

Conception d'un tribomètre environnemental pour l'étude de la réactivité des surfaces frottantes

J.-C. SALABURA^{1,a}, A.S. ADAMOU², J. DENAPE², J.-Y. PARIS² ET E. ANDRIEU¹

¹ Centre Interuniversitaire de Recherche et d'Ingénierie des Matériaux, UMR CNRS 5085, INPT/ENSIACET, 118 route de Narbonne, 31077 Toulouse Cedex 04, France

² Laboratoire Génie de Production, École Nationale d'Ingénieurs, 47 avenue d'Azereix, BP 1629, 65016 Tarbes Cedex, France

Résumé – En tribologie, un moyen de progresser efficacement dans la compréhension des phénomènes de couplage mécanique/thermique/environnemental sur la réactivité au niveau des surfaces et des interfaces est l'expérimentation où les conditions de contact sont parfaitement contrôlées (en termes de pression partielle d'oxygène, d'humidité ou sous vide, et de température). Pour cela, un tribomètre environnemental a été développé. L'objet de cet article est d'exposer les solutions technologiques adoptées, de présenter l'instrumentation (capteurs de force, de déplacement, de pression, de température, de résistance de contact, analyseur de gaz in situ), et de décrire les performances de ce prototype.

Mots clés : Tribomètre / environnement / chauffage radiatif / vide

Abstract – In tribology, a way of improving efficiently the understanding of the mechanical/thermal/environmental interactions on the chemical reactivity at the surface and interface level is to perform experiments where contact conditions are perfectly controlled (in terms of partial oxygen pressure, moisture or vacuum, and temperature). For this reason, an environmental tribometer was developed. The aim of this article is to set out the chosen technological solutions, to present the instrumentation (force, displacement, pressure temperature and contact resistance sensors, in situ gas analyser), and to describe the performances of this prototype.

Key words: Tribometer / environment / radiative heating / vacuum

1 Introduction

Les très fortes interactions existant entre les sollicitations mécaniques et thermiques locales d'une part, l'environnement et la réactivité physico-chimique des surfaces d'autre part constituent une difficulté récurrente pour formaliser des modèles tribologiques de dynamique des processus interfaciaux. Le découplage et la hiérarchisation de ces phénomènes impliquent une forte maîtrise des paramètres thermiques et environnementaux afin d'analyser précisément leur impact sur le comportement tribologique général.

L'objectif de ce prototype est de mener des essais tribologiques dans des conditions de réactivité maîtrisées et non plus simplement subies, afin de mieux contrôler la formation des couches d'oxydes et de les caractériser en termes de performances tribologiques. Les conditions de réactivité dans le contact sont alors conditionnées à la

fois par les paramètres environnementaux (température et pression partielle d'oxygène) et par les paramètres opératoires (charge et vitesse). Le matériau retenu pour cette étude est un alliage réfractaire à base nickel (Alliage IN 718) en raison de sa bonne tenue mécanique à haute température. Par ailleurs, ses mécanismes d'oxydation sont bien connus.

2 Description du tribomètre

2.1 Aspects fonctionnels

La configuration du contact est de type pion-disque. Le pion est tournant alors que le disque reste fixe. Les dimensions du disque sont représentées sur la figure 1. Le pion est de forme cylindrique de 6 mm de diamètre et de 15 mm de long. Pion et disque sont fixés aux extrémités de deux arbres coaxiaux par l'intermédiaire de porte-échantillons en superalliage base nickel, lesquels

^a Auteur correspondant :
jeanclaude.salabura@ensiacet.fr

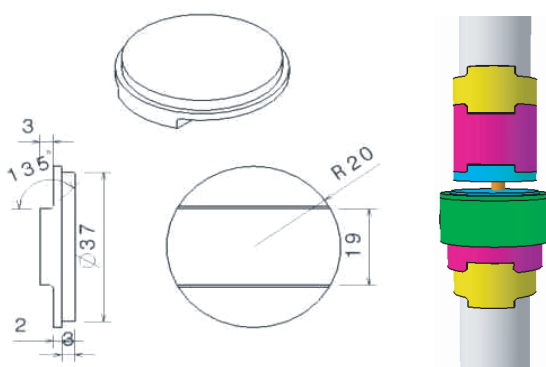


Fig. 1. Positionnement et dimensions des échantillons de frottement.

étant solidaires de pièces en céramique (alumine) constituant une barrière thermique.

Le pion est monté sur l'arbre supérieur. Cet arbre est libre en déplacement vertical pour assurer la mise en charge. La mesure du déplacement vertical de l'arbre est obtenue grâce à un capteur de type LVDT (à induction) dont la précision est de $\pm 1,25 \mu\text{m}$. Cette mesure permet de positionner correctement les échantillons avant essai et d'enregistrer les effets cumulés de l'usure du couple pion/disque, de la dilatation de l'arbre sous l'effet de la génération de chaleur due au frottement et enfin la constitution des lits de débris circulant dans le contact pendant l'essai. Ces différents effets sont découplés par des mesures préliminaires ou des enregistrements profilométriques de l'usure des échantillons après essai. Un couplemètre capable de mesurer un effort axial de 1 à 100 N et un couple maximum de 2 N.m est également situé sur cet arbre afin de déterminer l'évolution du coefficient de frottement en continu.

Les vitesses de glissement prévues au niveau du contact sont comprises entre de 0,01 m/s à 1,5 m/s. C'est l'arbre inférieur, libre en rotation mais bloqué en translation, qui assure l'entraînement du disque par l'intermédiaire d'un accouplement magnétique. A noter qu'un " fusible " mécanique a été installé entre l'accouplement magnétique et l'axe inférieur afin de protéger les capteurs d'efforts. Un collecteur tournant récupère les différents fils de mesure situés sur les parties tournantes comme les thermocouples. Un convertisseur de fréquence permet le réglage de la vitesse de rotation du moteur d'entraînement (moteur électrique de 1,55 kW).

La température des échantillons est comprise entre l'ambiante et 900 °C avec des vitesses de chauffe importantes. Le choix s'est porté sur la conception d'un four à rayonnement qui focalise la luminescence des filaments des lampes halogènes sur la ligne d'essai. Ce four comprend 8 lampes de 1 kW situées aux foyers de 4 ellipses et est constitué de deux parties symétriques (Fig. 2). Le refroidissement des surfaces rayonnantes et des connexions électriques est assuré par une circulation d'eau.

La validation du dispositif de chauffage ainsi que des éléments de refroidissement a été effectuée à l'aide de thermocouples implantés dans différentes zones de l'enceinte

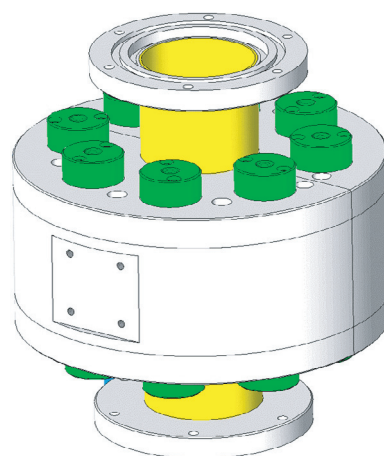


Fig. 2. Schéma du four à rayonnement avec ses huit lampes au foyer de chaque chambre elliptique.

à vide. La montée en température est de l'ordre de 7 min pour atteindre 900 °C. La température au niveau des paliers de guidage reste voisine de 20 °C, soit très inférieure à la température limite d'utilisation de ces paliers qui est de 80 °C.

Le frottement du couple pion/disque doit pouvoir s'effectuer sous atmosphère contrôlée avec la possibilité d'effectuer un vide préalable égal d'au moins 10^{-6} mbar. Pour cela, un fourreau en superalliage matérialise la chambre d'essai autour de laquelle vient se positionner le four à lampes. De part et d'autre du fourreau, des enceintes étanches permettent les branchements suivants : système de pompage sous vide, mesure du vide, mise à l'air, connexion avec un analyseur de gaz et connexions électriques dont les câbles de thermocouples et la mesure de conductibilité électrique entre le pion et le disque. Pour réaliser les mesures de résistivité électrique entre le pion et le disque, un collecteur tournant a été monté sur l'arbre inférieur. Le dispositif de pompage de l'air est constitué d'une pompe à palettes (vide primaire) relayée par une pompe turbomoléculaire (vide secondaire).

Un vide primaire de 4.10^{-2} mbar d'air est atteint en 2,5 h environ et un vide secondaire de 5.10^{-5} mbar d'air en 2 h supplémentaires. Les enregistrements des différents capteurs de pression et de l'analyseur de gaz ont montré

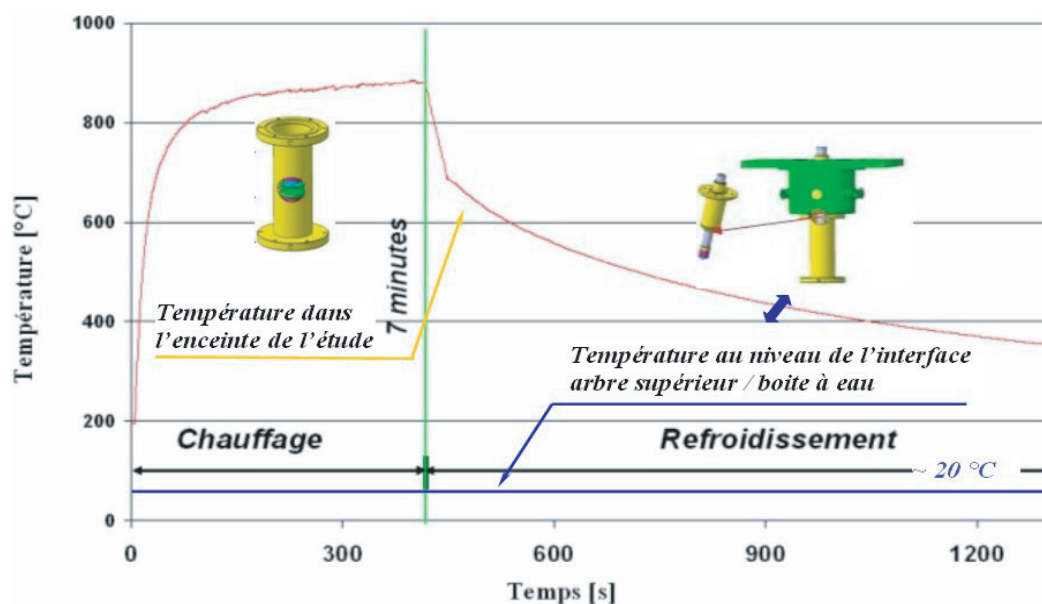


Fig. 3. Performance du chauffage et des systèmes de refroidissement au niveau des échantillons (courbe supérieure) et au niveau des barrières thermiques dans l'enceinte d'étude (ligne inférieure).

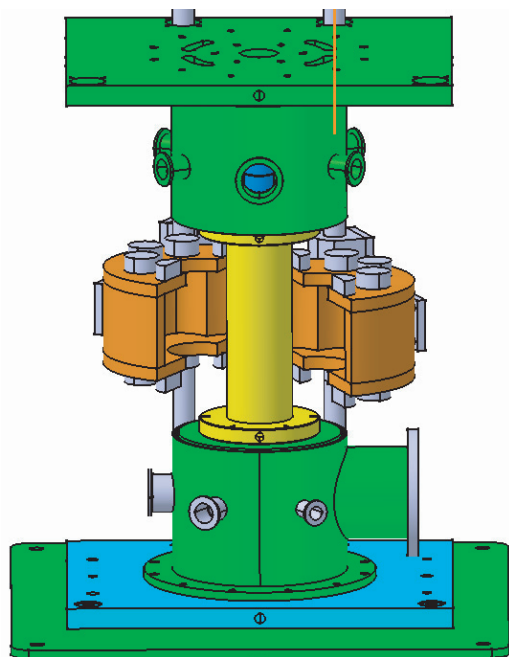


Fig. 4. Tribomètre environnemental réalisé pour cette étude

une très bonne homogénéité du vide dans les différentes parties du dispositif au cours du pompage (Fig. 4).

2.2 Quelques résultats

Les essais ont été effectués en couple homogène dans six conditions de réactivité : trois pressions d'air (pression atmosphérique, vide primaire à 4.10^{-2} mbar, vide secondaire à 5.10^{-5} mbar) chacune sous deux températures (température ambiante et $650\text{ }^{\circ}\text{C}$). Les échantillons testés à $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ont subi une oxydation préalable *in situ* de

30 min immédiatement avant frottement. Le refroidissement des échantillons après essai se fait dans l'enceinte du tribomètre. Tous les essais ont été menés à une vitesse de $0,25\text{ m.s}^{-1}$ (125 tr.min^{-1}) et à charge constante de 15 N (soit une pression moyenne de contact de $0,53\text{ MPa}$) sur une durée de 20 min.

À température ambiante, les coefficients de frottement enregistrés restent relativement stables (Fig. 5a) autour d'une valeur moyenne de l'ordre de 0,9 sensiblement constante pour les trois pressions d'air. En revanche, les taux d'usure sont pratiquement doublés

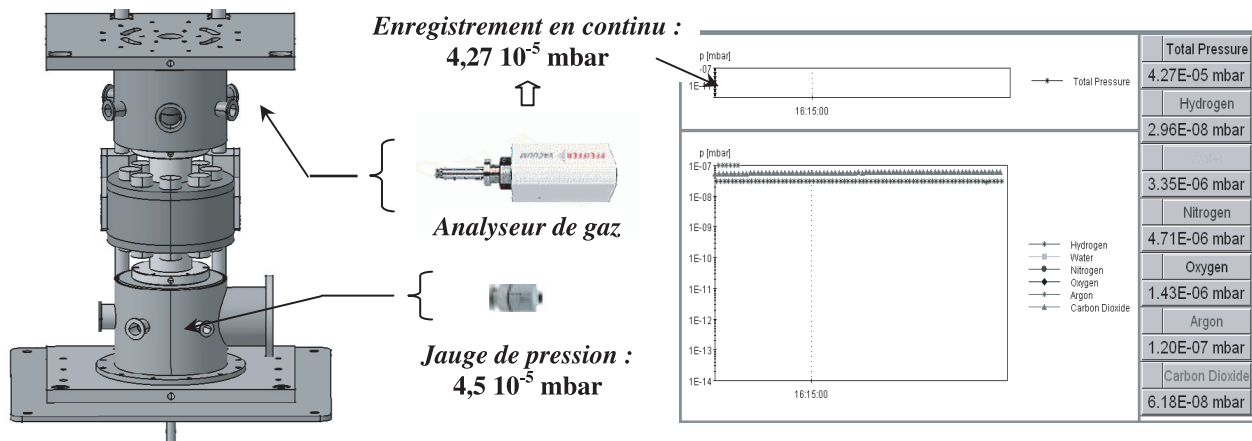


Fig. 5. Performance de pompage dans l'enceinte à vide en pompage secondaire.

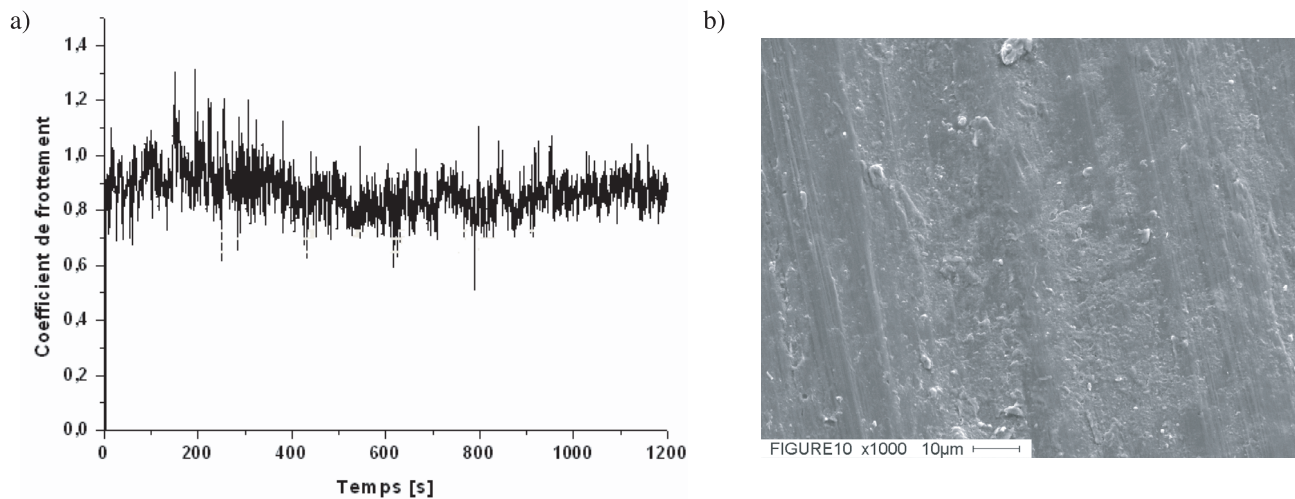


Fig. 6. (a) Évolution du coefficient de frottement en fonction du temps (a) à température ambiante et pression atmosphérique ($0,25 \text{ m.s}^{-1}$, 15 N) et (b) observation de la trace d'usure en microscopie électronique.

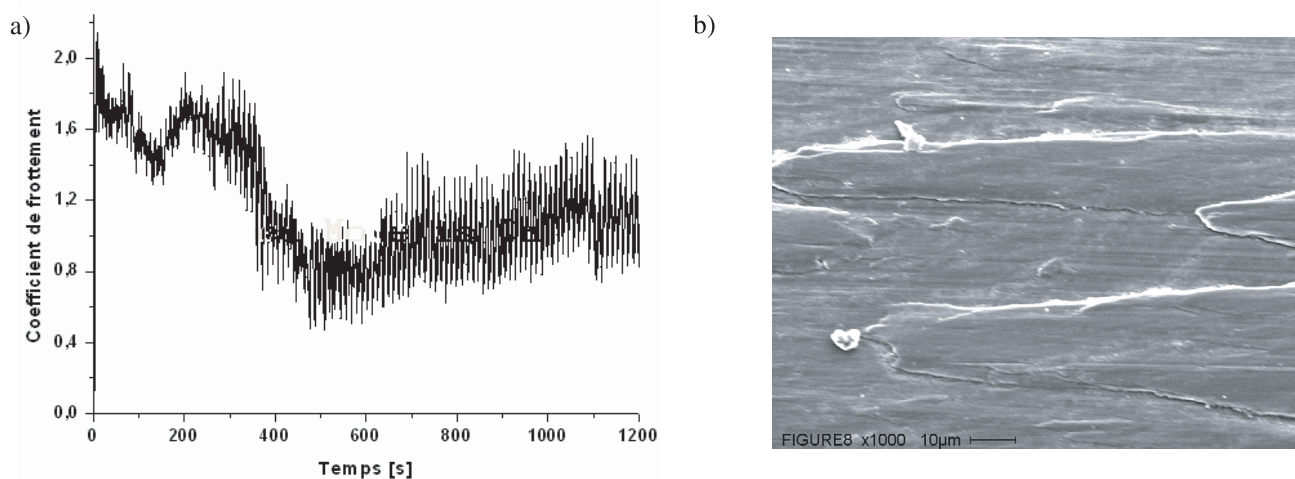


Fig. 7. (a) Évolution du coefficient de frottement en fonction du temps à 650°C sous vide secondaire ($0,25 \text{ m.s}^{-1}$, 15 N) et (b) observation de la trace d'usure en microscopie électronique.

lorsque l'on passe de la pression atmosphérique au vide secondaire (respectivement $4,3 \cdot 10^{-8} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ et $8,1 \cdot 10^{-8} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$). Les profondeurs d'usure associées évoluent dans le même temps de $0,85 \text{ }\mu\text{m}$ à $1,6 \text{ }\mu\text{m}$, valeurs très supérieures à l'épaisseur de la couche d'oxydes formée naturellement (épaisseur comprise pour cet alliage entre 1 et 2 nm à température ambiante et à pression atmosphérique).

3 Conclusion

Un tribomètre environnemental permettant d'étudier la réactivité des surfaces frottantes, a été réalisé en contrôlant la température et la pression dans une enceinte étanche enfermant les échantillons (pion plan - disque rotatif). Différents essais de performances (température et pression) ont été menés afin de vérifier les limites du dispositif.

Une série d'essais a été menée sur un couple homogène en alliage base nickel (alliage 718) pour étudier les effets des couplages mécaniques (vitesse de glissement de $0,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ et une charge appliquée de 15 N), thermiques (température ambiante et $650 \text{ }^\circ\text{C}$) et chimiques

(pression atmosphérique, vide primaire et vide secondaire). Les résultats obtenus ont montré que l'oxydation jouait un rôle majeur dans la protection des surfaces frottantes.

Ainsi, à température ambiante, le comportement tribologique est amélioré sous air à pression atmosphérique par rapport aux essais sous vide. À haute température, le renouvellement rapide des couches d'oxydes pendant le frottement réduit encore fortement les dégradations. Cependant cette réduction reste plus limitée à pression atmosphérique en raison de la formation en sous-couche, d'une zone de déplétion aux propriétés mécaniques affaiblies.

Références

- Adamou, A.S., Denape, J., Paris, J-Y., Salabura, J-C., Andrieu, E., Ducroux, C. "Conception d'un tribomètre environnemental pour l'étude de la réactivité des surfaces frottantes", Actes des Journées Francophones de Tribologie 2003, *Presses Polytechniques Universitaires Romandes*, 2005 (ISBN 2-88074-608-6).