



HAL
open science

Comparaison des propriétés en frottement d'un revêtement d'anodisation dure avec une oxydation micro-arcs formée sur aluminium.

Louis Rodriguez, Karl Delbé, Jean-yves Paris, Yassin Ezayani, Marion Balsarin, Philippe Combes, Jean Denape

► To cite this version:

Louis Rodriguez, Karl Delbé, Jean-yves Paris, Yassin Ezayani, Marion Balsarin, et al.. Comparaison des propriétés en frottement d'un revêtement d'anodisation dure avec une oxydation micro-arcs formée sur aluminium.. *Traitements et Matériaux*, 2020, 466, pp.19-25. hal-04353964

HAL Id: hal-04353964

<https://hal.science/hal-04353964>

Submitted on 21 Dec 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Open Archive Toulouse Archive Ouverte

OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible

This is an author's version published in: <http://oatao.univ-toulouse.fr/28237>

To cite this version:

Rodriguez, Louis^{ORCID} and Delbé, Karl^{ORCID} and Paris, Jean-Yves^{ORCID} and Ezayani, Yassin^{ORCID} and Balsarin, Marion and Combes, Philippe and Denape, Jean^{ORCID} *Comparaison des propriétés en frottement d'un revêtement d'anodisation dure avec une oxydation micro-arcs formée sur aluminium.* (2020) [Popular scientific article]

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository administrator: tech-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr

Comparaison des propriétés en frottement d'un revêtement d'anodisation dure avec une oxydation micro-arcs formée sur aluminium.

L. Rodriguez^{1,2}, K. Delbé¹, J-Y. Paris¹, Y. Ezayani¹, M. Balsarin², P. Combes², J. Denape¹

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

²Galvanoplastie industrielle toulousaine (GIT), 31270 Cugnaux, France

Une étude menée dans le cadre du projet ROMA (Reprise mécanique de l'oxydation micro-arcs) pour lequel collabore la société Galvanoplastie Industrielle Toulousaine (GIT) et le Laboratoire Génie de Production (LGP) de Tarbes a permis de mettre en place un essai reproductible pour comparer les propriétés tribologiques de revêtements d'OAD et d'OMA. Explications.

Une large gamme de matériaux est disponible lorsqu'il s'agit de concevoir un système ou un objet. Les propriétés physiques des matériaux ainsi que leurs disponibilités et leurs coûts font partie des critères de sélection. Ils sont classés dans trois grandes familles : les céramiques, les polymères et les métaux. Chacune d'entre elles est caractérisée par une nature chimique particulière lui apportant des propriétés physico-chimiques et mécaniques distinctes. Parmi elles, les métaux sont les éléments les plus nombreux du tableau périodique et leurs atomes sont liés entre eux par des liaisons métalliques.

L'aluminium est un métal et est également le troisième élément le plus abondant dans l'écorce terrestre (tableau 1). Sa faible densité ($d = 2,7$) fait de lui un métal d'une importance capitale dans le but de baisser la masse globale des systèmes pour en diminuer les coûts de consommation énergétique (Ashby and Jones, 1996).

La dépense énergétique est une problématique économique et écologique majeure de la société actuelle. La communauté scientifique est constamment à la recherche de moyens de la diminuer. Une étude sortie en 2017 évalue l'effet du frottement comme autre facteur de consommation énergétique. Ainsi, l'impact du frottement et de l'usure associée pour les secteurs des transports, de l'industrie, de

la production d'énergie et de l'habitat a été calculé. Vingt pour cent de la consommation totale d'énergie sur la planète est perdue par frottements. De plus, 3 % de l'énergie mondiale est dépensée pour remplacer des pièces affaiblies par frottement. L'utilisation de solutions novatrices permettrait de diminuer l'énergie gaspillée par frottement et usure à travers le monde de 40 % en 15 ans (Holmberg and Erdemir, 2017).

Les différentes solutions envisageables pour réduire ce gaspillage appartiennent au domaine de la tribologie. Cette science décrit précisément les interactions entre deux surfaces en contact, immobiles ou en mouvement relatif. Léonard de Vinci fut le premier à faire une approche scientifique de problèmes de frottement. Après lui, de nombreux tribologues ont tenté de décrire et de prédire le comportement tribologique des corps massifs, puis des surfaces.

Dans les années soixante-dix, les français Maurice Godet et Yves Berthier ont proposé une approche dite du « troisième corps ». Ce modèle propose d'étudier les systèmes tribologiques à travers le triplet tribologique, le circuit tribologique et les mécanismes d'accommodation de la vitesse. Le triplet tribologique permet de décrire l'ensemble du système tribologique. Il est constitué du système mécanique qui impose les conditions de frottement, des deux premiers corps qui bordent

Élément chimique	% massique
Oxygène	47
Silicium	27
Aluminium	8
Fer	5
Calcium	4
Sodium	3
Potassium	3
Magnésium	2
Titane	0,4
Hydrogène	0,1

TABLEAU 1 : Les dix éléments les plus abondants de la croûte terrestre. (Ashby and Jones, 1996).

le contact et du troisième corps se trouvant à l'interface entre les deux premiers corps (Figure 1.a). Le circuit tribologique est un outil de visualisation permettant de décrire les différents débits de matière identifiés à l'intérieur et à l'extérieur du contact (figure 1.b). Enfin, les mécanismes d'accommodation de la vitesse permettent d'identifier de quelle manière les déplacements relatifs entre les deux solides en contact se réalisent. Cette théorie a l'avantage de mieux rendre compte de la réalité des phénomènes de contact et du rôle des éléments qui le composent. Les propriétés en frottement ne sont donc pas intrinsèques à un matériau, et ne peuvent qu'être estimées pour un système décrit parfaitement. (Berthier, 1988 ; Denape, 2015 ; Zambelli and Vincent, 1998)

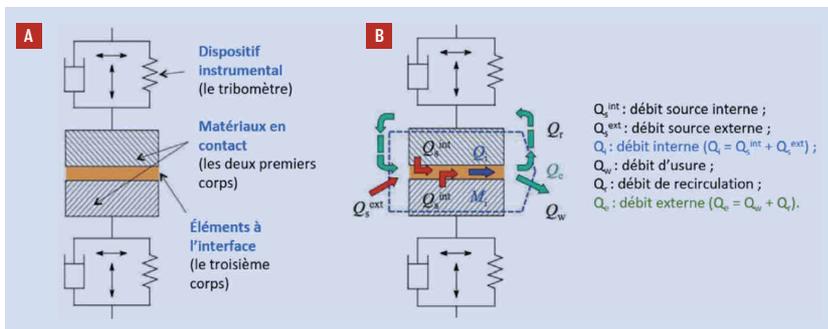


FIGURE 1 : A) Représentation schématique du triplet tribologique. (Denape, 2015). B) Circuit tribologique affichant la circulation des débris au sein d'un contact tribologique. (Denape, 2015).



FIGURE 2 : Cliché obtenu au microscope optique d'une coupe en tranche d'un revêtement d'OAD.

De nombreux phénomènes complexes se produisent de manière unique dans ce genre de système. Il n'est pas possible de les décrire en équation ni même de les mesurer individuellement. En 1699, le français Amontons définit le coefficient de frottement μ comme le facteur de proportionnalité entre la force de frottement (FT) et la force normale (FN) (Équation 1). Il est utilisé principalement pour mesurer la résistance au glissement dans un système tribologique. Le frottement est un phénomène dissipatif en énergie dont il est estimé que 95 % se réalisent sous forme d'énergie thermique ce qui provoque un échauffement des éléments du contact. L'ensemble de ces processus mécaniques, physico-chimiques et thermiques provoquent différents phénomènes d'usure. (Gras, 2011 ; Milan, 1992)

$$\mu = \frac{F_T}{F_N} \quad \text{Équation 1}$$

L'usure caractérise la dégradation d'une ou des surfaces du contact. Elle peut se manifester de nombreuses façons. Toutefois, cette étude s'intéresse à celle se produisant lors du contact entre deux surfaces solides différentes. Il s'agit principalement d'abrasion au cours de laquelle les particules les plus dures dégradent la surface la plus molle par action de coupe et déformation. Un phénomène d'adhésion physico-chimique peut aussi se produire. Des liaisons interfaciales sont formées entre les surfaces et leur rupture occasionne un frottement important et un possible déplacement de matière. (Gras, 2011 ; Zambelli and Vincent, 1998)

La dureté de l'aluminium est d'environ 100 HV 0.05. Cette faible valeur rend les pièces en aluminium particulièrement sensibles à l'usure abrasive. Toutefois, il est possible d'en modifier artificiellement la surface.

L'oxydation anodique dure (OAD)

De nombreux revêtements existent et apportent des propriétés différentes aux surfaces traitées. L'oxydation anodique dure est la technique de revêtement la plus commune pour augmenter la dureté en surface d'une pièce en aluminium. Ce traitement permet de faire croître une couche poreuse et dure d'alumine à la surface de l'aluminium. Un certain nombre d'étapes préliminaires entrecoupées de rinçages sont nécessaires pour rendre la surface de l'aluminium apte à subir le traitement. Dans un premier temps la pièce est dégraissée dans une lessive de soude de pH basique (pH < 10). Le but de cette étape est de retirer tout corps gras issu du stockage, de l'usinage ou de la manipulation des pièces pouvant interférer avec le traitement. En suivant, ces dernières sont décapées pour mettre à nu le métal et retirer l'oxyde naturel. La réaction chimique est permise grâce à une solution de soude (pH ≈ 12,7) maintenue à environ 50 °C. Après le décapage, la pièce est souillée d'une couche mince d'un mélange d'alumine et d'éléments d'alliage. Ces composés sont dissous lors de l'étape de blanchiment dans un bain d'acide nitrique. Les surfaces étant préparées, il est maintenant possible de les traiter. La pièce en aluminium est reliée à l'anode d'une cuve d'électrolyse. L'électrolyte est une solution aqueuse concentrée à 250 g/L d'acide sulfurique maintenue à 0 ± 5 °C. Le maintien du bain à basse température permet de diminuer la dissolution de l'oxyde par l'acide sulfurique. Cela autorise alors l'utilisation de densités de courant de 3 ± 0,5 A/dm² pour atteindre des épaisseurs comprises entre 25 et 100 μm, et avec une rugosité moyenne (Ra) de 2 μm. Dans le cadre de cette étude, l'épaisseur d'OAD formée sur les éprouvettes est de 55 ± 5 μm (figure 2). Ce traitement permet d'obtenir des

duretés superficielles comprises entre 300 et 450 HV0.05 selon l'alliage traité. Il est donc utilisé le plus souvent pour améliorer la tenue des pièces en aluminium à l'abrasion. (Gras, 2011 ; Zambelli and Vincent, 1998) En plus de réduire la consommation d'énergie, le contexte actuel tend à limiter l'usage d'électrolytes polluants et dangereux. Dans ce sens, l'étude de revêtements prometteurs obtenus sur des alliages de métaux légers dont la production n'implique pas la manipulation de produit toxique est intéressante.

L'oxydation micro-arcs

L'Oxydation Micro-Arc (OMA) ou Oxydation par Plasma Électrolytique (PEO en anglais) est découverte dans les années soixante-dix en URSS. Ce n'est qu'après l'éclatement de l'Union soviétique que ces travaux ont été dévoilés au reste du monde. Cette technique utilise une forte différence de potentiel le plus souvent alternative ou pulsée à une fréquence choisie entre 100 et 1000 Hz ainsi qu'une densité de courant très élevée entre la pièce et une contre-électrode. Les couches obtenues sont épaisses (autour de 100 μm), ont une adhérence importante avec le substrat et sont reconnues pour leurs propriétés mécaniques. Les revêtements ont une dureté comprise entre 1000 HV0,05 et 1800 HV0,05 et une tenue à la corrosion à l'essai de brouillard salin entre 500 heures et 1000 heures selon les alliages. Enfin, l'OMA permet de traiter aussi facilement tous les alliages d'aluminium contrairement au procédé d'OAD pour lequel les revêtements sur les alliages riches en cuivre sont difficiles à mettre en place. Ce type de revêtement est généralement proposé comme solution performante novatrice de résistance à l'abrasion.

Le traitement d'OMA est aussi réalisé avec les

installations de la société GIT (**figures 3.a et 3.b**). La seule préparation de surface pouvant être nécessaire est un dégraissage des pièces. Le bain utilisé à cette étape est à température ambiante et compatible avec la réglementation REACH. Une cuve de 1000 l est associée à un générateur de production de type CERATRONIC 325 (CER 325). Ce générateur fournit un courant électrique trapézoïdal bipolaire pulsé. Il peut délivrer une intensité comprise entre 50 et 250 A à une fréquence de 100 Hz à 1000 Hz. L'électrolyte utilisé est une solution aqueuse basique de silicate de soude et d'hydroxyde de potassium maintenue à 22 ± 1 °C. Il n'a pas d'action dissolvante, est recyclable et compatible avec la réglementation REACH. Les épaisseurs de revêtement d'OMA peuvent faire entre 20 et 150 μm . Les couches caractérisées dans cette étude font 110 ± 10 μm . La surface de la couche d'OMA est recouverte de cratères dits en « volcans » (**figure 4**). Cet état de surface est responsable de la rugosité moyenne de 8 μm mesurée sur le revêtement. L'observation en tranche de la couche montre qu'environ un tiers de la couche est friable. Les deux tiers restants situés entre la couche friable et le substrat sont denses (**figure 5**). Cette étude se propose de comparer les propriétés en frottement de revêtements d'OAD et d'OMA brut en sortie de bain. Ils ont été obtenus sur des éprouvettes en aluminium de la série 5086 dont l'élément d'alliage majoritaire est le magnésium.

Quel revêtement choisir pour une application en frottement ?

Une étude en laboratoire constitue une première étape dans le développement d'une solution matériaux pour une application tribologique donnée. C'est un moyen efficace et économique pour comprendre le comportement en frottement et à l'usure d'un couple de matériaux. En particulier, ce type de travail permet d'identifier les mécanismes de dégradation et d'en préciser les étapes. La résistance et le comportement à l'usure abrasive de ces deux revêtements ont été étudiés grâce à un protocole adapté de la norme ASTM G 133. L'essai est réalisé dans une configuration sphère/plan en déplacement linéaire alternatif (**figure 6**). L'appareil utilisé est le tribomètre UMT Tribolab développé par la société Bruker (**figure 7**).

La force appliquée au cours de l'essai est de 25 ± 5 N et la fréquence de déplacement du contact est de 5 Hz sur une distance de



FIGURE 3 : A) Installation de production de la société GIT : 2 cuves de 1000 L, 3 générateurs de courant de 250 A. B) Traitement d'OMA. Les micro-arcs sont les points blanc visibles à la surface de la pièce.

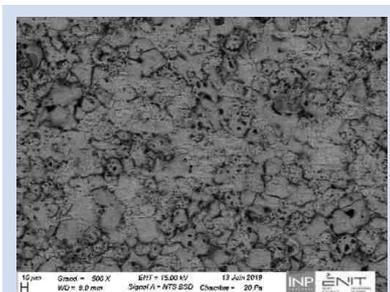


FIGURE 4 : Cliché MEB de la surface du revêtement d'OMA brut.

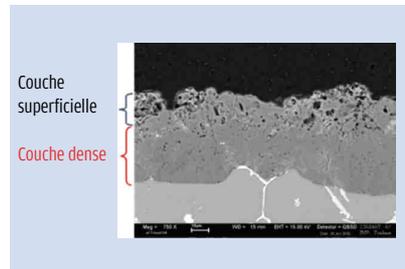


FIGURE 5 : Cliché MEB d'une coupe en tranche d'un revêtement d'OMA brut.

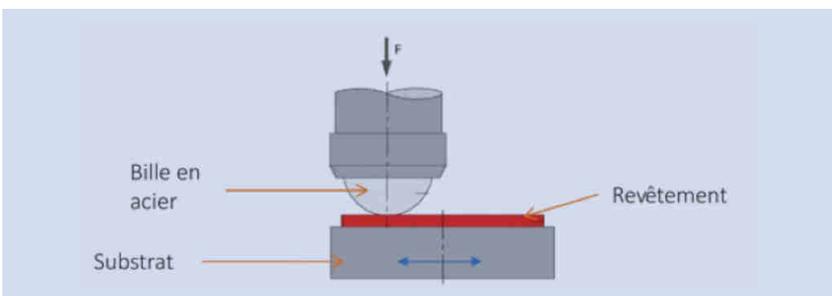


FIGURE 6 : Configuration sphère/plan en sollicitation alternative selon ASTM G133.

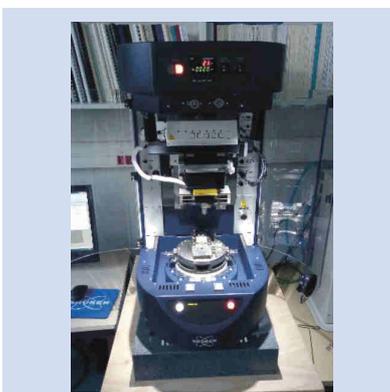


FIGURE 7 : Tribomètre Bruker UMT Tribolab.

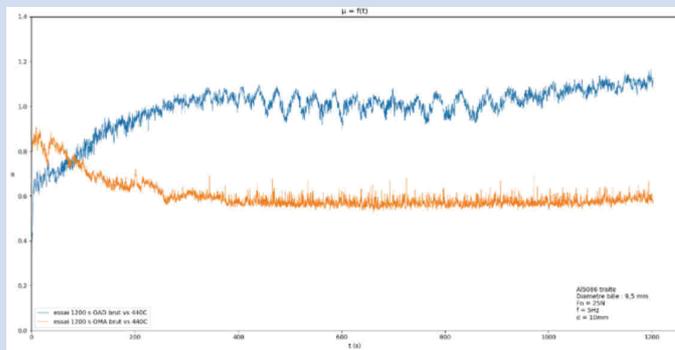


FIGURE 8 : Coefficients de frottements obtenus après 1200 s de sollicitation sur un revêtement d'OMA brut et d'OAD.

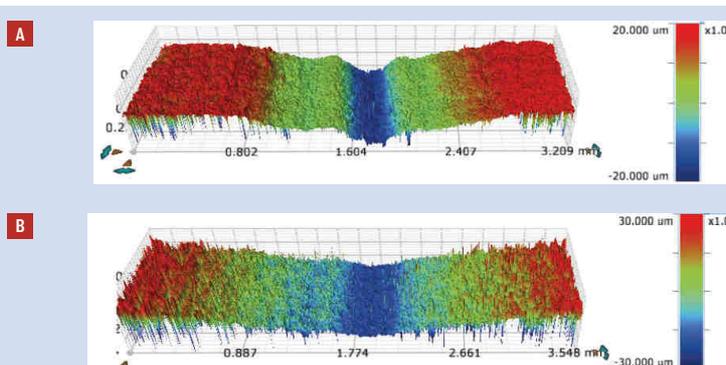


FIGURE 9 : A) Image topographique en 3D de l'éprouvette avec l'OAD. B) Image topographique en 3D de l'éprouvette avec l'OMA brut.

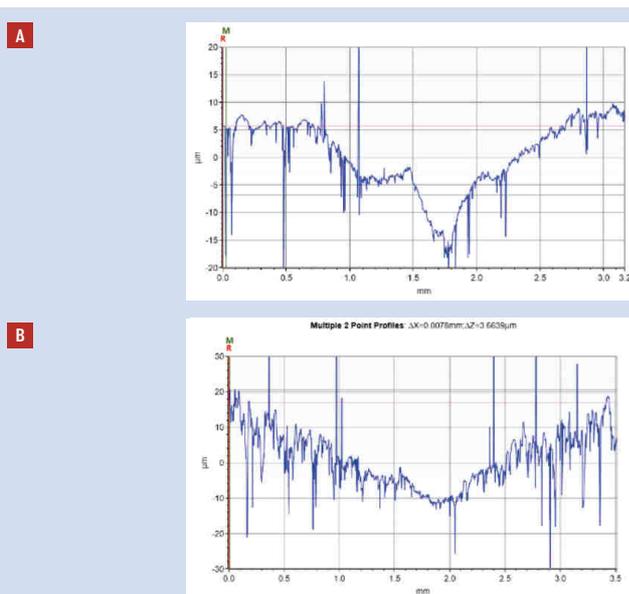


FIGURE 10 : A) Profils en 2 dimensions de l'OAD. B) Profils en 2 dimensions de l'OMA brut.

10 mm. La durée de l'essai tribologique est de 1200 secondes et il est réalisé dans les conditions de température et d'humidité du laboratoire.

La contre-face est une bille en acier 440 C de dureté de 700 HV 0.05. Son diamètre vaut 9,5 mm.

Comparaison des propriétés en frottement et identification des mécanismes d'accommodation de la vitesse

Plusieurs observations sont faites en fin d'essai. Les coefficients de frottements des couples billes/éprouvettes obtenus dans cette configuration d'essai ont été tracés en fonction du temps. Les résultats mesurés pour le couple acier/OAD donnent un coefficient de frottement moyen $\mu = 1,00$. Il est perturbé, croissant en fonction du temps et n'est pas stable après les 1200 secondes de frottement. Celui enregistré avec le couple acier/OMA est bien différent. Le coefficient moyen $\mu = 0,62$ est environ 40 % plus faible. Le tracé est décroissant jusqu'à atteindre une stabilité après environ 400 s d'essai. Il reste perturbé, mais à une fréquence plus importante que celle mesurée lors du frottement avec l'OAD (figure 8). Par la suite, les traces d'usure des deux premiers corps sont observées par profilométrie optique.

Les deux couples étudiés montrent une usure plus importante au centre de la trace d'usure sur l'éprouvette (figure 9).

Toutefois, une différence entre les deux profils d'usure est particulièrement visible sur les tracés de profils en deux dimensions. En effet, la largeur de la marque d'usure sur l'OAD est plus petite que celle formée sur l'OMA. Ce phénomène témoigne de pressions plus importantes se produisant dans le contact avec l'OAD et d'une usure principalement localisée sur la bille lors du frottement avec l'OMA. De plus, une zone portante de pression moins importante se trouve de part et d'autre de la zone d'usure la plus profonde de l'OAD (figure 10). Le frottement de deux corps l'un contre l'autre implique une différence de vitesse relative. Des mécanismes se mettent alors en place au sein du contact pour compenser ces différences de vitesses, ce sont les mécanismes d'accommodation de la vitesse (Berthier et al., 1989; Denape, 2015). Le MEB a permis d'observer les morphologies des surfaces frottées et d'y associer des mécanismes qui rendent possible l'adaptation des vitesses entre la bille fixe et l'éprouvette plane mobile.

Des stries d'usures sont visibles à la surface des méplats formés sur les billes ayant frotté à la surface des deux revêtements (figures 11 et 12). Ce phénomène témoigne de l'abrasion de la bille sous l'effet du revêtement. Les principales différences observées entre les deux revêtements sont visibles à la surface des éprouvettes. La déformation plastique de l'OAD a entraîné la formation de bourrelets (figure 13). Les arêtes franches perpendiculaires au sens de frottement observé sur l'OMA révèlent la rupture fragile de grains en surface du revêtement (figure 14).

Analyse chimique des surfaces et morphologie des débris d'usure

Le microscope électronique à balayage (MEB) avec un détecteur à électrons rétro-diffusés a permis d'identifier des transferts de matières dans le contact. Le contraste obtenu sur ces images dépend du numéro atomique de l'élément. De cette manière, plus le numéro atomique d'un atome est grand plus il apparaîtra clair/blanc. Une analyse de composition chimique est effectuée par spectroscopie de rayons X à dispersion d'énergie (EDX) en complément de ces observations morphologiques. Le choix a été fait de suivre les quantités d'aluminium et de fer pour suivre les transferts de matière du revêtement et de la bille.

Les observations MEB sont réalisées à une extrémité de la trace visible sur la billette (figure 15) ou du méplat de la bille (figure 16). Une couche de numéro atomique plus lourd que celui du revêtement est visible au MEB sur l'OAD et l'OMA (figures 17 et 18). L'analyse EDX révèle qu'environ 20 % de fer issu de la bille se retrouve à la surface de l'OAD et de l'OMA après l'essai tribologique. Il est intéressant de remarquer que pour les deux couples étudiés, aucun transfert significatif de revêtement ne s'est fait sur la bille (figures 19 et 20). Toutefois, une différence significative apparaît dans la composition chimique des débris d'usure. En effet, les débris issus du frottement entre l'OAD et la bille en acier contiennent 29 % d'aluminium et 11 % de fer. Alors que les débris qui proviennent des essais tribologiques avec l'OMA contiennent 40 % de fer et 3 % d'aluminium (tableaux 2 et 3). Une différence significative est observée également dans la morphologie des débris d'usure. Ceux formés au contact du revêtement d'OAD sont plus cohésifs que ceux formés sur l'OMA (figures 21 et 22).

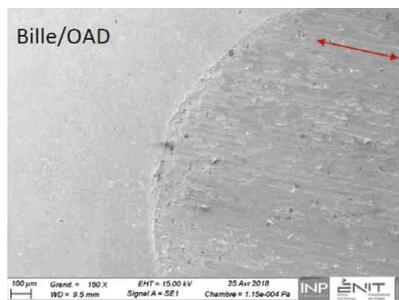


FIGURE 11 : Cliché MEB du méplat d'usure de la bille en acier ayant frotté contre l'OAD.



FIGURE 12 : Cliché MEB du méplat d'usure de la bille en acier après frottement contre l'OMA.

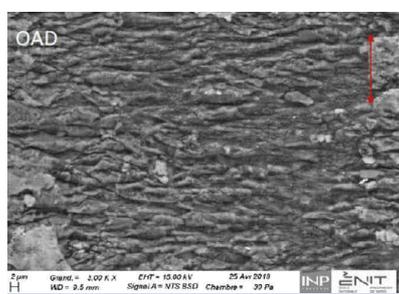


FIGURE 13 : Cliché MEB de la trace d'usure dans l'OAD après le frottement avec la bille en acier.

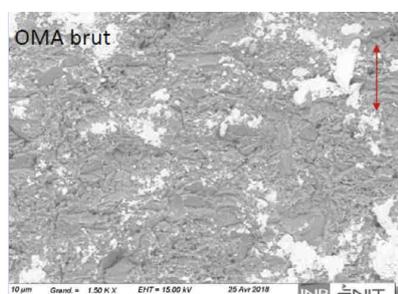


FIGURE 14 : Cliché MEB de la trace d'usure dans l'OMA après un essai contre la bille en acier.

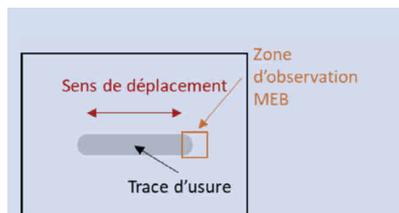


FIGURE 15 : Représentation schématique de la zone d'observation MEB sur les éprouvettes

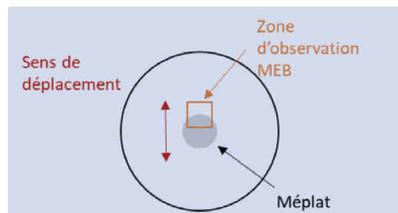


FIGURE 16 : Représentation schématique de la zone d'observation MEB sur les billes.

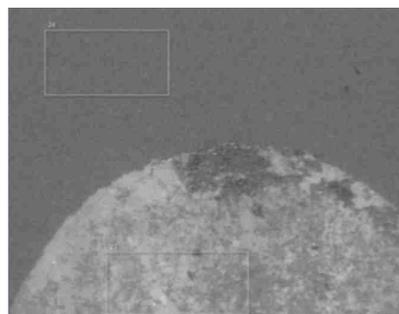


FIGURE 17 : Cliché MEB de la trace d'usure du revêtement d'OAD après 1 200 s de sollicitation par une bille en acier.

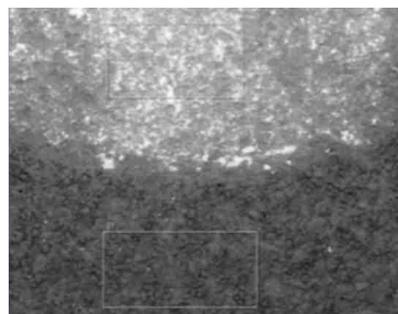


FIGURE 18 : Cliché MEB de la trace d'usure du revêtement d'OMA après 1 200 s de sollicitation par une bille en acier.

Élément chimique	OAD/bille en acier 440C				
	OAD Non sollicité	OAD sollicité	Bille Non sollicité	Bille Sollicité	Débris
Al	39 %	35 %	1 %	2 %	29 %
Fe	-	18 %	60 %	61 %	11 %

TABLEAU 2 : Compositions chimiques obtenues par EDX en surface des billes, des éprouvettes traitées par OAD et des débris issus du contact frottant.

Élément chimique	OMA/bille en acier 440C				
	OMA Non sollicité	OMA sollicité	Bille Non sollicité	Bille Sollicité	Débris
Al	27 %	28 %	1 %	2 %	3 %
Fe	-	20 %	64 %	60 %	40 %

TABLEAU 2 : Compositions chimiques obtenues par EDX en surface des billes, des éprouvettes traitées par OMA et des débris issus du contact frottant.

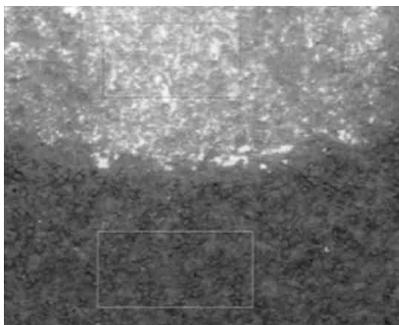


FIGURE 18 : Cliché MEB de la trace d'usure du revêtement d'OMA après 1200 s de sollicitation par une bille en acier.

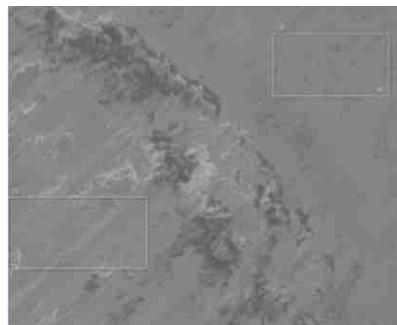


FIGURE 19 : Cliché MEB du méplat d'usure observé sur la bille ayant frotté 1200 s sur le revêtement d'OAD.

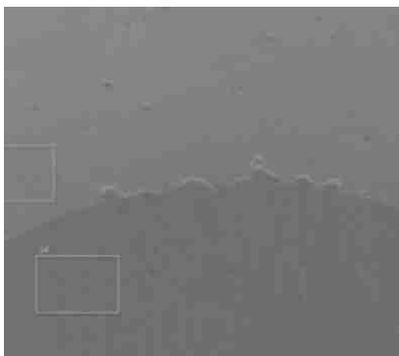


FIGURE 20 : Cliché MEB du méplat d'usure observé sur la bille ayant frotté 1200 s sur le revêtement d'OMA.

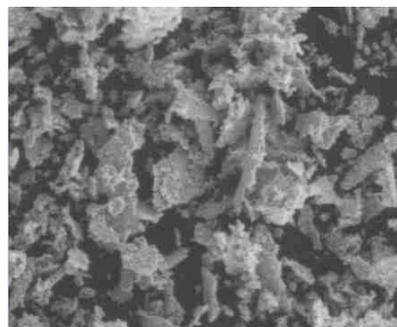


FIGURE 21 : Cliché MEB des débris d'usure observés après 1200 s de frottement entre une bille en acier et un revêtement d'OAD.

Synthèse des observations faites après les essais tribologiques entre une bille en acier 440 C et le revêtement d'OAD.

Les essais tribologiques alternatifs réalisés avec une bille en acier 440 C contre le revêtement d'OAD sont schématisés dans la **figure 21**. La représentation de gauche reproduit une perspective de l'essai dans le sens normal au plan tandis que celle de droite évoque la vue de l'essai parallèlement au plan.

Les images obtenues avec le MEB et les spectres EDX révèlent la présence d'un tribofilm sur la couche d'OAD, constitué des éléments de la bille, avec 18 % de fer. Trente-cinq pour cent d'aluminium spécifique du revêtement sont détectés. Les débris formés au cours du frottement sont également issus de la bille (29 % de fer) et du revêtement (11 % d'aluminium) (**figure 21**). Le profilomètre optique a aussi permis d'identifier des zones de portance dans la trace d'usure (**figure 21**). Les contraintes γ sont plus faibles et le déplacement des débris γ est favorisé. Cela leur donne leur structure cohésive en forme de plaquette (**figure 21**). Les particules qui se trouvent hors du contact bille/revêtement, et qui sont piégées dans la trace d'usure pourront recirculer plus tard dans l'essai (**figure 21**). Enfin, la géométrie des pentes latérales et aux extrémités des traces permet l'évacuation des débris dans ces directions (**figure 21**).

Deux types de mécanismes d'accommodation ont été identifiés. Des stries sur la bille montrent son abrasion. De plus, les bourrelets sur la couche d'OAD indiquent une déformation plastique du revêtement.

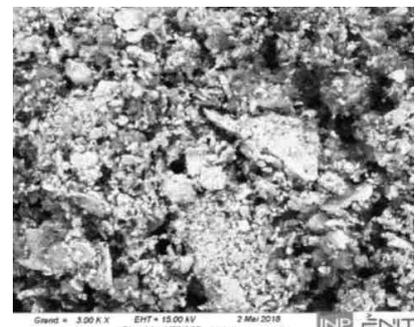


FIGURE 22 : Cliché MEB des débris d'usure observés après 1200 s de frottement entre une bille en acier et un revêtement d'OMA.

Synthèse des observations faites après les essais tribologiques d'une bille en acier 440 C contre le revêtement d'OMA.

L'essai tribologique alternatif réalisé entre une bille en acier 440 C et le revêtement d'OMA est schématisé selon la vue normale au plan et la vue parallèle au plan (figure 22).

Les examens au MEB et les analyses EDX attestent de la présence d'une couche interfaciale à la surface du revêtement d'OMA. Cette strate tribo-formée contient à la fois des éléments de la bille (20 % de fer) et du revêtement (28 % d'aluminium). Les débris formés au cours du frottement sont très majoritairement issus de la bille (40 % de fer) par rapport au revêtement (3 % d'aluminium) (figure 22). Les topographies de surface ont également permis d'identifier une usure avec la forme d'un « V », dans une zone où la circulation des débris est facilitée (figure 22). Les débris ne pouvant pas demeurer dans l'interface sont peu cohésifs (figure 22). Les particules se trouvant hors du contact bille/revêtement, mais restant dans la trace d'usure pourront recirculer plus tard dans l'essai (figure 22). Enfin, la géométrie en pente permet l'évacuation des débris par les bords latéraux et les extrémités (figure 22). Deux types de mécanismes d'accommodation ont été identifiés. Des stries sur la bille témoignent de son abrasion. La détection d'arêtes franches perpendiculairement au sens de frottement manifeste la rupture fragile de grains du revêtement.

Conclusions

Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet ROMA (Reprise mécanique de l'oxydation micro-arcs) pour lequel collabore la société Galvanoplastie Industrielle Toulousaine (GIT) et le Laboratoire Génie de Production (LGP) de Tarbes. Elle a permis de mettre en place un essai reproductible pour comparer les propriétés tribologiques de revêtements d'OAD et d'OMA. Si les revêtements sont tous deux majoritairement constitués d'alumine, de nombreuses différences ont été observées. Dans les conditions de cet essai, le

Remerciements

Cette étude a été réalisée dans le cadre d'un projet ReadYnov intitulé Reprise mécanique de l'oxydation micro-arcs (ROMA). Il a été financé par la région Occitanie avec des fonds européens (FEDER) associant la société Galvanoplastie Industrielle Toulousaine (GIT) et le laboratoire Génie de Production (LGP) de Tarbes.

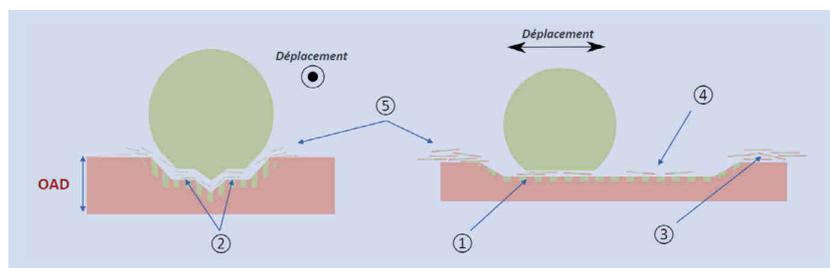


FIGURE 23 : Représentation schématisée de l'essai tribologique entre une bille en acier 440 C et un revêtement d'OAD.

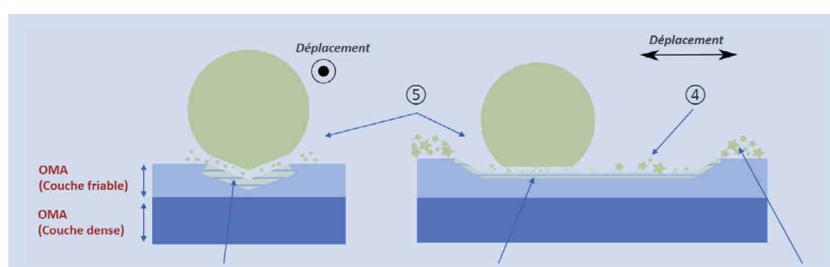


FIGURE 24 : Représentation schématisée de l'essai tribologique entre une bille en acier 440 C et un revêtement d'OMA.

revêtement d'OMA a permis une diminution du coefficient de frottement de 40 % par rapport à celui d'OAD. La différence de largeur de traces mesurées au profilomètre optique témoigne de pressions plus importantes se produisant dans le contact avec l'OAD et d'une usure principalement localisée sur la bille lors du frottement avec l'OMA. Ce travail a également permis d'identifier certains des mécanismes d'accommodation des deux revêtements.

Cette étude préliminaire montre que l'OMA est un candidat sérieux au remplacement de l'OAD pour certaines applications. Le faible impact écologique d'un traitement d'OMA ainsi que ses propriétés physico-chimiques prometteuses pourraient également permettre d'alléger plus encore certains systèmes mécaniques n'utilisant pas d'aluminium à ce jour. Des travaux de caractérisations complémentaires sont en cours dans le but de nous rapprocher des conditions réelles d'utilisation des pièces. Ainsi il est prévu de mener une campagne d'essai sur des états de surfaces microbillés et rectifiés de l'OMA. L'objectif sera à la fois de vérifier l'effet des préparations mécaniques de surface sur les propriétés des couches et l'effet de la baisse de la rugosité sur l'usure de la contre-face. D'autres billes en alumine et en acier 100C6 seront également choisies pour durcir les conditions d'essai. L'influence des conditions environnementales sera aussi étudiée à travers l'humidité relative et la température.

Bibliographie

- Afnor, 2005. NF EN 573-1: 2005-02, *Aluminium et alliages d'aluminium : Composition chimique et forme des produits corroyés*, Système de désignation numérique.
- Ashby, M.F., Jones, D.R.H., 1996, *Matériaux : propriétés et applications*, Dunod. ed.
- Berthier, Y., 1988, *Mécanismes et tribologie* (thesis). Lyon, INSA.
- Berthier, Y., Godet, M., Brendle, M., 1989, *Velocity Accommodation in Friction*. Tribology Transactions 32, 490-496. <https://doi.org/10.1080/10402008908981917>
- Denape, J., 2015, *Third Body Concept and Wear Particle Behavior in Dry Friction Sliding Conditions*. KEM 640, 1-12. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.640.1>
- Develay, R., 1992, *Propriétés de l'aluminium et des alliages d'aluminium corroyés*.
- Gras, R., 2011, *Traitements et revêtements de surface à usage tribologique*.
- Holmberg, K., Erdemir, A., 2017, *Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions*. Friction 5, 263-284. <https://doi.org/10.1007/s40544-017-0183-5>
- Milan, J.-J., 1992, *Notions fondamentales sur le frottement, l'usure, la lubrification et la technologie des surfaces*, 2nd édition. ed. Université de Bordeaux 1, Institut Universitaire de technologie.
- Reboul, M., 2005, *Corrosion des alliages d'aluminium*.
- Zambelli, G., Vincent, L., 1998, *Matériaux et contacts : une approche tribologique*. Ed. Techniques de l'ingénieur.