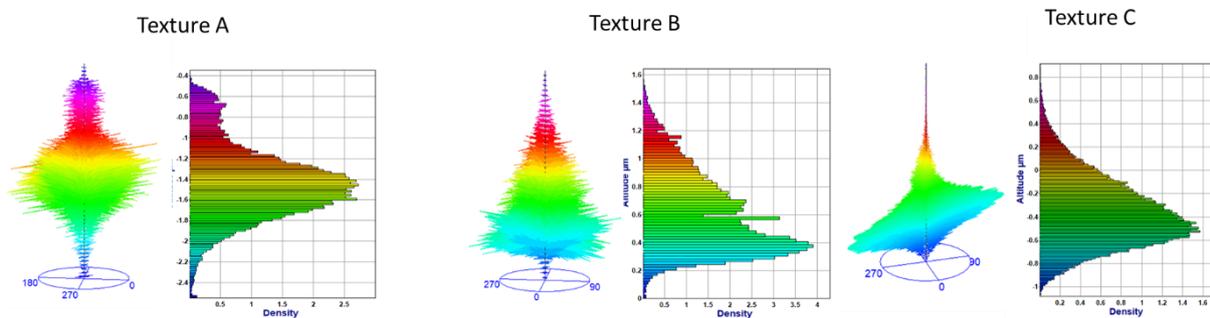


Figure 1. Arbre multi-échelle des motifs des textures laser (A, B & C) [2]

Pour identifier le rôle des échelles des textures sur la mécanique du contact cellule/substrat, un modèle élastique de contact surfacique a été développé pour étudier le contact entre un plan cellulaire (équivalent à une matrice extra cellulaire de module d’élasticité de 5 KPa) et le titane texturé avec différents motifs. Le modèle élastique utilise l’équation intégrale de Boussinesq avec un pas de chargement tous les 10 nanomètres [2]. Pour chaque pas de chargement et après convergence du calcul, on détermine la force exercée par le plan cellulaire (de  $10^{-11}$  à  $10^{-7}$  Newtons), le taux de portance et la raideur de contact. Le tracé de la force de contact en fonction du déplacement  $F = f(\delta)$  montre bien l’effet d’un changement d’échelle entre la texture à motifs en ripples et les surfaces à motifs en cratères (A, B). Ce changement d’échelle qui se produit pour un enfoncement de 270 nanomètres, a un effet sur la raideur de contact, les forces exercées par les cellules et le taux de portance. Cet effet d’échelle des motifs imprimés reste cohérent avec l’analyse morphologique qui montre un comportement différent pour les motifs en ripples dans les premières petites longueurs d’onde des motifs.

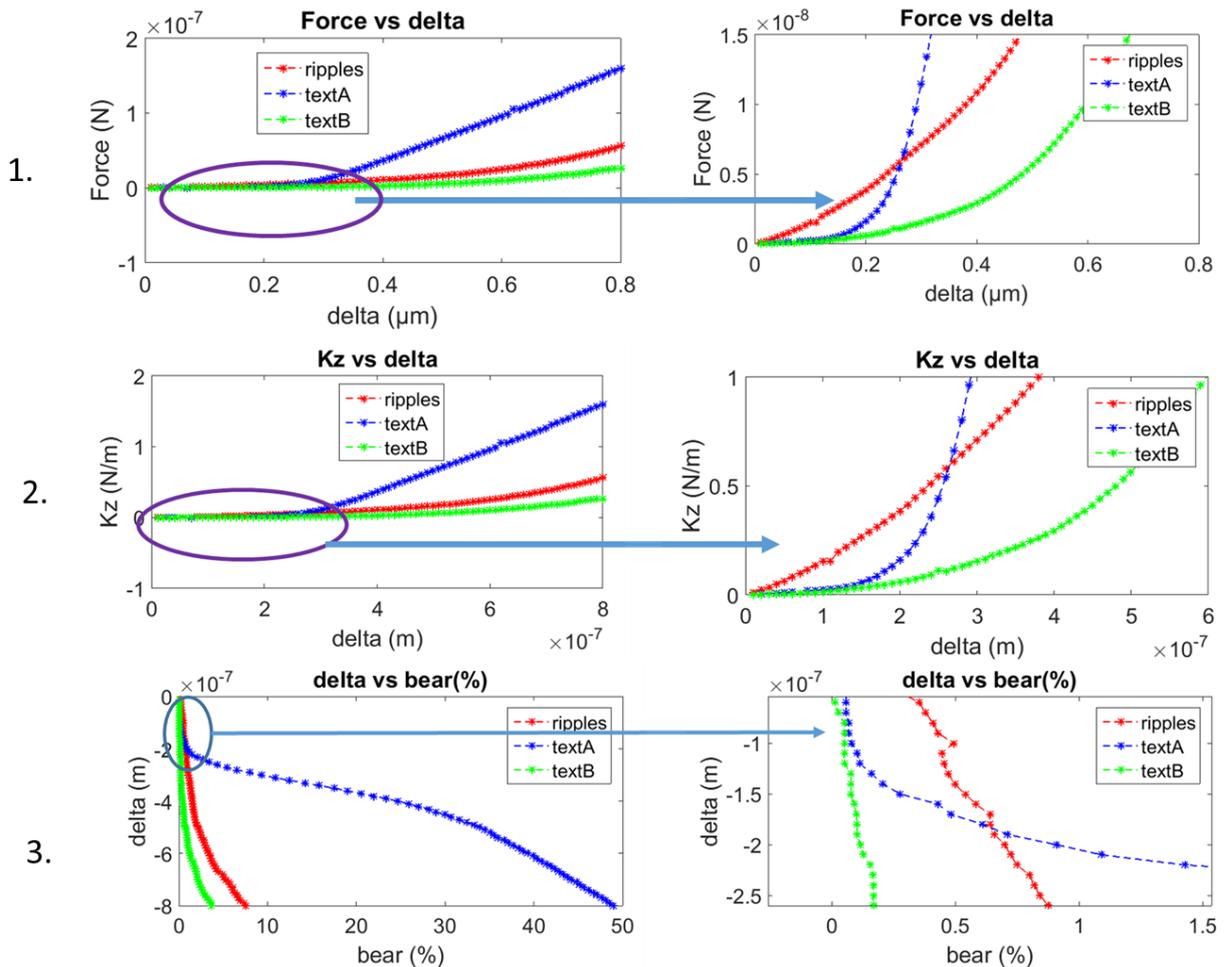


Figure 2. Paramètres de contact : 1) Force en fonction du déplacement, 2) la raideur de contact en fonction du déplacement, 3) Taux de portance en fonction du déplacement, avec un zoom au début de chaque figure qui montre le l'effet du changement d'échelle.

### CONCLUSION

Les approches développées dans cette étude montrent que la texturation laser de la surface du titane modifie significativement la mécanique du contact des cellules en fonction des échelles des motifs des textures. La méthode de texturation par laser femtoseconde offre une grande versatilité dans l'obtention des échelles de motifs des textures capables de modifier localement la raideur de contact, les forces ressenties par les cellules et la stimulation de la mécano-transduction cellulaire.

### Références

[1] Dumas, V., Guignadon, A., Vico, L., Maclair, C., Zapata, X., Linossier, MT., Bouleftour, W., Garnier, J., Peyroche, S., Dumas, JC, Zahouani, H., Rattner, A. "Femtosecond laser nano/micro patterning of titanium influences mesenchymal stem cell adhesion and commitment. (2015). *Biomedical Materials* 10(2015), pp 1-13.

[2]Zahouani H, Assoul M, Vargiolu R., Mathia T., (2001). "The morphological tree transform of surface motifs. Incidence in tribology. *INT. J. MACH. TOOLS AND MANUFACTURING*. Vol 41 pp 1961-1979.

[2] Zahouani H, Ben Tkaya M, Mezghani S, Pailler-Mattéi C. (2011) Adhesive contact in the context of multi-asperity interaction. *Comptes Rendus Mécanique*, Vol. 339, Issues 7/8, pp. 502-517.

# INFLUENCE OF DIAMOND-LIKE CARBON COATINGS AND SERUM LIQUID ON FRETTING BEHAVIORS OF Ti-6Al-4V FOR NECK ADAPTER-FEMORAL STEM CONTACT

H.H. Ding<sup>1</sup>, V. Fridrici<sup>1</sup>, G. Bouvard<sup>1</sup>, J. G eringer<sup>2</sup>, J. Fontaine<sup>1</sup> and Ph. Kapsa<sup>1</sup>

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. Mines Saint-Etienne, Unité Inserm Sainbiose U1059, Université de Lyon, 158 cours Fauriel 42023 Saint-Etienne-France

## MOTS CLES

Diamond-like carbon coating, Serum, Fretting, Coating response wear map

## INTRODUCTION

Neck adapter has been introduced into total hip arthroplasty to facilitate the hip replacement surgery. However, it introduced a new interface, namely the femoral stem-neck adapter interface, which is propitious to fretting damages during walking. Furthermore, Ti-6Al-4V, a widely-used material in prostheses, has poor fretting resistance. In this case, diamond-like carbon (DLC) coatings, which offered the unique combination of high wear resistance and low friction in several environments [1], may be considered to solve this problem. In addition, the presence of body fluid in the hip joint may influence the tribological performance of Ti-6Al-4V and DLC coatings.

In this study, our first objective is to investigate the effect of a DLC coating on fretting behaviors of Ti-6Al-4V for neck adapter-femoral stem contact. Our second objective is to investigate the effect of the serum liquid on the tribological performance of Ti-6Al-4V and of the DLC coating.

## EXPERIMENTAL DETAILS

Fretting tests were conducted using a tension-compression hydraulic machine with a cylindrical-on-flat surface contact. The flat and cylindrical samples were made of Ti-6Al-4V. Certain flat samples were coated with a DLC coating via plasma-assisted chemical vapor deposition, whereas others were not coated. The roughness ( $S_a$ ) of the flat surface was approximately 20 nm; the roughness ( $S_a$ ) of the cylindrical surface was approximately 720 nm. The thickness of the DLC coating was approximately 2  $\mu\text{m}$ . The coating deposition process had no visible effect on the flat surface roughness. The serum liquid was composed of half new born calf serum and half distilled water. For the tests under the serum liquid condition, the liquid was delivered into the contact surfaces at a rate of 2 drips per second; and it was recycled via a bump.

Four groups of tests were conducted: (1) Ti-6Al-4V flat/Ti-6Al-4V cylinder contact under the ambient condition (temperature: 18~23  $^\circ\text{C}$ , humidity: 30~50 %), (2) Ti-6Al-4V flat/Ti-6Al-4V cylinder contact under the serum liquid condition, (3) DLC-coated flat/Ti-6Al-4V cylinder contact under the ambient condition, and (4) DLC-coated flat/Ti-6Al-4V cylinder contact under the serum liquid condition. For each group, three displacement amplitudes ( $\pm 20$ ,  $\pm 40$  and  $\pm 70$   $\mu\text{m}$ ) associated with different normal forces, from 200 to 1200 N (i.e., initial maximum contact pressures from 280 to 690 MPa), were applied. The frequency was 5 Hz. The number of cycles was 100 000.

The displacement  $\delta$ , the normal force  $P$ , and the tangential force  $Q$  were recorded, which enabled us to plot the  $Q$ - $\delta$  fretting loop and to calculate the friction coefficient. After the testing, the wear scars were observed via various methods.

## RESULTS AND DISCUSSION

Regarding the tests without coating (Ti-6Al-4V/Ti-6Al-4V contact), under the ambient condition, the friction coefficient is high (0.8–1.2). The total wear volume (the sum of the wear volumes of the flat and the cylindrical surfaces) exhibited a significant increase with the increase in the displacement. With the increase in the normal force, the wear volume exhibited a significant increase under the large-displacement condition of  $\pm 70 \mu\text{m}$ , but it presented no visible change under the displacement condition of  $\pm 40 \mu\text{m}$ , and the wear volume was close to 0 under the small-displacement condition of  $\pm 20 \mu\text{m}$ . Under the serum-liquid conditions, concerning the tests under the largest-displacement condition of  $\pm 70 \mu\text{m}$ , the coefficients were low (0.2–0.4), the wear volumes were lower than those under the ambient conditions. Under the displacement condition of  $\pm 40 \mu\text{m}$ , the wear volumes for tests under the serum liquid condition were much higher than those under the ambient condition. Under the displacement of  $\pm 20 \mu\text{m}$ , the wear volumes were still close to 0.

For tests with DLC coating (DLC coating/Ti-6Al-4V contact), coating response maps could be divided into two areas (Figure 1): the coating working area (under small-displacement and low-normal-force conditions), and the coating failure area (under large-displacement and high-normal-force conditions). In the coating working area, the coating was not or was only partly removed, the friction coefficient was low, and the wear volume was small. In the coating failure area, the coating has been almost entirely removed at the completion of the test. The presence of the serum liquid extended the coating working area towards higher-normal-force conditions.

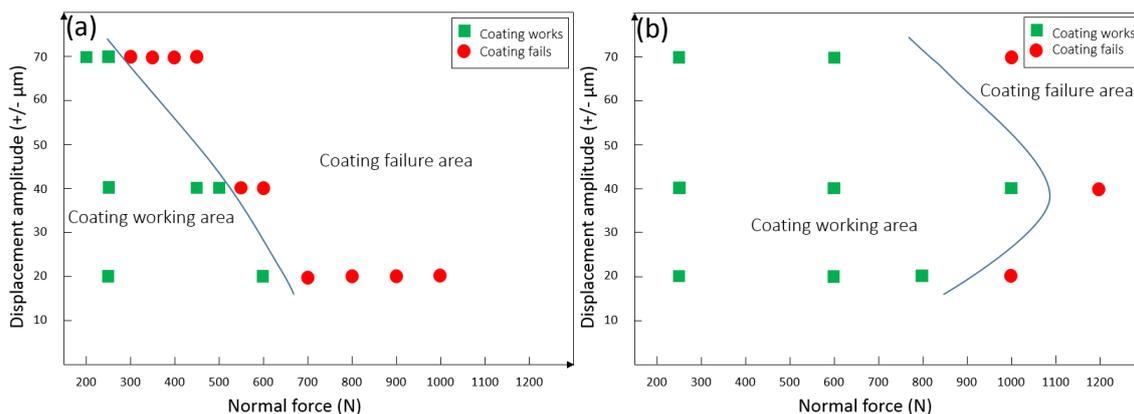


Figure 1: Coating response wear maps: (a) under ambient conditions, (b) under serum liquid conditions.

## CONCLUSION

Regarding the Ti-6Al-4V flat/Ti-6Al-4V cylinder contact, the presence of the serum liquid decreased the friction coefficients and the wear volumes for tests under the largest displacement of  $\pm 70 \mu\text{m}$ . However, the presence of the serum liquid increased the wear volumes for tests under the displacement of  $\pm 40 \mu\text{m}$ . Regarding the DLC coated flat/Ti-6Al-4V cylinder contact, the DLC coating could protect the Ti-6Al-4V substrate from fretting wear and damage under the low-normal-force conditions (i.e., in the coating working area). The presence of the serum liquid extended the coating working area towards higher-normal-force conditions.

## Références

- [1] J. Fontaine (2008) « Towards the use of diamond-like carbon solid lubricant coatings in vacuum and space environments », Proc. IMechE Part J: J. Engineering Tribology, **222**, pp. 1015-1025.

# DÉVELOPPEMENT D'UN DOIGT ARTIFICIEL INSTRUMENTÉ POUR SURFACES TEXTILES

K. Peyre<sup>1</sup>, M. Tournalias<sup>1</sup>, M.-A. Bueno<sup>1</sup>, F. Spano<sup>2</sup> et R. M. Rossi<sup>2</sup>

1. Laboratoire de Physique et Mécanique Textiles, EA4365, Université de Haute-Alsace, Mulhouse

2. Empa, Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology, Laboratory for Biomimetic Membranes and Textiles, Lerchenfeldstrasse 5, St. Gallen, Switzerland

## MOTS CLES

Doigt artificiel, textile, tactile, fibre optique

## INTRODUCTION

L'objectif de ce travail est de mettre au point un capteur mécanique capable de retranscrire le toucher en utilisant une fibre optique comme élément senseur. Le développement d'un doigt artificiel permet de raccourcir le temps de développement de nouvelles surfaces en évitant l'utilisation d'un panel humain. L'avantage essentiel de la fibre optique est qu'elle n'est pas sensible à l'humidité.

Ce travail repose sur l'utilisation d'une fibre optique polymérique qui agira comme capteur de déformation au sein du doigt artificiel. L'utilisation de fibres optiques comme capteurs de déformation est connue [1] et plus particulièrement dans la conception de capteurs intégrés à des systèmes flexibles [2]. L'application du doigt artificiel couvre de nombreuses applications comme la préhension d'objets dans le cadre de mains robotiques [3] ou dans la découverte de surfaces par voie tactile [4].

## CONCEPTION DU DOIGT ARTIFICIEL

Le doigt artificiel a été développé de manière biomimétique à partir des critères d'un doigt humain et des résultats préalablement obtenus lors de la conception d'un doigt artificiel passif [4]. Le doigt humain possède une structure complexe et hétérogène, avec le stratum corneum, l'épiderme, le derme, l'hypoderme, des fluides (sang, eau), ainsi que l'os et l'ongle. Le modèle simple proposé est composé d'un bâti en aluminium cylindrique qui contient un cœur de polydiméthylsiloxane (PDMS) (Sylgard® 184, Dow Corning) dans lequel est noyée la fibre optique polymérique (Geniomer 100, Wacker chimie AG) qui servira de capteur. Un plot en PDMS de plus haut module élastique que le cœur est placé à la base du doigt artificiel et correspond à la surface de contact du doigt. Ce plot possède également une texture moulée pour représenter des dermatoglyphes. Il a été montré que la présence de cette texture au niveau de la surface de contact du doigt est primordiale pour reproduire le comportement mécanique du doigt lors du frottement avec une surface textile pileuse [4].

## RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Le doigt artificiel a été monté sur un tribomètre réalisant un mouvement alternatif linéaire de la surface frottée par rapport au support de doigt fixe. Le montage ne permet aucun déplacement vertical du doigt artificiel dans cette configuration. La surface frottée est montée sur un support fixé à un capteur de force tri-axe. Ce montage permet d'obtenir des mesures de force au plus près de la surface de contact. Le doigt artificiel est relié à une source lumineuse halogène stable de 10W et à une photodiode par deux fibres optiques large bande commerciales. Ce montage permet de stimuler en frottement le doigt artificiel avec une charge normale initiale définie. Les mesures réalisées permettent d'obtenir la variation de force normale et tangentielle ayant lieu au cours du cycle de frottement par le

capteur tri-axe, et la photodiode permet d'obtenir la variation d'irradiance sur celle-ci. Les signaux obtenus sont acquis par un analyseur de signaux ce qui assure la concordance temporelle des mesures relevées.

Les surfaces testées à ce jour correspondent à des surfaces étudiées le un doigt artificiel passif préalablement développé [4]. Les surfaces textiles considérées sont représentées par un velours et un Pekin. Le velours présente une grande pilosité, ce qui rend son comportement au frottement particulièrement anisotropique. Le Pekin est un textile qui présente une faible pilosité mais possède des rainures en surface dues à sa structure.

Lors du frottement, les variations d'irradiance sont dues à la déformation de la fibre optique au sein du doigt artificiel. Une corrélation a été observée entre les variations d'irradiance et les forces normales et tangentielles agissant sur le doigt artificiel. En effet, l'irradiance peut être obtenue à partir d'un modèle établi à partir des forces normale et tangentielle et dont les paramètres sont déterminés par la méthode des moindres carrés.

Les essais réalisés montrent un coefficient de détermination de 0.99 entre l'irradiance et le modèle pour le velours et de 0.95 pour le Pekin.

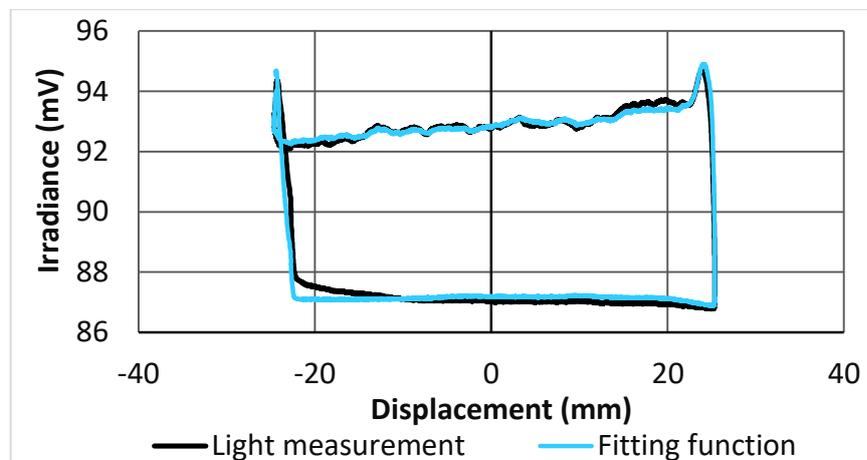


Figure 1 Exemple de signal irradiance sur le velours et la loi d'ajustement appliquée à cet essai

## CONCLUSION

Le travail présenté met en avant la conception et l'exploitation d'un doigt artificiel instrumenté réalisé selon une structure à plusieurs couches proche de celle du doigt. L'utilisation d'une fibre optique polymérique comme capteur pour cette application a été validée. Un modèle permettant d'exprimer l'irradiance en fonction des forces normale et tangentielle a été établi et validé pour deux surfaces textiles très différentes.

## Références

- [1] Ahmadi R, Arbatani S, Ozhikandathil J, Packirisamy M, Dargahi J. A multi-purpose optical microsystem for static and dynamic tactile sensing. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2015;235:37-47.
- [2] Krehel M, Schmid M, Rossi R, Boesel L, Bona G-L, Scherer L. An Optical Fibre-Based Sensor for Respiratory Monitoring. *Sensors*. 2014;14:13088-101.
- [3] Astrid RF. Smart control of a soft robotic hand prosthesis [PhD Thesis]: Université Paris Ouest Nanterre La Défense; 2016.
- [4] Camillieri B, Bueno M-A. Artificial finger design for investigating the tactile friction of textile surfaces. *Tribology International*. 2017;109:274-84.

# INTERPRETATION TRIBOLOGIQUE DE LA PERCEPTION TACTILE DE SURFACES TEXTUREES

B. Weiland<sup>1</sup>, A. Witt<sup>2</sup>, L. Carpentier<sup>1</sup>, P.-H. Cornuault<sup>1</sup>

1. Institut Femto-ST, Département de Mécanique Appliquée, UMR CNRS 6174, UBFC, 24 rue de l'Épitaphe, 25000 Besançon, France

2. Laboratoire d'Étude de l'Apprentissage et du Développement, UMR CNRS 5022, UBFC, 11 Esplanade Erasme, 21000 Dijon, France

## MOTS CLES

Surfaces texturées, Perception tactile, Frottement, Vibrations induites, Adhésion

## INTRODUCTION

Ces dernières années, l'industrie a porté un intérêt grandissant à la qualité sensorielle de leurs produits, et notamment à la sensation tactile qu'ils procurent. Selon Hollins *et al*, l'ensemble des surfaces matérielles peuvent être définies selon quatre dimensions psycho-perceptives tactiles : « glissant/collant », « lisse/rugueux », « chaud/froid » et « dur/mou » [1]. La texturation de surface est un moyen de parvenir à la réalisation d'une variété de surfaces appartenant, du point de vue de la perception tactile, aux deux premières dimensions susnommées. Néanmoins, les liens entre les paramètres topographiques des textures et la sensation ressentie lors du toucher sont complexes, et la prédiction de la qualité tactile d'une texture nécessite une meilleure compréhension du contact doigt/surface. L'objectif de cette étude est de tisser des liens entre la perception recueillie lors du toucher de surfaces texturées, et le comportement tribologique du contact entre un doigt et ces mêmes surfaces.

## SURFACES TEXTUREES

Les surfaces texturées étudiées, obtenues par fabrication additive, ont été réalisées dans le but de se focaliser sur la dimension psycho-perceptive « rugueux/lisse ». Il s'agissait de surfaces planes et parsemées de plots cylindriques d'une hauteur d'environ 100  $\mu\text{m}$ . Un set de 10 surfaces a été étudié, correspondant à des diamètres  $D$  de plots allant de 0,2 à 4 mm et un espacement  $SP$  entre le centre des plots égal à  $2D$ .

## PERCEPTION TACTILE

Un panel de 26 sujets âgés de  $23 \pm 3$  ans a participé à une campagne psycho-physique d'évaluation de la rugosité des surfaces texturées. Après une étape de familiarisation, il a été demandé à chaque sujet de noter sur une échelle allant de 0 à 20 la rugosité perçue de chaque surface texturée lors de 6 passations effectuées selon un ordre pseudo-aléatoire, à l'aveugle, et avec leur main dominante. La Figure 1 montre les notes moyennes obtenues pour l'ensemble du panel. Ces résultats sont conformes au modèle de fonction bi-exponentielle observé par Eck *et al* avec des textures du même type [2].

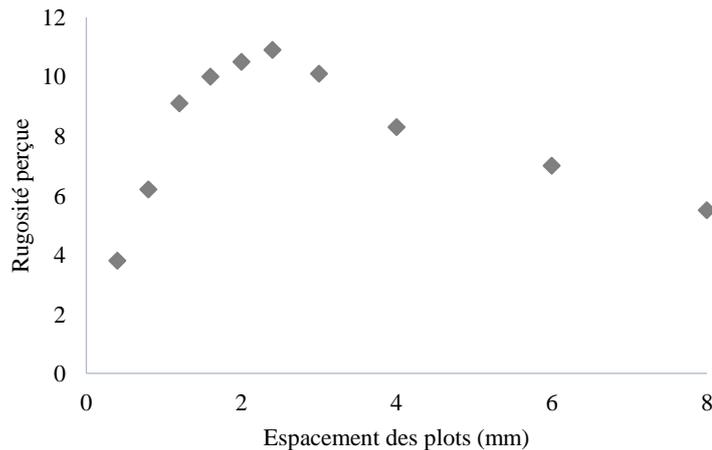


Figure 1 : Résultats de perception du test de jugement

## CARACTERISATION TRIBOLOGIQUE

Des essais de frottement *in vivo* doigt/surfaces texturées ont été réalisés sur un sujet âgé de 24 ans. Le sujet était actif en ce sens qu'il effectuait lui-même le déplacement unilatéral de son index droit et l'application de la force normale sur les surfaces texturées. Ces dernières ont été placées sur un tribomètre permettant de mesurer la force normale  $F_N$ , la force tangentielle  $F_T$ , et le déplacement  $d$  du doigt. L'accélération  $\ddot{x}$  engendrée par le frottement a été également mesurée à l'aide d'un accéléromètre placé sur l'ongle du sujet. Les signaux  $F_N$ ,  $F_T$ ,  $d$  et  $\ddot{x}$  ont été acquis avec une fréquence d'échantillonnage de 10 kHz. Par ailleurs, des essais d'indentation *in vivo* de l'index droit du sujet sur les surfaces texturées ont été réalisés à l'aide d'un appareil dédié [3] de manière à caractériser l'adhésion doigt/surface.

## CONCLUSION

Les résultats psycho-physiques permettent de distinguer clairement deux groupes de surfaces. Pour les textures les plus fines ( $SP < 2,5$  mm), la rugosité perçue croît avec  $SP$ , tandis que la rugosité perçue décroît avec  $SP$  pour les textures les plus grossières ( $SP > 2,5$  mm). L'analyse du coefficient de frottement, de la force d'adhésion, de la valeur RMS et de la densité spectrale de puissance de  $\ddot{x}$ , met en évidence une modification du comportement tribologique du contact doigt/surface lorsque  $SP$  augmente. Le changement de comportement tribologique observé coïncide avec la modification de l'évolution de la rugosité perçue en fonction de  $SP$ , permettant de distinguer les textures fines des textures grossières, tant d'un point de vue physique que perceptif.

- [1] M. Hollins, R. Faldowski, S. Rao, F. Young (1993) « *Perceptual dimensions of tactile surface texture: a multidimensional scaling analysis* », *Percept. Psychophys.*, **54**, pp. 697-705.
- [2] J. Eck, A.L. Kaas, J.L.J. Mulders, R. Goebel (2013) « *Roughness perception of unfamiliar dot pattern textures* », *Acta Psychologica*, **143**, pp. 20-34.
- [3] P-H. Cornuault, L. Carpentier, M-A. Bueno, J-M. Cote, G. Monteil (2015) « *Influence of Physico-chemical, mechanical and morphological fingerpad properties on the frictional distinction of sticky/slippery surfaces* », *Jour. Royal Soc. Interface*, **12** (110).

*Vendredi 18 Mai*

# TRIBOLOGIE DE FILMS LIMITES : INSATURATION ET FRICTION À L'ÉCHELLE MOLÉCULAIRE

A. Crespo, N. Morgado, D. Mazuyer et J. Cayer-Barrioz

*Ecole Centrale de Lyon, Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes CNRS UMR 5513  
36 avenue Guy de Collongue, 69134 Ecully Cedex, France  
juliette.cayer-barrioz@ec-lyon.fr*

## MOTS CLES

Acides gras, Friction moléculaire, Modificateurs de frottement, Nanotribologie

## INTRODUCTION

Les mécanismes de friction en régime limite restent méconnus. Un moyen de contrôler cette friction limite est l'utilisation de molécules qui évitent le contact direct entre aspérités en s'adsorbant sur les surfaces. Dans ce contexte, l'objectif de cette présentation est de comprendre les liens entre l'architecture moléculaire, ici la présence de saturation au sein de la chaîne alkyle, l'organisation de monocouches auto-assemblées et la réponse en friction d'un contact glissant pour des conditions tribologiques stationnaires et variables au cours du temps.

## STRATEGIE EXPERIMENTALE

Afin d'obtenir une caractérisation in-situ à l'échelle moléculaire, le tribomètre ATLAS, développé au LTDS a été utilisé [1]. Ce dispositif permet des déplacements quasi-statiques et dynamiques d'une sphère en regard d'un plan selon trois directions, X, Y et Z. Une goutte de lubrifiant, composé d'acides gras dilués en faible concentration dans du dodécane, est déposée entre la sphère et le plan. Des expériences d'écrasement et de friction sont réalisées, simultanément à une caractérisation rhéologique de l'interface confinée, en termes d'amortissement et d'élasticité.

## RESULTATS ET DISCUSSION

Les résultats montrent que les acides gras s'adsorbent physiquement sur les surfaces pour former une couche viscoélastique de 1.5 nm sur chaque surface. L'architecture moléculaire des acides gras, la présence d'une insaturation en C9 en configuration Trans ou Cis, influe fortement, à la fois sur le taux de couverture et sur la cinétique d'adsorption des couches. Elle gouverne également la réponse en friction interfaciale et la rhéologie de ces monocouches auto-assemblées. La réponse transitoire de chaque couche est décrite en détail lors d'un changement rapide de vitesse ou d'une sollicitation arrêt/redémarrage.

Le comportement en friction est discuté grâce à des modèles théoriques qui couplent la rhéologie interfaciale et la dynamique des jonctions formées entre les couches adsorbées, en fonction de l'organisation moléculaire.

## CONCLUSION

La structuration des acides gras, additifs modificateurs de frottement, a été étudiée sous confinement. Ces acides gras diffèrent de par la présence d'une double liaison dans leur chaîne alkyle. A partir d'une analyse des forces et des déplacements en mode quasi-statiques et dynamiques, nous

avons mis en évidence le rôle de l'insaturation sur l'organisation moléculaire ainsi que les propriétés mécaniques des couches adsorbées. Même si la tête polaire gouverne la nature des interactions surface/molécule, nous montrons que la configuration de la chaîne hydrocarbonée induit des effets stériques importants, à la fois sur le processus d'adsorption et sur l'organisation moléculaire des couches adsorbées et leurs propriétés mécaniques. Ces organisations se traduisent directement par des réponses en friction variées, aussi bien sous sollicitations stationnaires que variables au cours du temps.

## Références

- [1] A. Crespo, D. Mazuyer, N. Morgado, A. Tonck, JM. Georges and J. Cayer-Barrioz (2017) « *Methodology to Characterize Rheology, Surface Forces and Friction of Confined Liquids at the Molecular Scale Using the ATLAS apparatus* », Tribology Letters, **65** : 138.

# COMPREHENSION DES PHENOMENES THERMOMECHANIQUES ET DU COMPORTEMENT DES MATERIAUX DURANT UN CONTACT HAUTE VITESSE

M. Thévenot<sup>1</sup>, V. Wagner<sup>1</sup>, J.-Y. Paris<sup>1</sup>, G. Dessein<sup>1</sup>, J. Denape<sup>1</sup>, A. Brunet<sup>2</sup> et T. Chantrait<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire Génie de Production LGP, Université de Toulouse, INP-ENIT, Tarbes, France

<sup>2</sup>Safran Aircraft Engines, centre de Villaroche, France

<sup>3</sup>Safran Tech, 1 rue Geneviève Aube, 78114 Magny-les-Hameaux, France

**MOTS CLES :** Joints labyrinthes, Contact haute vitesse, Comportement mécanique, Comportement thermique, Comportement des matériaux, Revêtement abrasable, Dynamique de troisième corps.

## INTRODUCTION

Afin d'augmenter l'efficacité des turboréacteurs des avions civils, il est impératif de réduire au maximum les fuites d'air entre les composants stationnaire (stator) et rotatif (rotor) des systèmes d'air. Les joints labyrinthes sont développés dans ce but et assurent un faible espace entre les pièces. Des contacts entre les dents du joint labyrinthe (rotor) et le carter moteur (partie stator du joint) peuvent survenir durant le fonctionnement du moteur. Un revêtement abrasable est déposé sur le stator afin de s'user rapidement en cas de contact et d'éviter un endommagement du rotor. Un banc de contact haute vitesse développé au Laboratoire Génie de Production de l'ENI de Tarbes permet de reproduire des conditions et des géométries de contact aussi proches que possible de celles rencontrées sur turboréacteur. Cet article présente le fonctionnement de ce banc d'essai ainsi que son instrumentation. Les données obtenues sont analysées pour comprendre les mécanismes en jeu lors de ces brèves interactions de contact et suggérer un scénario d'usure des pièces du labyrinthe.

## INTERACTION ROTOR-STATOR

Le banc d'essai est basé sur l'utilisation d'un centre d'usinage 5 axes, avec un contrôleur numérique Heidenhain et une broche haute vitesse à paliers magnétiques. Les efforts axiaux et radiaux de l'interaction sont directement mesurés par la broche durant le test. Un couplemètre mesure le couple développé par le contact et permet le calcul des efforts tangentiels et du coefficient de frottement liés à l'interaction. La température diffusée à travers le rotor durant l'essai est obtenue avec une caméra thermique et l'ensemble des signaux sont synchronisés grâce à un dispositif électrique présenté dans un précédent travail [1].

Pour cette étude, deux pièces spécifiques sont utilisées pour représenter les deux parties rotor et stator d'un joint labyrinthe. Afin de simplifier l'étude, la pièce rotor est un dôme de Ti6Al4V tenant lieu d'une dent unique de joint labyrinthe. La pièce stator est revêtue d'un abrasable à base d'aluminium-silicium-polyester. La géométrie des pièces permet une zone de contact de forme

annulaire. Les essais étudiés sont réalisés avec des vitesses linéaires en extrémité du rotor de 38 et 76  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . La dynamique d'interaction est pilotée avec des vitesses d'incursion du rotor dans l'abradable de 0,001, 0,01 et 8,3  $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$  ainsi que deux profondeurs d'incursion 0,03 et 0,05 mm.

## ANALYSE DES DONNEES

L'ensemble des données obtenues durant une interaction sont représentées Fig. 1. Recouper ces informations permet de déduire quels vont être les différents mécanismes en jeu lors du contact. De plus, comparer les données de différents essais permet d'observer l'influence de chaque paramètre (vitesse de rotation du rotor, vitesse et profondeur d'incursion) sur le comportement des matériaux.

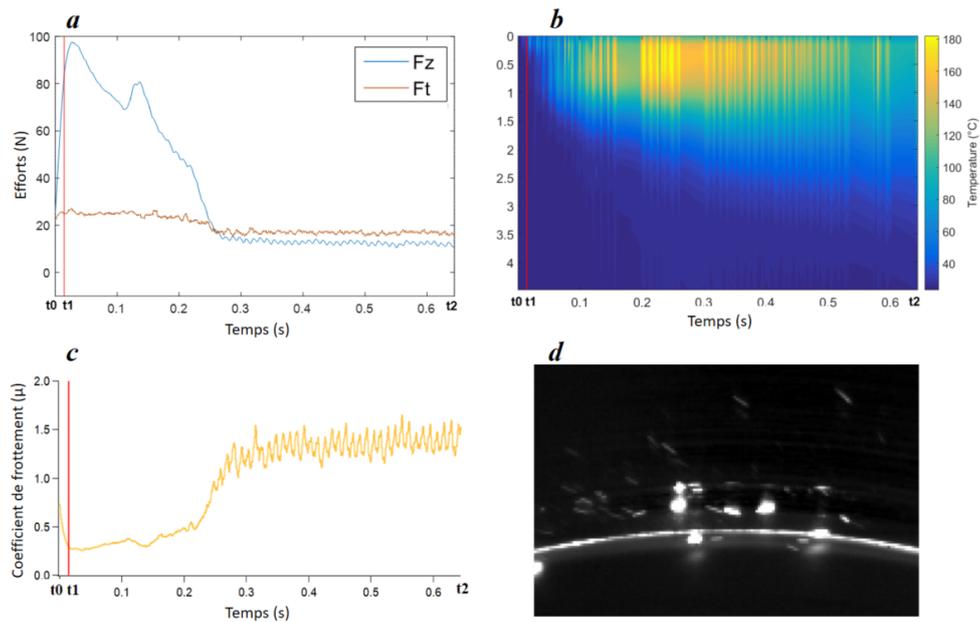


FIGURE 1 – (a) efforts axiaux  $F_z$  et tangentiels  $F_t$ , (b) température diffusée à travers le rotor, (c) coefficient de frottement, (d) éjection de matière

## CONCLUSION

Des observations faites après essai (microscope optique, MEB, EDX) permettent d'identifier les différents débits de matière, utilisés pour mettre en place un modèle phénoménologique du troisième corps dans le contact. Les caractérisations effectuées pendant l'essai permettent d'identifier les mécanismes à l'origine de ces débits et de les situer dans le temps. L'influence de chaque paramètre d'essai sur ces débits est mise en avant et un scénario d'usure des parties stator et rotor du joint labyrinthe est proposé à partir de ces observations.

## Références

- [1] C. DELEBARRE et al. "An experimental study of the high speed interaction between a labyrinth seal and an abradable coating in a turbo-engine application". In : *Wear* **316.1** (2014), p. 109–118. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.04.023>.

## Influence de la formation d'un troisième corps sur les affectations thermique et mécanique

A. Mathieu Marquer<sup>1,2</sup>, B. Sylvain Philippon<sup>1</sup>, C. Laurent Faure<sup>1</sup> et Joffrey Tardelli<sup>2</sup>

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

2. Institut de Recherche Technologique – Matériaux, Métallurgie et Procédés (IRT M2P), Bâtiment CIRAM, 4 rue Augustin Fresnel, 57070 Metz, France

### MOTS CLES

Frottement sec, Haute vitesse de glissement, Ti6Al4V, Revêtement, Troisième corps, Microstructure

### INTRODUCTION

De nombreux matériaux nécessitent l'utilisation de revêtements pour permettre d'assurer un comportement adapté aux sollicitations envisagées. Ainsi, les alliages de titane peuvent être protégés par des revêtements dits « anti-fretting » lorsqu'ils sont impliqués dans des contacts sujets à ce type de sollicitations. C'est par exemple le cas dans les turboréacteurs, au niveau de la liaison entre le pied d'aube et le disque de rotor : ces deux composants étant en Ti6Al4V, le pied d'aube est revêtu d'un matériau anti-fretting comme le CuNiIn ou le CoCrAlYSiBN.

Lors d'événements exceptionnels, les contacts entre alliages de titane peuvent être sujets à des sollicitations de frottement sévères. La vitesse de glissement peut ainsi atteindre 60 m/s et la pression de contact 300 MPa. Le comportement tribologique du contact varie alors très fortement par rapport à celui observé en conditions usuelles de service.

Suite à ce type d'interaction, les composants impliqués peuvent être affectés mécaniquement et thermiquement. Dans le cas du turboréacteur, les affectations du disque de rotor peuvent influencer de manière significative son comportement mécanique. Nous nous intéresserons donc à l'influence du matériau anti-fretting utilisé sur les affectations microstructurales de la contrepièce non-revêtue.

### DEMARCHE PREALABLE

Des essais de glissement ont été réalisés à une vitesse initiale de glissement de 40 m/s et sous une pression de contact apparente de 110 MPa à l'aide d'un tribomètre patin-glisseur. La configuration employée est celle décrite par Chassaing *et al.* [1]. Les essais ont été réalisés pour des couples de matériaux constitués d'un glisseur (mobile) en Ti6Al4V frottant contre des patins (fixes) en Ti6Al4V revêtu. Les revêtements employés sont deux revêtements anti-fretting classiquement employés au niveau de la liaison pied d'aube / disque de rotor de turboréacteur.

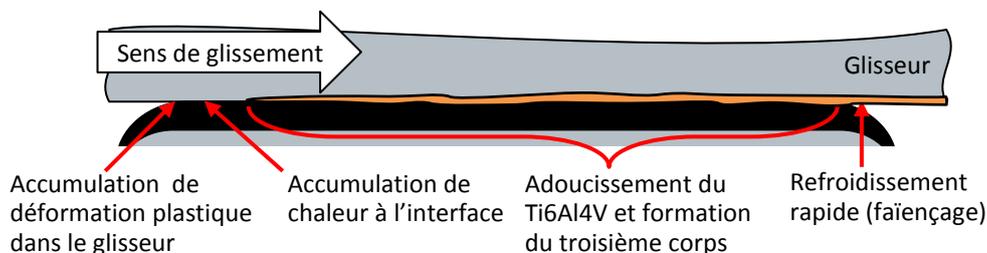


Figure 1: Scénario de comportement tribologique du contact étudié.

Les essais effectués, ainsi que les résultats disponibles dans la littérature pour un couple sans revêtement [1] engendrent des efforts de frottement, et donc des énergies dissipées, similaires. Dans ces trois cas, le contact atteint un état stationnaire quasi-instantanément. Celui-ci est décrit par le scénario représenté figure 1 dans laquelle on considère l'évolution de l'état d'un élément de la surface du glisseur parcourant le contact [2, 3]. L'élément subit initialement des contraintes de frottement élevées, ce qui entraîne la déformation de la surface du glisseur. Le travail de frottement est dissipé sous forme de chaleur, ce qui entraîne une élévation rapide de la température au niveau du contact. Lorsque la température devient suffisamment élevée, le Ti6Al4V s'adoucit et forme un troisième corps qui vient lubrifier l'interface de contact jusqu'à la sortie du contact. En sortie du contact, la surface du glisseur refroidit rapidement, ce qui entraîne l'apparition d'une zone affectée thermiquement.

## METHODE D'ANALYSE

Les travaux de frottement dissipés sont similaires et les matériaux des glisseurs sont identiques dans les trois configurations (patin avec revêtement CoCrAlYSiBN, CuNiIn, et sans revêtement). Ceci permet de comparer l'affectation du glisseur en Ti6Al4V en fonction des revêtements employés.

A partir d'observations effectuées en microscopie électronique à balayage, les profondeurs affectées thermiquement et mécaniquement ont été confrontées à la position d'apparition d'un dépôt de troisième corps à la surface du patin.

## RESULTATS ET CONCLUSION

Les résultats obtenus mettent en évidence une affectation thermique d'autant plus importante et une affectation mécanique d'autant plus faible que le troisième corps apparaît tardivement au niveau du contact.

Pour expliquer ces phénomènes, il est nécessaire de considérer le rôle lubrifiant du troisième corps. Le contact est ainsi divisé en une partie « lubrifiée » par le troisième corps (coefficient de frottement local négligeable) et une partie « sèche », dont le coefficient de frottement local est d'autant plus important que le troisième corps apparaît tôt. Les contraintes de cisaillement engendrées au niveau de cette partie sèche entraînent la formation d'une zone affectée mécaniquement dans le glisseur dont l'épaisseur est inversement corrélée à la distance d'apparition du troisième corps.

En considérant une dissipation d'énergie nulle au niveau de la partie « lubrifiée » du contact, la surface du glisseur subit un échauffement jusqu'à l'apparition du troisième corps puis refroidit au cours du frottement lubrifié. La distance d'apparition du troisième corps est donc corrélée à un temps d'échauffement de la surface du glisseur. Comme, la transformation  $\alpha \rightarrow \beta$ , nécessaire à l'apparition d'une zone affectée thermiquement, est basée sur des mécanismes de diffusion, la profondeur transformée est d'autant plus grande que le temps de maintien à haute température de la surface est élevé. Cette profondeur est donc liée, par la cinétique de transformation, à la distance d'apparition du troisième corps.

Ces résultats mettent en évidence le lien entre les affectations thermique et mécanique du glisseur non revêtu et la distance d'apparition du troisième corps, d'une part, par l'intermédiaire de la contrainte locale de frottement, et d'autre part par celui de la cinétique de transformation  $\alpha \rightarrow \beta$ .

## Références

- [1] G. Chassaing, L. Faure, S. Philippon, M. Coulibaly, A. Tidu, P. Chevrier, J. Meriaux (2014) « *Adhesive wear of a Ti6Al4V tribopair for a fast friction contact* », *Wear*, 320, pp. 25-33.
- [2] M. Marquer, S. Philippon, L. Faure, J. Tardelli (2016) « *Effet de l'utilisation d'un revêtement anti-fretting sur le comportement d'un contact entre alliages de titane en conditions sévères* », communication présentée aux JIFT 2016
- [3] M. Marquer (2017) « *Effet de l'utilisation d'un revêtement anti-fretting sur le comportement d'un contact entre alliages de titane en conditions sévères* » (Thèse de doctorat), Université de Lorraine

# Caractérisation de l'influence de la température sur la mesure des efforts et de l'usure pour un revêtement abrasable AlSi-PE d'un compresseur basse pression en condition de contact représentatif

B. Martinet<sup>1,2</sup>, S. Skiba<sup>1,2</sup>, A. Cappella<sup>1</sup>, S. Philippon<sup>1</sup>, C. Montebello<sup>2</sup>, et S. Selezneff<sup>3</sup>

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

2. Safran Aircraft Engines, Rond-Point René Ravaud, 77550 Moissy Cramayel, France

3. Safran Aircraft Engines, Route Henri Auguste Desbrières, 91003 Evry, France

## MOTS CLES

Revêtement abrasable, interaction à grande vitesse, mesure de température, mesure des efforts

## INTRODUCTION

Cette étude porte sur la caractérisation thermomécanique d'un abrasable à base aluminium-silicium polyester, utilisé par les motoristes aéronautiques pour limiter les fuites inter-étages en réduisant les jeux fonctionnels entre les parties fixes (carter) et mobiles (aubes) des turboréacteurs tout en préservant l'intégrité des composants en cas de contact aubes/carter [1-2]. Ce matériau hétérogène et sensible à la température [3] a été caractérisé sur un banc balistique spécifique permettant de réaliser des interactions aube/abrasable uniques sur une plage de température comprise entre l'ambiante et 330 °C. Les efforts, la température de surface ainsi que l'usure générée durant le contact sont présentés. Une discussion portant sur l'influence de la température de l'abrasable sur la valeur des efforts et sur l'usure est également menée.

## TECHNIQUE EXPERIMENTALE

Le dispositif expérimental utilisé dans les présents travaux permet de réaliser des essais d'interaction entre un outil rigide fixé sur un support instrumenté avec un capteur d'effort tri-axes et une éprouvette de matériau abrasable fixée sur un projectile [4]. Le contact rapide se produit en maîtrisant la vitesse d'interaction et la profondeur d'incursion (Figures 1a et 1b). L'usure générée par l'outil lors du contact outil-matière a été déterminée par comparaison entre la hauteur du profil de matériau abrasable avant et après essai. A partir de la vitesse du projectile, et de la longueur de l'éprouvette abrasable, un recalage des signaux efforts/usure et température à tout instant a été rendu possible. Afin d'être représentatif des conditions d'évolution dans le CoBP, l'éprouvette a été chauffée avant tir et directement dans le tube de lancement du canon à gaz à des températures allant jusqu'à 330°C.

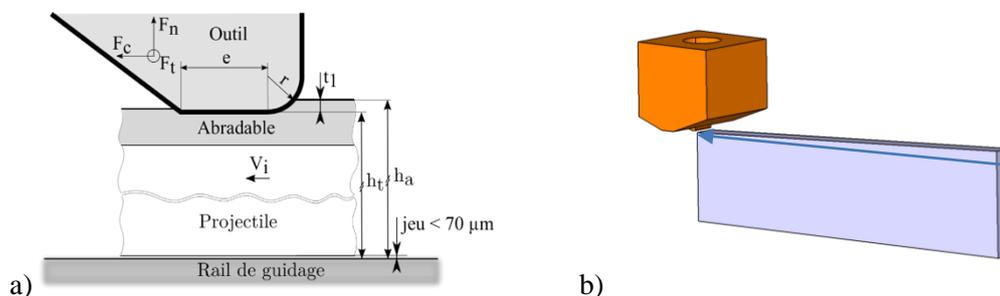


Figure 1 : Principe d'interaction entre l'éprouvette de matériau abrasable et l'outil lors d'un essai sur banc balistique. La géométrie de l'interaction aube/abrasable est présentée dans l'encadré a). La configuration de l'éprouvette avec un profil en rampe croissante est présentée dans l'encadré b).

## RESULTATS & DISCUSSIONS

Des essais d'interaction entre un outil en Ti6Al4V et un abrasable AISi-PE ont été réalisés aux températures de consigne de 21 °C, 200 °C, 250 °C et 330 °C, et à une vitesse moyenne de 120 m/s. La Figure 2 montre une mesure de l'effort de coupe (en noir) et normal (en bleu) pour l'essai à 250 °C et pour un profil d'usure nominal de 100 µm. Les efforts ont évolué peu pendant le premier tiers de l'interaction lorsqu'une incursion réelle de 100 µm a été engagée. Cependant, sur la deuxième partie de la mesure, les efforts ont augmenté légèrement, en même temps que l'incursion, pour atteindre jusqu'à 30% en plus de leurs valeurs initiales en fin d'essais dans le cas de l'effort de coupe. Les essais menés aux autres températures ont montré des évolutions similaires.

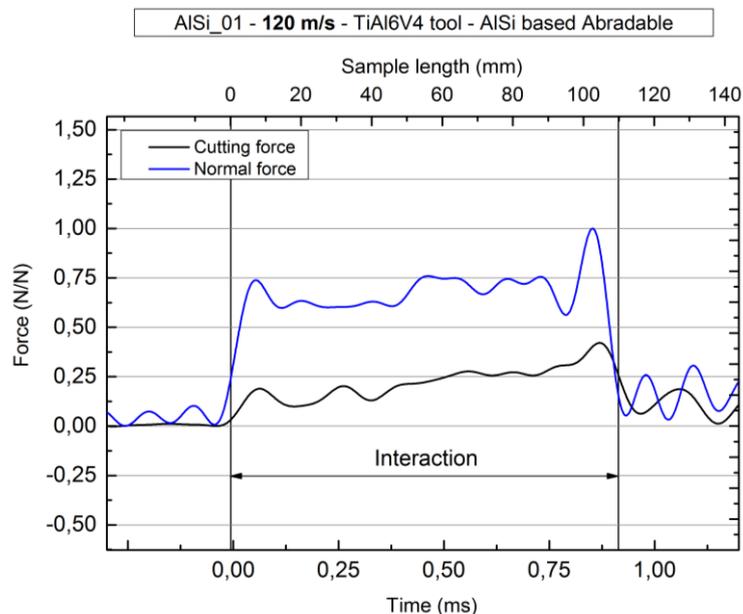


Figure 2 : Signaux d'efforts pour un essai à 120 m/s pour une température de consigne de 250 °C

## CONCLUSION

L'usure de l'abrasable a été corrélée aux efforts et à la température de consigne. L'usure a été plus importante aux hautes températures qu'aux basses températures. De plus, la chaleur générée par la cartouche chauffante se concentrait surtout au milieu d'éprouvette engendrant des incursions non constantes le long de l'interaction avec un maximum au centre de l'éprouvette. La diminution des efforts normaux avec l'augmentation de la température a été observée, ce que pourrait justifier un adoucissement de la matière engendré par la température. A l'inverse, les efforts de coupe croient en même temps que la température, ce qui pourrait engendrer une augmentation de la viscosité de l'abrasable, causée par l'effet de la température sur la phase polyester.

## Références

- [1] M. Dorfman, U. Erning, J. Mallon, Gas turbines use 'abrasable' coatings for clearance-control seals, *Seal. Technol.* 2002 (2002) 7–8.
- [2] Z. Mutasim, L. Hsu, E. Wong, Evaluation of plasma sprayed abrasable coatings, *Surf. Coat. Technol.* 54 (1992) 39–44.
- [3] G. Jacquet-Richardet, M. Torkhani, P. Cartraud, F. Thouverez, T. Nouri Baranger, M. Herran, C. Gibert, S. Baguet, P. Almeida, L. Peletan, Rotor to stator contacts in turbomachines. Review and application, *Mech. Syst. Signal Process.* 40 (2013) 401–420.
- [4] J. Vincent, S. Philippon, A. Cappella, J. Meriaux, S. Selezneff, Enhancement of an experimental method to measure accurately the evolution of forces during short-lived interactions: Application to blade-abrasable material contacts in turbomachines, *Measurement.* 98 (2017) 167–178.

## MODIFICATIONS EN PROCHE SURFACE DE DEPOTS OBTENUS PAR FABRICATION ADDITIVE

C. Courbon<sup>1</sup>, A. Sova<sup>1</sup>, F. Valiorgue<sup>1</sup>, G. Kermouche<sup>2</sup>, Ph. Bertrand<sup>1</sup> et J. Rech<sup>1</sup>

1. Univ Lyon, ENISE, ECL, ENTPE, CNRS, LTDS UMR 5513, Saint-Etienne, France

2. Univ Lyon, EMSE, CNRS, LGF UMR5307, Saint-Etienne, France

### MOTS CLES

Cold spray, rechargement, microstructure, contraintes résiduelles

### INTRODUCTION

Le cold spray et le rechargement laser sont deux procédés extrêmement performants pour réaliser des dépôts fonctionnels sur divers substrats [1-2]. Pour le premier, le matériau sous forme de poudre est accéléré au travers d'une buse supersonique qui propulse les particules avec une grande énergie cinétique sur le substrat. Selon la vitesse d'impact, l'encrage s'effectue par une combinaison de déformation plastique et interaction chimique [1]. En rechargement laser, le dépôt ne s'effectue pas par voie sèche mais les particules sont fondues par injection au centre du faisceau [2]. L'adhérence du dépôt s'effectue alors plutôt par une action métallurgique avec des phénomènes très spécifiques à l'interface dépôt-substrat.

La principale limite de ces technologies est leur capacité très réduite à générer directement une surface fonctionnelle. Dans la majorité des cas, ces dépôts se voient appliquer un procédé de finition ou de super finition afin de définir la géométrie finale de la pièce et les propriétés de surface du dépôt [3]. L'usinage par outil coupant et le galetage sont deux exemples. Ces procédés sont connus pour grandement modifier les propriétés de surface et proche surface comme la topographie, la microstructure et le niveau de contraintes résiduelles [4]

Si la maîtrise des microstructures et des contraintes résiduelles après dépôt est un sujet majeur pour la communauté de la projection, très peu d'études se sont penchées sur les propriétés finales de la surface après usinage et super finition. Ce travail propose donc une étude expérimentale visant à mettre en évidence l'influence de ces deux procédés sur les propriétés en proche surface, i.e. microstructure et contraintes résiduelles.

### METHODOLOGIE

Le matériau d'étude est un acier inoxydable martensitique 17-4PH approvisionné sous deux granulométries différentes en adéquation avec le mode de projection : 10 à 45  $\mu\text{m}$  en cold spray – 45 à 90  $\mu\text{m}$  en rechargement laser. Il a été déposé sur des cylindres D50 mm en aluminium 1050 (cold spray) et acier C45 (rechargement) pour former un dépôt d'environ 2,5mm au rayon. La surface avant dépôt était directement issue de tournage, sans préparation supplémentaire.

La projection par cold spray a été effectuée sous azote à 4MPa à une température de 650°C avec une buse type 40 située à 40 mm du substrat. Le rechargement a lui été mis en œuvre sur un laser YAG avec une puissance de 4kW sur un spot de 6 mm et avec une vitesse de balayage de 800mm/min.

Ces dépôts ont ensuite été usinés avec des outils en carbure de tungstène revêtus  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sous émulsion dans les conditions suivantes :  $V_c = 50$  m/min,  $f = 0.15$  mm/tr,  $a_p = 0.3$  mm. Le galetage a ensuite été appliqué par une bille en céramique de 6 mm avec un effort normal de 250 N et les conditions suivantes :  $V_c = 50$  m/min,  $f = 0.05$  mm/tr.

Les dépôts générés ont été analysés par microscopie électronique à balayage et les contraintes résiduelles déterminées par diffraction de rayons X sur un système PROTO avec un collimateur de

2 mm. Un polissage électrochimique est appliqué sur un spot de 5 mm pour estimer le gradient sur la profondeur des échantillons.

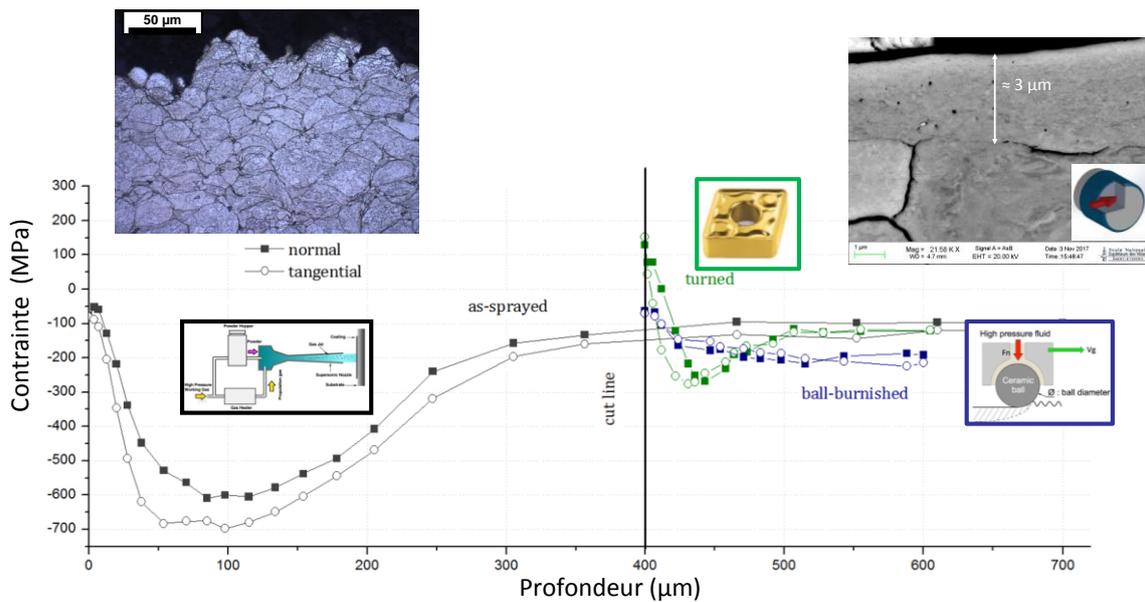


Figure 1: Comparaison entre la microstructure en proche surface sur le dépôt brut obtenu par cold Spray puis après tournage et tournage-galetage.

## RESULTATS

Les deux dépôts ont pu être usinés avec une configuration très proche de celle communément utilisée sur ce même matériau à l'état laminé. Si la rugosité peut être réduite à des Ra de 0.3-0.5  $\mu\text{m}$  par galetage, l'usinage seul induit des contraintes résiduelles de traction dans le dépôt cold spray, malgré l'état initial fortement en compression après dépôt (Fig. 1). Des contraintes de traction ont aussi été observées dans le dépôt issu du rechargement laser avant et après tournage. En revanche, appliquer une opération de galetage sur ces surfaces permet de modifier l'état de contrainte en compression, en surface mais également en profondeur. Une influence plus soutenue a été notamment mise en évidence sur le dépôt issu de rechargement contrairement au cold spray.

En termes de microstructure, cette étude a montré que l'usinage et le galetage étaient capables de modifier l'extrême surface en générant une fine couche dans laquelle la microstructure est difficilement identifiable (Fig. 1) et se doit d'être plus finement étudiée afin de comprendre les mécanismes sous-jacents.

## Références

- [1] S. Grigoriev, A. Okunkova, A. Sova, P. Bertrand, I. Smurov (2015) « *Cold spraying: From process fundamentals towards advanced applications* », Surface and Coatings Technology, **268**, pp 77-84
- [2] L. Thivillon, Ph. Bertrand, B. Laget, I. Smurov (2009) « Potential of direct metal deposition technology for manufacturing thick functionally graded coatings and parts for reactors components », Journal of Nuclear Materials, **385** (2), pp 236-241
- [3] V.K. Champagne (2007) « *The Cold Spray Materials Deposition Process: fundamentals and applications* », Woodhead Publishing
- [4] V. Chomienne, F. Valiorgue, J. Rech, C. Verdu (2016) « *Influence of ball burnishing on residual stress profile of a 15-5PH stainless steel* », CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, **13**, Pages 90-96

## RÉDUCTION ANISOTROPE DES CONTACTS SOUS CISAILLEMENT DANS LES INTERFACES RUGUEUSES EN MATIÈRE MOLLE

**R. Sahli<sup>1</sup>, G. Pallares<sup>1</sup>, C. Ducottet<sup>2</sup>, I. E. Ben Ali<sup>3</sup>, S. Al Akhrass<sup>3</sup>, J. Scheibert<sup>1</sup>**

1. Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes, UMR5513, CNRS / École Centrale de Lyon / ENISE / ENTPE / Univ Lyon, 36 avenue Guy de Collongue, 69134 Ecully Cedex, France

2. Laboratoire Hubert Curien, UMR5516, CNRS / Université Jean Monnet, Saint-Etienne, 18 Rue Professeur Benoît Lauras, 42000 Saint-Étienne, France

3. Ingénierie des Matériaux Polymères, UMR5223, CNRS / INSA Lyon / Université Claude Bernard Lyon1 / Université Jean Monnet, Saint-Etienne / Univ Lyon, 15 Boulevard Latarjet, 69622 Villeurbanne, France

### MOTS CLÉS

Aire de contact réelle ; imagerie de contact ; contact rugueux ; élastomère ; force de frottement statique ; anisotropie

### INTRODUCTION

Les propriétés de frottement des interfaces de contact rugueuses sont contrôlées par leur aire de contact réelle. L'aire de contact réelle entre les solides aléatoires rugueux se compose d'une myriade de micro-jonctions individuelles. Alors que leur surface totale contrôle la force de frottement de l'interface, d'autres caractéristiques macroscopiques, y compris le frottement viscoélastique, l'usure, la rigidité et la résistance électrique, dépendent fortement de la taille et de la forme des micro-jonctions individuelles. Nous montrons ici que, dans les contacts rugueux en élastomère, la forme des micro-jonctions varie sensiblement en fonction de la force de cisaillement appliquée à l'interface.

### PRINCIPE DE L'EXPÉRIENCE

Nous utilisons un dispositif opto-mécanique décrit dans [1] pour effectuer des mesures directes de la zone de contact réel sur diverses interfaces de contact rugueuses élastomères. L'étude des mécanismes de rupture par cisaillement des interfaces de contact est difficile car ces interfaces confinées ne sont généralement pas directement accessibles à la mesure. Pour surmonter cette difficulté, nous avons développé une méthode optique non-invasive pour observer l'interface de contact transparente entre une surface en élastomère et une surface de verre. Nous appliquons cette méthode d'imagerie à un système d'intérêt en tribologie, le contact entre un élastomère transparent, le polydiméthylsiloxane (PDMS), et un plan de verre lisse.

### RÉSULTATS

Nous montrons que l'aire de contact réelle est une fonction décroissante de la force tangentielle, avec des réductions pouvant atteindre 30% [1]. Cette réduction de l'aire de contact est trouvée fortement anisotrope. Pour comprendre ces résultats, nous avons également effectué des expériences sur des contacts sphère/plan. La forme circulaire du contact est modifiée en une forme pseudo-elliptique à mesure que la surface diminue (Fig. 1a). Nous notons que les micro-contacts individuels dans les interfaces rugueuses ont un comportement qualitatif similaire (Fig. 1b).

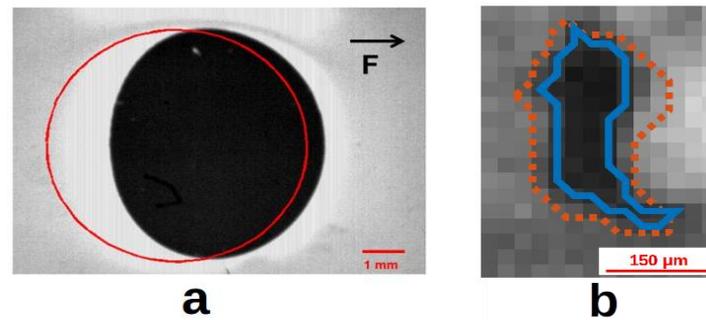


Figure 1: (a) Image de l'interface entre une sphère lisse de PDMS et une plaque de verre lisse sous la force de cisaillement  $F$ . Le cercle rouge est le contour du contact non cisailé. (b) Pour le même matériau, image d'un micro-contact pendant le cisaillement. La ligne en pointillé rouge représente le contour du contact non cisailé; la ligne bleue représente le contour du contact cisailé.

## CONCLUSION

Dans les deux types de contacts lisses et rugueux, nous avons observé une réduction anisotrope de l'aire de contact réelle. Nous avons comparé nos mesures sphère/plan avec des modèles analytiques existants de la littérature [2, 3]. S'ils capturent une partie des tendances observées concernant la réduction d'aire de contact, ils font tous l'hypothèse simplificatrice d'un contact restant à tout instant axisymétrique. La reproduction de la croissance d'anisotropie nécessite en effet un traitement pleinement 3D, tel que décrit dans [4]. En ce qui concerne les contacts rugueux il n'y a actuellement, à notre connaissance, aucun modèle disponible.

## Références

- [1] Sahli, R., Pallares, G., Ducottet, C., Ali, I. B., Al Akhrass, S., Guibert, M., & Scheibert, J. (2018). « Evolution of real contact area under shear and the value of static friction of soft materials », *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, **115**(3), 471-476.
- [2] Savkoor, A. R., & Briggs, G. A. D. (1977). « The effect of tangential force on the contact of elastic solids in adhesion », *In Proc. R. Soc. Lond. A*, Vol. **356**, No. 1684, pp. 103-114.
- [3] Waters, J. F., & Guduru, P. R. (2010.). « Mode-mixity-dependent adhesive contact of a sphere on a plane surface », *In Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Vol. **466**, No. 2117, pp. 1303-1325.
- [4] Mergel, J.C., Sahli, R., Scheibert, J., & Sauer, R.A. (2018). « Continuum contact models for coupled adhesion and friction », arXiv:1803.00046.

# APPROCHE DE LA SURFACE SOMME EQUIVALENTE TRIDIMENSIONNELLE ENTRE DEUX SURFACES RUGUEUSES CYLINDRIQUES EN CONTACT EXTERIEUR

M. BEN ATTIA AIDOUÏ<sup>1</sup>, J. BESSROUR<sup>1</sup>

1. Université de Tunis El Manar, Ecole Nationale d'Ingénieur de Tunis, Laboratoire de Mécanique Appliquée et Ingénierie

## MOTS CLES

Contact, traçage industriel, surface somme, cylindre, tridimensionnel

## INTRODUCTION

De nos jours, les industries attachent une très grande importance à la qualité des surfaces des pièces mécaniques et à leurs modélisations en adoptant de plus en plus la modélisation par éléments finis. L'industrie est l'un des secteurs où la caractérisation des états de surface fait appel aux simulations numériques telles que les simulations liées aux problèmes de contact.

Lorsque le phénomène de contact entre deux corps est considéré, des conditions doivent être imposées aux interfaces. Ces conditions complexes peuvent entraîner des problèmes d'existence de la solution la plus proche de la réalité. Cette complexité vient du fait que les surfaces en contact sont toujours rugueuses. La prise en compte de ce paramètre, la rugosité de l'interface, peut avoir de fortes conséquences dans les applications industrielles comme le transfert thermique entre un tube traçeur et une conduite et conduit souvent à des difficultés lors de la modélisation qui peut rendre l'utilisation de la méthode des EF afin d'avoir des solutions réalistes, précises et plus difficile.

Depuis plusieurs décennies, l'étude numérique des problèmes de contact est utilisée afin de développer des techniques de résolution avec une volonté de modéliser les surfaces réelles visant à déterminer le transfert thermique entre deux corps rugueux. Le transfert thermique inter-facial entre un tube traçeur chaud et une canalisation froide dans une application industrielle de réchauffage par traçage et l'une des applications dans ce contexte.

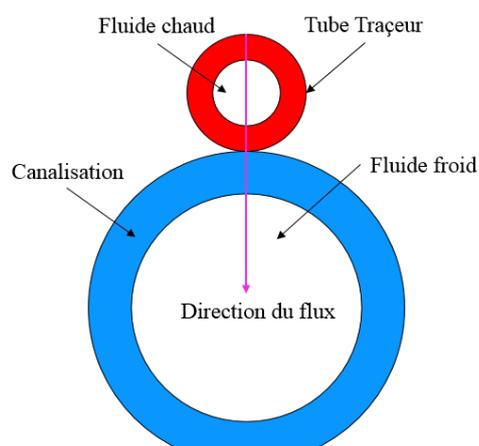


Figure 1 : Le principe de réchauffage par traçage

Cette solution industrielle assure le maintien en température des surfaces où le transfert de chaleur se fait à travers une paroi matérielle. Elle consiste à réchauffer la canalisation en plaçant un

tube où circule le fluide chaud sur la génératrice de la canalisation. Par conduction, le réchauffage se fait à travers la transmission de chaleur par l'intermédiaire de la surface de contact comme montré sur la figure 1. Le transfert thermique est conditionné par l'état de surface des cylindres en contact. Le flux est réparti sur la surface d'échange. Il dépend de l'aire réelle de contact des deux cylindres maintenus par un chargement mécanique. L'étude du réchauffage par traçage aborde donc le problème complexe de la rugosité en faisant intervenir la mécanique, la thermique, la tribologie dans des conditions extrêmes industrielles.

Dans cette étude, on se limite à la modélisation mécanique entre deux cylindres tridimensionnels rugueux. Le problème mécanique posé par la modélisation du contact entre deux tubes cylindriques ne peut être résolu que par une méthode numérique. La méthode retenue pour cela et la plus répandue est la technique des Éléments Finis basée sur des descriptions statistiques. Or, ce type de problème est très délicat à modéliser et la particularité même de ce problème mécanique implique un nombre important d'éléments, ce qui engendre des temps de calculs considérables. Par souci de simplicité, il paraît intéressant de réduire la taille du problème de façon à alléger le problème mécanique numérique et faciliter son utilisation dans le contexte industriel. Pour cela, le contact rugueux-rugueux tridimensionnel cylindrique entre deux surfaces isotropes et aléatoires est ramené au cas d'un contact entre une surface lisse rigide et une surface rugueuse équivalente (Figure 2).

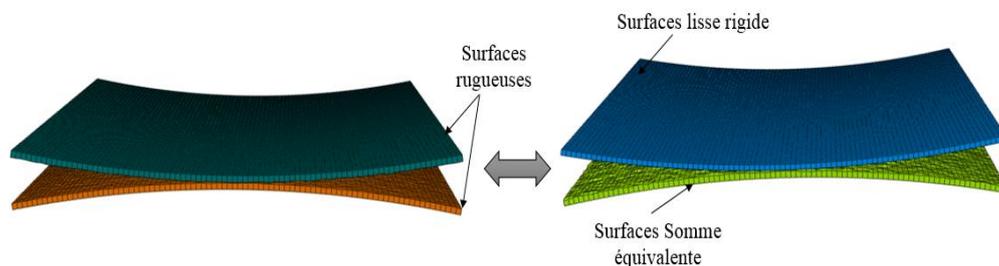


Figure 2 : Construction de la surface somme 3D pour le contact entre deux surfaces cylindriques

La modélisation tridimensionnelle statistique de la surface somme équivalente fait intervenir le concept de surface somme intégrant, entre autres, les rugosités présentes sur chacune des deux cylindres en contact linéique. La détermination de la surface somme, définie par une succession des profils sommes cylindriques, utilise les relations développées à partir des paramètres motifs de la norme ISO 12085 [1].

L'objectif de ce travail est de proposer une nouvelle modélisation en trois dimensions de la surface somme qui assure une parfaite équivalence avec le contact statique tridimensionnel rugueux sur rugueux. Afin d'accéder à ceci, cette étude vise à identifier aussi la loi de distribution d'une surface somme 3D, construite à partir de deux surfaces cylindriques rugueuses suivant la loi normale de rugosité classiquement utilisée.

La validation de l'identification de la surface somme bidimensionnelle cylindrique a été justifiée en comparant l'évolution de l'aire réelle de contact du modèle rugueux-rugueux et somme-lisse pour différentes classes de rugosité et différents déplacements [2]. Sa validité dans le cas tridimensionnel sera présentée dans cet article.

## Références

- [1] F. Robbe-Valloire (2001) «Statistical analysis of asperities on a rough surface», *Wear*, pp. 401–408.
- [2] M.B.A Aidoudi, J.Bessrou (2017) «Numerical Modeling of Rough Contact between Two Cylinders with Axes Parallel», *Tribology in Industry* 39 (4): 415-430.

## ETUDE DE DEGRADATION EN SURFACE DE CHAUSSEE PAR APPROCHE TRIBOLOGIQUE

E. Manyo<sup>1</sup>, P. Reynaud<sup>1</sup>, D. Nelias<sup>2</sup>, C. Petit<sup>1</sup>, F. Allou<sup>1</sup>, T. Chaise<sup>2</sup>, B. Picoux<sup>1</sup>

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

2. Univ. Lyon, INSA-Lyon, CNRS UMR5259, LaMCoS, F-69621, France

### MOTS CLES

Contact Pneu-Chaussée, Contact roulant, Frottement, Méthode Semi Analytique, Top-down crack.

### INTRODUCTION

Avec l'apparition fréquente de nouvelles pathologies de dégradations des surfaces de chaussée telles que les fissures descendantes (top-down crack) et le délaminage suite au passage répété des poids lourds et à des nouvelles technologies de dimensionnement, il est nécessaire de faire une modélisation du contact Pneu-Chaussée montrant bien l'impact des stries du pneu ou l'agressivité de ce dernier sur la chaussée. Cette modélisation doit être plus précise et nécessite une étude tribologique. Le dimensionnement futur pour une longue durée de vie de la chaussée nécessite alors une connaissance de l'effet des paramètres du contact sur l'état de contrainte et de déformation dans la chaussée. Dans cette étude, nous proposons une approche Semi-Analytique du contact roulant Pneu-Chaussée en régime stationnaire avec une prise en compte du frottement. Ce contact roulant sous l'effet du frottement est modélisé par la théorie de Kalker [1] en élasticité linéaire. Il est défini par le roulement entre deux corps transmettant des forces tangentielles en présence du frottement. Le phénomène de glissement partiel est alors étudié en roulement stationnaire. Ainsi, sur la surface de contact, on distingue une zone d'adhérence qui se traduit par une même vitesse entre les points en contact et une zone de glissement qui se traduit par une différence de vitesse entre les points en contact. Une analyse de l'état des contraintes en surface et en sous couche est faite en fonction du coefficient de frottement en prenant en compte l'influence de la zone de glissement et de la zone d'adhérence. L'effet du roulement sur les déformations principales de traction en surface est ensuite mis en évidence afin d'étudier par la suite les fissurations par le haut en tenant compte de la loi de fatigue des enrobés bitumineux. Le pneumatique est supposé élastique homogène et modélisé par un module de Young équivalent [2]. Son profil est réalisé grâce à une numérisation par la technique des franges ou par la photogrammétrie. Une étude sur la pression de contact par approche tribologique a été effectuée par Reynaud et al [3] en utilisant un profil de pneu lisse et comparée à des mesures de la littérature.

### DESCRIPTION

Pour un problème de contact roulant, nous pouvons distinguer deux étapes : premièrement, la formation du contact décrit par le problème normal et ensuite l'aspect roulement décrit par un problème tangentiel qui prend en compte un effort tangentiel appliqué et une loi de frottement qui est en général la loi de Coulomb. Comme décrit dans l'introduction, le problème tangentiel est modélisé par la théorie de Kalker, ce qui nous permet de déterminer le champ de cisaillement surfacique et de distinguer une zone d'adhérence et une zone de glissement (Figure 1). Le champ de pression de contact Pneu-Chaussée est modélisé par le problème normal et a été déterminé et validé par des mesures expérimentales. La chaussée est considérée ici comme une couche d'enrobé bitumineux (BBSG) semi infinie lisse de caractéristiques élastiques telles que le module de Young  $E = 5400$  MPa, et le coefficient de Poisson  $\nu = 0,35$ . Le module de Young du pneu est estimé à  $E = 3$  MPa et il est supposé incompressible ( $\nu = 0,5$ ). La charge normale est fixée à 32.5 kN avec un effort tangentiel longitudinal de 10 kN et un coefficient de frottement de 0.7 pour le cas du roulement en présence de frottement.

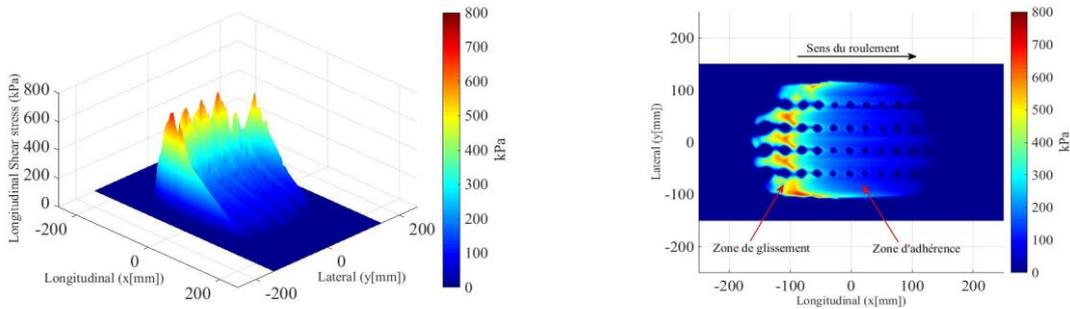


Figure 1: Répartition du champ de cisaillement surfacique. Profil 3D (à gauche) ; vue projetée avec mise en évidence de la zone de glissement/adhérence (à droite)

## EFFET DU FROTTEMENT

L'objectif de cette étude étant d'évaluer l'effet du pneumatique sur la surface de la chaussée et en sous couche en présence du frottement, en particulier dans le cas des fissures descendante. Le champ de déformation principale maximale (en traction) en surface est présenté sur la figure 2. Ces figures mettent en évidence l'effet du frottement,  $\mu$  étant le coefficient de frottement. Une analyse est ensuite réalisée sur la contrainte équivalente en sous couche pour évaluer l'effet de la présence de frottement sur le comportement mécanique des chaussées en sous couche.

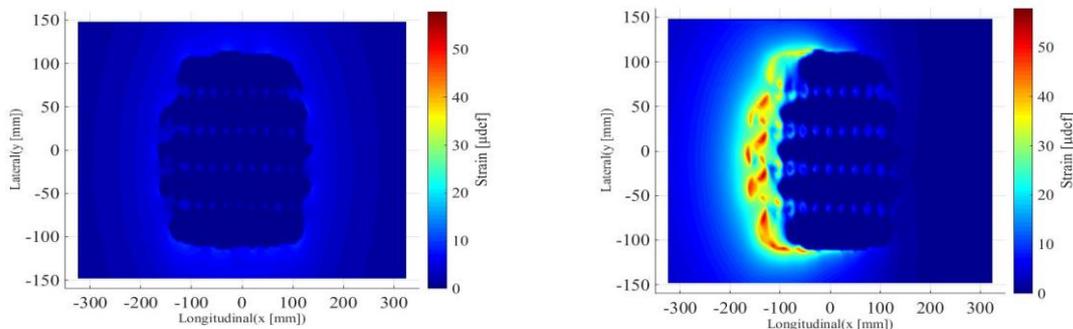


Figure 2 : Champ de déformation principale de traction en surface ( $z=0$ ) pour un contact roulant : roulement libre sans frottement (à gauche) et roulement avec frottement pour  $\mu=0.7$  (à droite)

## CONCLUSION

Cette étude nous a permis de valider le code Semi-Analytique pour l'analyse du contact roulant Pneu-Chaussée plus réaliste, plus précis et surtout plus rapide que ceux utilisés à l'heure actuelle notamment la Méthode des Eléments Finis (FEM). Le champ de cisaillement en surface en présence du frottement, nécessaire lors des calculs de dimensionnement et d'endommagement des chaussées a été obtenu. Le modèle permet aussi d'avoir une connaissance plus rapide des déformations de traction à l'origine des fissures descendantes et des valeurs des contraintes équivalentes maximales en sous couche avec prise en compte du frottement, afin de mieux appréhender les problèmes de décohésion entre couche de roulement et couche de liaison. Par la suite, il est prévu d'intégrer également les efforts transversaux afin d'étudier les arrachements dans les points singuliers.

## References

- [1] J. J. Kalker, « *Three-Dimensional Elastic Bodies in Rolling Contact* », Springer's Edition. Kluwer Academic Publishers, Netherland, 1990.
- [2] E. Y. Manyo, I. Leandry, B. Picoux, P. Reynaud, F. Allou, C. Petit, « *3D modeling and measuring of tire-pavement contact pressure* » The 10th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields BCRRA, Athens, 28-30 June 2017, CRC Press.
- [3] P. Reynaud, S. B. Nasr, T. Chaise, D. Nélias, C. Petit, F. Allou, « *3d modelling of tire-pavement contact pressure* », European Journal of Environmental and Civil Engineering. Vol. 21, n° 6, 2016, p. 112-127.

## Détermination d'un critère d'amorçage de fissures de fretting utilisant une description asymptotique du contact

P. Panico<sup>1,2</sup>, M.C. Baietto<sup>1</sup>, T. Chaise<sup>1</sup> et N. Guillemot<sup>2</sup>

1. Univ Lyon, INSA Lyon, CNRS, LaMCoS UMR 5259, F69621

2. Airbus Helicopters, Aéroport Marseille/Provence, 13725 Marignane Cedex, France

### MOTS CLES

Amorçage ; Fissure de Fretting ; Alliage de Titane

### INTRODUCTION

En quête de performances et de durée de vie allongée, les interfaces d'assemblages industriels fortement chargés sont au centre des préoccupations. En présence de petites amplitudes de débattement et de gradients de contraintes multiaxiaux, elles sont le siège d'amorçage de fissures de fatigue. Celles-ci se forment en limite du contact [1] et se propagent vers l'intérieur de celui-ci. Comme les conditions et vitesses de propagations dans ce type d'ensemble sont documentés [2], nous allons ici explorer l'amorçage de fissures de fatigue dans les interfaces, dites fissures de fretting.

L'originalité de la méthode utilisée réside dans le fait que seulement trois grandeurs seront utilisées pour décrire la sévérité du contact. Ces grandeurs sont trois coefficients d'intensités de contrainte au sens de Williams [3], décrivant une partie des distributions de contraintes en bordure de contact. Cette méthode initialement proposé par Hills et al [4] sera appliquée à des résultats antérieurs d'essais de Fretting Simple et Fretting Fatigue [5]. Le choix de cette méthode repose sur sa rapidité d'exécution ainsi que sur l'absence de calibration, nécessaire à la bonne application des critères multiaxiaux usuels.

Un critère empirique d'amorçage de fissures sera proposé ainsi qu'une carte de fretting présentant trois zones, en fonction des conditions de contact et du risque d'amorçage de fissure.

### DESCRIPTION ASYMPTOTIQUE DU CONTACT

Dans les conditions et hypothèses relatives à un contact cylindre/plan entre deux matériaux de mêmes propriétés élastiques, la résolution du contact et le calcul des distributions de contraintes sont connues et éprouvés [6]. En considérant que l'effort tangentiel est tel que les conditions de glissement partiel sont remplies, l'hypothèse est faite qu'un bord de contact se comporte comme l'extrémité d'une fissure. Cette singularité est représentée à l'aide de deux coefficients d'intensité de contraintes suivant l'approche proposée par Hills [4]  $K_N$  et  $K_T$  représentant respectivement le gradient de l'effort normal et l'intensité du cisaillement, en bordure du contact.

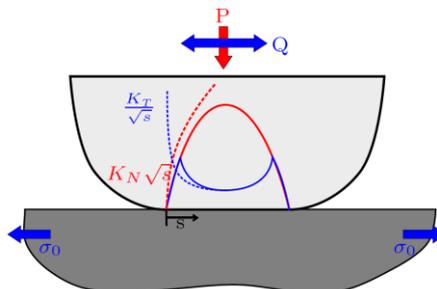


Figure 1 : Description asymptotique en bordure de contact Hertzien

Ces deux coefficients, sont suffisants pour décrire la sévérité du chargement vis-à-vis de l'amorçage de fissure en fretting simple.

## ANALYSE D'ESSAIS DE FRETTING SIMPLE ET DE FRETTING FATIGUE [5]

S.Hérédia a réalisé des essais de fretting simple et de fretting fatigue avec des éprouvettes en alliage de titane Ti-10V-2Fe-3Al en configuration cylindre/plan. Ces essais, réalisés largement en dessous du seuil de plasticité, lui ont permis de définir des seuils d'amorçage de fissures pour différents chargements normaux et efforts de fatigue.

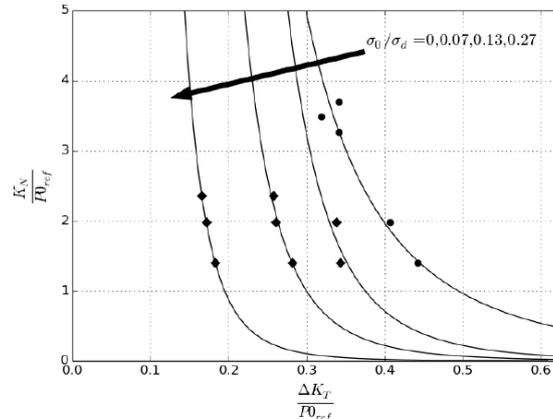


Figure 2 : Seuils d'amorçages de fissures

Bien que la perturbation du cisaillement à l'interface dû à l'effort de fatigue soit prise en compte dans le coefficient d'intensité de contrainte  $K_T$ , il sera montré qu'une grandeur supplémentaire est nécessaire pour une description plus globale de l'amorçage de fissure.

## CONCLUSION

Cette méthode asymptotique aboutit à la formulation d'un critère unifié d'amorçage de fissure pour des conditions de chargement de fretting simple et de fretting fatigue, indépendamment du rayon du cylindre, à travers l'utilisation de quatre constantes. Ces constantes, déterminés empiriquement, permettent d'identifier une frontière entre zone saine et zone de risque d'amorçage de fissure dans un espace à trois dimensions  $K_N, \Delta K_T, \Delta \sigma_0$ . Le critère de glissement total est également formulé dans cette espace, permettant la construction d'une carte de fretting synthétique et précise.

## Références

- [1] V. Lamacq, M.C. Dubourg, L.Vincent (1997) « *A theoretical model for the prediction of initial growth angles and sites of fretting fatigue cracks* », Tribology International, **30**, pp. 391-400.
- [2] M.C. Baietto, E. Pierres, A. Gravouil, B. Berthel, S. Fouvry, B. Trolle (2013) « *Fretting fatigue crack growth simulation based on a combined experimental and XFEM strategy* », International Journal of Fatigue, **47**, pp. 31-43.
- [3] M.L. Williams (1956) « *On the Stress Distribution at the Base of a Stationary Crack* », Journal of Applied Mechanics, **24**, pp. 109-114.
- [4] D.A. Hills, R.M.N Fleury, D. Dini (2016) « *Partial slip incomplete contacts under constant normal load and subject to periodic loading* », International Journal of Mechanical Science, **108**, pp. 115-121.
- [5] S. Heredia, S. Fouvry, B. Berthel, E. Greco (2014) « *Introduction of "principal stress weight function" approach to predict the crack nucleation risk under fretting fatigue using FEM modelling* », International Journal of Fatigue, **61**, pp. 191-201.
- [6] D.A. Hills, D. Nowell, A. Sackfield (1993) « *Mechanics of Elastic Contact* », Butterworth-Heinemann, Oxford.

# Modélisation de l'endommagement en glissement partiel et total par méthode semi-analytique

T. Beyer<sup>1,2</sup>, T. Chaise<sup>1</sup>, J. Leroux<sup>2</sup> et D. Nélias<sup>1</sup>

1. Univ Lyon, INSA Lyon, CNRS, LaMCoS UMR5259, F69621

2. Safran Aircraft Engines, Moissy Cramayel, France

## MOTS CLES

Méthode semi analytique, endommagement, glissement partiel

## INTRODUCTION

Les contacts réalisant l'interface entre les aubes et les disques des turbines de turboréacteurs sont soumises à des sollicitations de type fretting. L'amplitude et la fréquence de ces sollicitations sont variables selon les phases de vol et conduisent, sur de grands nombres de cycles à l'endommagement des éléments en contact. Du fait de la complexité des phénomènes mis en jeu, du grand nombre de cycles rencontrés et de conditions de contact complexes, la modélisation de cet endommagement est un défi crucial pour prédire la durée de vie de ces éléments mécaniques. L'introduction de matériaux revêtus ou composites rend d'autant plus complexe la modélisation de ces problématiques.

L'objectif de cette contribution est de présenter l'introduction d'un modèle d'endommagement simple dans une méthodologie de calcul des contacts par méthode semi-analytique. Ce type de méthode a montré ses capacités à modéliser rapidement des contacts de géométries diverses, entre matériaux pouvant contenir des hétérogénéités [1] ou des revêtements. Des applications sur des géométries de contacts modèles et pour des conditions de contact en glissement partiel et total seront présentées, permettant d'explorer les capacités de la méthode et l'influence des principaux paramètres du modèle.

## MODELE

La modélisation de l'endommagement repose sur deux étapes, la première consiste en l'utilisation d'un critère, similaire à celui de Mazars [2], pilotant la loi d'évolution de la variable scalaire d'endommagement  $D$  en tout point du matériau sur la base de la déformation équivalente vue par le matériau. La deuxième étape consiste à considérer un élément de matériau endommagé comme une inclusion dont les propriétés élastiques sont abaissées par rapport à celles de la matrice d'un facteur  $D$ . La méthode de l'inclusion équivalente, proposée par Eshelby et aujourd'hui intégrée aux méthodes semi-analytiques [1], permet de prendre en compte l'interaction du matériau endommagé avec le contact.

## RESULTATS

Le modèle est appliqué à la simulation de contacts sphère-plan avec différentes conditions de contacts : glissement partiel, ou total. L'influence de différents paramètres est étudiée : coefficient de frottement, propriétés du revêtement. La figure 1 présente la valeur de l'endommagement en surface pour un contact sphère plan chargé avec un effort normal constant et avec une faible amplitude de débattement latéral sur matériau élastique non revêtu ainsi que l'évolution de la distribution de pression en surface au cours des différents cycles de fretting.

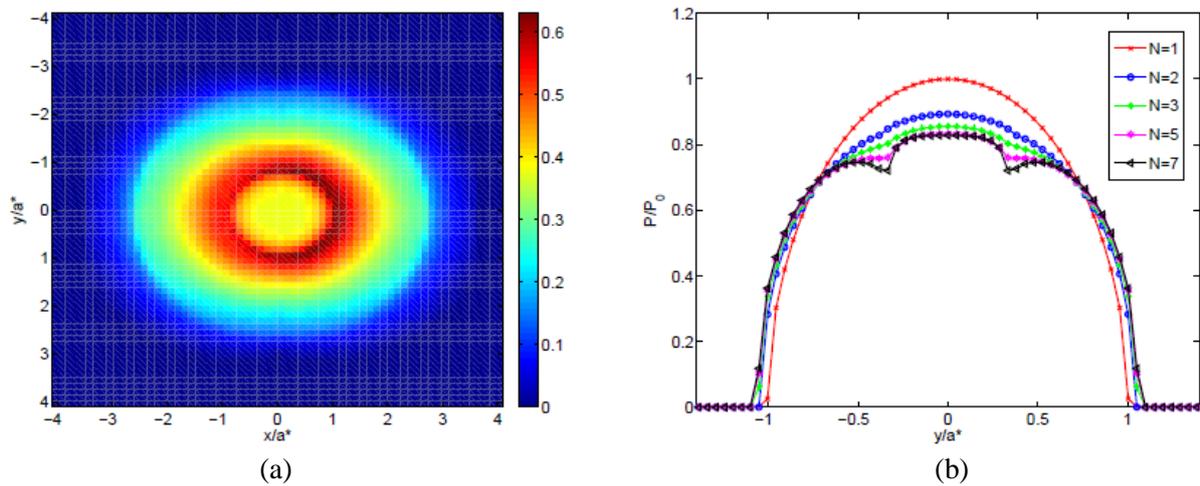


Figure 1: Endommagement en surface pour un contact sphère plan sur matériau élastique après 7 cycles (a) ; évolution de la distribution de pression pour plusieurs cycles successifs (b)

## CONCLUSION

La méthode proposée permet de coupler la résolution d'un problème de contact, d'hétérogénéités et d'endommagement pour suivre l'évolution de l'usure dans des matériaux revêtus ou comportant des inclusions. Le modèle d'endommagement proposé, simple et comportant un nombre réduit de paramètres permet une reproduction des phénomènes d'usure couramment observés dans les contacts.

## Références

- [1] J. Leroux, B. Fulleringer, D. Nélias (2010) « *Contact analysis in the presence of spherical inhomogeneities within a half space* », International Journal of Solids and Structures, **47**, pp. 3034-3049.
- [2] J. Mazars, G. Pijaudier-Cabot (1989) « *Continuum damage theory – application to concrete* », Journal of Engineering Mechanics, **115** (2), pp. 345-365.

# Liste des auteurs

- Al Akhrass Samer, 88, 89  
Allou Fatima, 92, 93  
Assoul Mohamed, 27, 28
- Baietto Marie-Christine, 94, 95  
Belin Michel, 64, 65  
Ben Ali Imed, 88, 89  
Ben Attia Malak, 90, 91  
Benayoun Stephane, 56, 57  
Berthet Florentin, 35, 36  
Berthier Yves, 20, 21  
Bertrand Philippe, 86, 87  
Bessrour Jamel, 90, 91  
Beyer Thibault, 96, 97  
Bonaventure Julien, 12, 13  
Bouchoucha Ali, 31  
Bouhabila Hamoudi, 49, 50  
Bouvard Gaëtan, 37, 38, 72, 73  
Bouvier Salima, 8, 9  
Breumier Simon, 29, 30  
Brunet Antoine, 80, 81  
Bueno Marie-Ange, 62, 63, 74, 75
- Cabrero Julien, 39  
Cananau Sorin, 22, 23  
Cao Shoufan, 47, 48  
Cappella Andrea, 18, 19, 32–34, 84, 85  
Carpentier Luc, 25, 26, 53, 54, 76, 77  
Cayer-Barrioz Juliette, 12, 13, 16, 17, 78, 79  
Chabert France, 35, 36  
Chaise Thibaut, 92–97  
Chantrait Teddy, 80, 81  
Chen Yan-Ming, 14, 15  
Chobaut Nicolas, 4, 5  
Coddet Christian, 55  
Colas Guillaume, 20, 21  
Coniglio Nicolas, 55  
Cornuault Pierre-Henri, 53, 54, 76, 77  
Cote Jean-Marc, 25, 26  
Coulibaly Mamadou, 18, 19  
Courbon Cédric, 86, 87  
Crespo Alexia, 78, 79  
Czerwicz Thierry, 18, 19
- De Marco Bastien, 4, 5
- De Souza Mariana, 45, 46  
Delbé Karl, 35, 36  
Deletombe Eric, 24  
Denape Jean, 35, 36, 80, 81  
Deneuille Patrick, 2, 3  
Desplanques Yannick, 24  
Dessein Gilles, 80, 81  
Devo Tovignon, 24  
Ding Haohao, 72, 73  
Djelal Chafika, 60, 61  
Dobler Stéphane, 4, 5  
Donnet Christophe, 56, 57  
Doumeng Marie, 35, 36  
Drezet Jean-Marie, 4, 5  
Du Junxiao, 47, 48  
Ducottet Christophe, 88, 89  
Dufils Johnny, 56, 57  
Dureau Clément, 44
- El Mansori Mohamed, 39, 55
- Fajfrowski Michel, 60, 61  
Fassi Geoffroy, 62, 63  
Faure Laurent, 32–34, 44, 82, 83  
Faverjon Frédéric, 56, 57  
Ferry Fabrice, 35, 36  
Fontaine Julien, 72, 73  
Fontaine Michaël, 27, 28  
Fridrici Vincent, 37, 38, 72, 73
- Gachon Yves, 58, 59  
Gauthier Christian, 67, 68  
Gavrus Adinel, 22, 23  
Geringer Jean, 72, 73  
Guillaume Schuhler, 8, 9  
Guillemot Nicolas, 94, 95
- Héau Christophe, 56, 57
- Isard Manon, 10, 11
- Jourani Abdeljalil, 8, 9
- Kang Nan, 55  
Kapsa Philippe, 37, 38, 72, 73  
Kermouche Guillaume, 29, 30, 66, 86, 87

Léonard Didier, 20, 21  
Lévesque Martin, 29, 30  
Lahouij Imène, 10, 11, 51, 52  
Lallemand Fabrice, 25, 26  
Lanot Jean-Michel, 10, 11  
Laugier Maxime, 6, 7  
Laurent Faure, 18, 19  
Le Gorju Karine, 51, 52  
Leroux Julien, 96, 97  
Levy Benjamin, 39

Mérian Tiphaine, 35, 36  
Malkhasyan Vahan, 27, 28  
Manyo Edem Yawo, 92, 93  
Marcos Gregory, 18, 19  
Marouf Nabil, 42, 43  
Marquer Mathieu, 82, 83  
Marsan Olivier, 35, 36  
Martinet Baptiste, 32–34, 84, 85  
Massion Roxane, 44  
Maurice Claire, 29, 30  
Mazuyer Denis, 12, 13, 16, 17, 78, 79  
Meliani Hasnaa, 27, 28  
Melot Jean-Marie, 25, 26  
Mezghani Sabeur, 39  
Mischler Stefano, 4, 5, 47, 48  
Montalban Laura, 51, 52  
Montebello Claudio, 84, 85  
Monteil Guy, 27, 28  
Montmitonnet Pierre, 10, 11  
Morgado Nazario, 78, 79  
Muramoto Yuta, 37, 38

Nassiet Valérie, 35, 36  
Nelias Daniel, 92, 93, 96, 97  
Nguyen Vance, 4, 5

Ohta Makoto, 37, 38

Pallares Gael, 88, 89  
Panico Pierre, 94, 95  
Papasidero Jessica, 32–34  
Paris Jean-Yves, 80, 81  
Pavlik Anastasiia, 18, 19  
Pepin Julie, 67, 68  
Perderiset Corentin, 40, 41  
Perrochat Jean-Michel, 8, 9  
Petit Christophe, 92, 93  
Peyre Kevin, 74, 75  
Philippon David, 20, 21  
Philippon Sylvain, 18, 19, 32–34, 44, 82–85  
Picoux Benoit, 92, 93  
Pierre Montmitonnet, 51, 52

Pirva Elisabeta, 22, 23

Rech Joel, 86, 87  
Reynaud Philippe, 92, 93  
Roizard Xavier, 25, 26  
Roland Thierry, 67, 68  
Rosset Eric, 4, 5  
Rossi René, 74, 75  
Rubin Anne, 67, 68

Sahli Riad, 88, 89  
Saulot Aurélien, 20, 21  
Scheibert Julien, 88, 89  
Selezneff Serge, 84, 85  
Skiba Stéphane, 32–34, 84, 85  
Smaoui Hassan, 8, 9  
Sova Aleksey, 86, 87  
Spano Fabrizio, 74, 75  
Stoica Nicolae, 22, 23

Tardelli Joffrey, 82, 83  
Thevenot Maël, 80, 81  
Tournalias Michel, 62, 63, 74, 75  
Tricoche Denis, 51, 52  
Tudor Andrei, 22, 23

Valette Stephane, 56, 57  
Valiorgue Frédéric, 86, 87  
Vanhove Yannick, 60, 61  
Villani Aurelien, 29, 30  
Vincent Julien, 18, 19

Wagner Vincent, 80, 81  
Weiland Benjamin, 76, 77  
Wielhorski Yanneck, 62, 63  
Witt Arnaud, 76, 77

Yahiaoui Malik, 16, 17

Zahouani Hassan, 69–71