

Analyse de l'établissement du contact réel à une interface saphir-métal.

Bourassia BENSAAD, Brahim BOUROUGA, Bertrand GARNIER

Laboratoire de Thermocinétique UMR CNRS 6607, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, Rue Christian Pauc, BP 506009, 44306 Nantes.

Résumé - Cette communication vise l'étude de l'évolution de la structure d'une interface saphir/laiton sous charge croissante. Cette évolution affecte principalement les trois paramètres essentiels qui gouvernent la résistance thermique de contact : le taux réel de contact S^* , la densité de points de contact N et la distance de séparation d entre plans moyens de contact.

Nomenclature

d	distance entre plans moyens de contact, m	R_p	hauteur du pic le plus haut par rapport au plan moyen, μm
H_c	micro-dureté effective, GPa	R_q	rugosité moyenne quadratique, μm
H_v	dureté Vickers, GPa	RTC	résistance thermique de contact, m^2K/W
N	densité de points de contact, m^{-2}	S^*	taux réel de contact, %
P	pression de contact, bar		
R_a	rugosité moyenne arithmétique, μm		

1. Introduction

Essentiellement expérimentale, la présente étude a pour objet l'observation simultanée de l'évolution de la résistance thermique de contact (RTC) et des paramètres de contact à une interface de type saphir-métal sous charge progressive. L'évolution de la structure de l'interface est perçue à travers les variations des trois paramètres de contact gouvernant la RTC : le taux réel de contact S^* , la densité de points de contact N et la distance de séparation d entre plans moyens de contact. L'idée de base est de mettre au point des techniques de mesure dans lesquelles on pourrait, d'une part, observer par profilométrie optique, par imagerie et par caractérisation mécanique le changement de la structure de l'interface et d'autre part mesurer la RTC. On détermine, ainsi, les variations correspondantes des paramètres de contact réel S^* , N et d . Les valeurs de RTC estimées par certains modèles théoriques à partir des paramètres de contact obtenus expérimentalement sont confrontées aux valeurs de RTC mesurées. La valeur de RTC mesurée sert de référence pour l'étude de l'évolution des paramètres de contact.

Nous présentons ici des résultats obtenus sur des surfaces pyramidales. Ces résultats concernent essentiellement l'observation de l'évolution de S^* , N et d que l'on obtient à partir des déformations relevées par essai de micro-dureté, par profilométrie et par une technique d'imagerie que nous avons introduite pour l'étude des interfaces. Le texte est organisé en deux sections : la première présente la démarche expérimentale et la seconde est dévolue aux résultats d'estimations des paramètres de contact et de mesures de la RTC.

2. Approche expérimentale

2.1. Démarche expérimentale

Le dispositif expérimental a été conçu et dimensionné dans le but de mesurer la RTC, en régime transitoire et permanent, et d'observer l'évolution mécanique de l'interface de contact

entre un échantillon plan en saphir optiquement lisse et très dur et une surface métallique rugueuse. Le dispositif expérimental se présente sous la forme de deux configurations différentes suivant la nature des mesures à réaliser [1, 2]. Pour la mesure thermique, le dispositif expérimental se compose essentiellement de quatre parties : un couple laiton/saphir situé entre deux sources de chaleur « froide et chaude » et un système de chargement pneumatique. Une articulation de type rotule assure la liaison entre le système de chargement et le couple saphir/laiton. Pour l'observation de l'interface de contact nous gardons les mêmes organes utilisés dans la mesure thermique, sauf la boîte froide qui est remplacée par un couvercle rigide comportant un trou de 3mm de diamètre servant de fenêtre d'observation. Le dispositif expérimental est conçu de telle sorte que le piston, la bille, l'échantillon, le saphir et la boîte froide aient des axes de symétrie confondus.

Les relevés topographiques sont réalisés au moyen d'un profilomètre UBM de type UBC14 à focalisation dynamique. La photographie à travers le saphir transparent est faite au moyen d'un appareil photo numérique monté sur un stéréo-microscope Olympus K700.

Afin d'estimer la RTC à l'interface laiton/saphir, l'échantillon métallique ainsi que la source froide sont instrumentés au moyen de thermocouples de type K de 80 μm . Nous avons choisi de travailler sur un état de surface dit contrôlé, obtenu par fraisage se présentant comme un réseau de pyramides à base carrée ($330 \times 330 \mu\text{m}^2$, $250 \times 250 \mu\text{m}^2$, $140 \times 140 \mu\text{m}^2$), et de hauteur donnée (90, 70, 50 μm). Les surfaces pyramidales servent à étudier l'évolution S^* tout en gardant N constant. La procédure expérimentale consiste à :

- faire des relevés profilométriques avant et après chaque palier de pression. On obtient alors des informations sur les déformations plastiques subies par la surface de l'échantillon ainsi que l'évolution de la rugosité et du taux réel de contact (d et S^*);
- photographier sous microscope une aire représentative de l'interface pièce-saphir sous charge (à travers le saphir transparent) en vue d'estimer la densité de points de contact N . Pour cela, l'interface est systématiquement nettoyée puis remplie d'une pâte opaque permettant la détection de tous les spots de contact dans la zone observée dans les meilleures conditions d'éclairage, de contraste et de couleur.
- la mesure de la RTC à l'interface pièce-saphir qui va servir de référence aux estimations de RTC par des modèles théoriques choisis selon les caractéristiques des surfaces étudiées. On retient un domaine valeurs de pression de contact allant de 0,5 à 216 bars.

2.2. Mise au point du dispositif de la mesure profilométrique

Pour les relevés profilométriques, le pas de scrutation est de 1 μm tel que cela a été suggéré par Belghali M. [3]. On a déterminé par expériences successives qu'une surface carrée couvrant 12 pyramides pouvait être représentative de toute la surface pyramidale de l'échantillon.

Juste pour comparaison, la caractérisation par profilométrie montre que la loi de distribution d'une surfaces pyramidale n'est pas gaussienne comme cela peut être le cas pour celles de surfaces tournée ou électro-érodée come cela est représenté sur la figure 1.

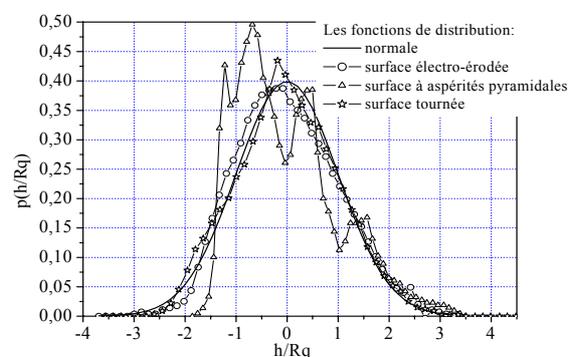


Fig. 1 : Comparaison des lois de distribution des surfaces étudiées avec la loi normale

2.3. Mise au œuvre du dispositif d'imagerie

La mesure de N (et potentiellement S^*) consiste à étaler une couche de pâte opaque entre la plaque de saphir transparente et la surface rugueuse de l'échantillon métallique. Au cours du chargement, les sommets les plus hauts de la surface rugueuse pénètrent la pâte, la traversent et viennent s'écraser contre le plan transparent du saphir. On peut alors distinguer les zones de contact se former suivant l'intensité du chargement tel que cela est représenté sur la figure 2.

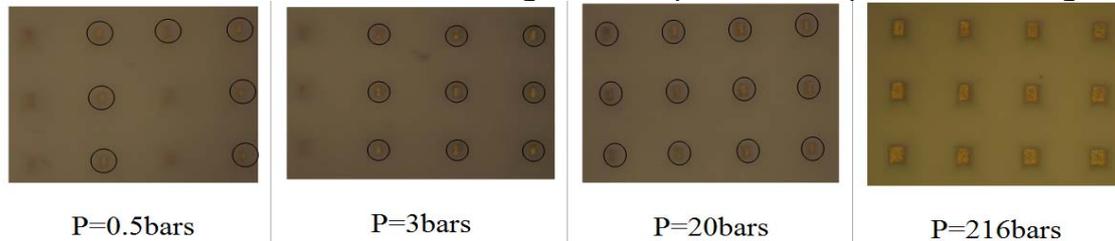


Figure 2 : Relevés d'images d'une interface aspérité/saphir en fonction de la charge.

Un logiciel de traitement d'image développé sur Matlab permet de déterminer un seuillage des couleurs constituant ces images et de tracer les contours des spots de contact aspérités-saphir. Ainsi, on peut comptabiliser les spots de contact, autrement dit déterminer N , et donner une approximation de S^* . La figure 3 présente un exemple de relevés d'images d'un contact aspérité/saphir.

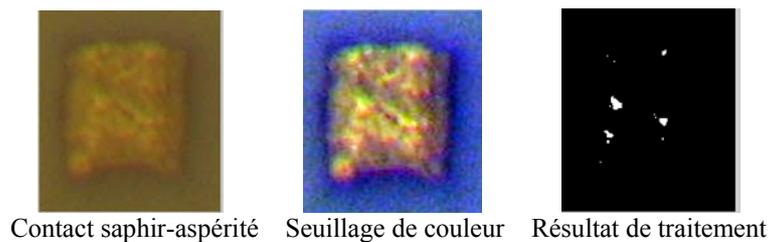


Figure 3 : Traitement d'image d'une aspérité de l'interface LP3/saphir.

3. Résultats

3.1. Analyse des résultats de la mesure de la RTC

La comparaison des mesures de RTC sur les échantillons en laiton ayant des surfaces à aspérités pyramidales LP3, LP4 et LP5 (les densités de pyramides correspondantes sont $9,3 \cdot 10^6 \text{m}^{-2}$, $15,7 \cdot 10^6 \text{m}^{-2}$ et $51 \cdot 10^6 \text{m}^{-2}$ respectivement) présentée sur la figure 4 montre une disposition bien cohérente des courbes dans la plage de pression allant de 7 à 216 bar ; la RTC diminue quand la densité de point de contact augmente. On remarque que dans la gamme de pression de 0,5 bar à 3bars, la courbe correspondant à l'échantillon LP5 se situe au dessus des deux autres courbes. Cela peut se justifier par le fait que pour ces faibles charges, toutes les pyramides ne participent pas au contact, comme le montre la figure 2.

Sur la figure 5, on compare les courbes de la RTC mesurées pour deux échantillons en laiton en contact avec la plaque de saphir. Ces deux échantillons de laiton ont des paramètres de rugosité Rq et Rp très proches mais des états de surface élaborés différemment : l'un est électro-érode LE et l'autre pyramidal (LP4). On relève ici que le type d'usinage n'a pas d'effet sur les valeurs de RTC mesurées, ce sont les paramètres de rugosité qui en résultent qui importent le plus.

Les figures 6 et 7 présentent l'évolution de RTC lors de trois cycles de chargement-déchargement pour les deux couples : LP3/saphir et LT/saphir. LT désigne une surface en laiton tournée, sa rugosité est trois fois plus faible que celle de l'échantillon LP3. Cela se traduit par des valeurs de RTC obtenues avec le couple LP3/saphir plus importante que celle obtenues avec le couple LT/saphir. Partant du premier contact entre les surfaces vierges, on obtient d'abord la courbe d'adaptation monotone décroissante présentant des variations importantes dues aux déformations, à la fois élastiques et plastiques, que subissent les aspérités. La courbe de RTC estimée lors du déchargement traduit la diminution des déformations élastiques réversibles. La différence entre les deux courbes charge- décharge du premier cycle, pour chaque couple, exprime le caractère irréversible des déformations plastiques survenues au cours du premier chargement.

Les deux figures montrent qu'au bout de trois cycles les courbes de RTC suivant le chargement et suivant le déchargement deviennent très proches et quasiment confondues. Sur la figure 6, le phénomène d'hystérésis est bien mis en évidence sur les mesures réalisées avec le couple LP3/saphir. Ainsi pour la même pression, la RTC prend deux valeurs différentes suivant que l'on se place sur la courbe correspondant au premier déchargement ou sur la courbe correspondant au deuxième chargement. Ce phénomène n'apparait pas sur les mesures réalisées sur le couple LT/saphir ($R_q=5,7 \mu\text{m}$). Cela confirme les observations de Williamson et Madjumdar [4] qui relèvent que la rugosité est un facteur dominant dans l'évaluation de l'effet d'hystérésis.

Ces résultats conformes à la littérature sur les résistances thermiques de contact sont donc pertinents et confortent la fiabilité du dispositif réalisé.

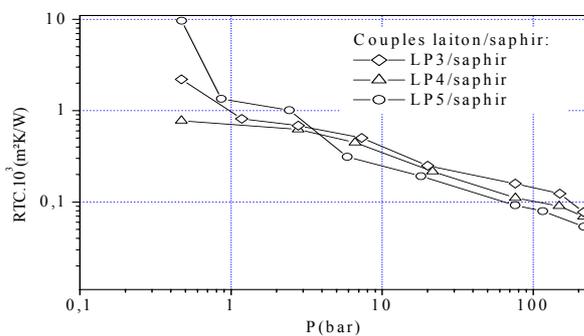


Fig.4 : $RTC_{exp}=f(P)$ avec les éch. LP3, LP4 et LP5

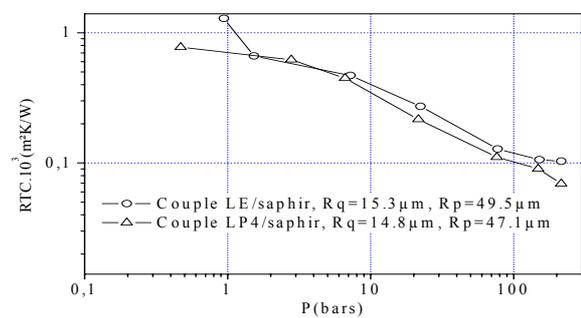


Fig.5 : $RTC_{exp}=f(P)$ avec les éch. LP4 et LT

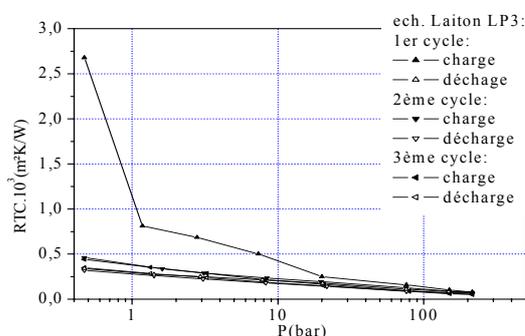


Fig.6: Couple LP3/saphir, trois cycles de charge-décharge

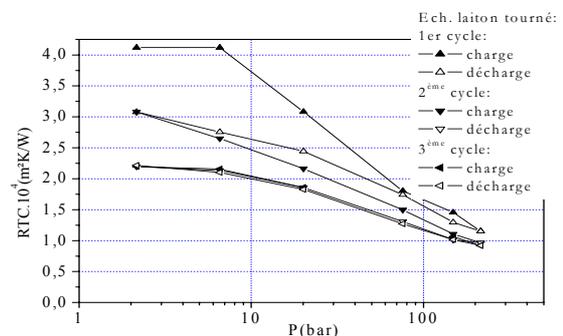


Fig.7: Couple LT/saphir, trois cycles de charge-décharge

3.2. Analyse des résultats de déformation et de l'évolution des paramètres de contact

L'analyse des déformations de surface d'échantillon sous l'effet d'une charge croissante a permis d'établir que les rugosités R_a et R_q restent indifférentes au chargement. Par contre, la distance entre les plans moyens ($d=R_p$) de contact est bien sensible au chargement, comme le montre la figure 8.

L'estimation de S^* est faite de trois façons différentes : à partir de l'essai de dureté, par profilométrie et par imagerie. La confrontation des valeurs de RTC mesurées et estimées à partir des valeurs des paramètres de contact, présentée sur la figure 10, montre que la détermination de S^* par l'essai de dureté est pertinente ; notamment lorsqu'on considère la dureté effective H_c de Yovanovich [5] à la place de la dureté Vickers H_v dans le modèle de Bowden et Tabor [6]. Cependant, bien que précise, cette méthode ne permet pas de prendre en compte la contribution de la rugosité secondaire.

Cette contribution de la rugosité secondaire est, par contre, bien mise en évidence par la profilométrie. En effet, nos observations nous ont permis de déceler un changement de pente sur les courbes d'Abbott des surfaces fortement rugueuses, comme le montrent les figures 9.a et 9.b. L'analyse a montré que ce changement de pente donne, pour les fortes charges, une valeur de portance G proche de celle de S^* . Cela se confirme par la comparaison des courbes de RTC mesurée et estimée en fonction de $S^*=G$ présentée sur la figure 11. Sur les surfaces pyramidales, ce changement de pente correspond à la formation d'un palier rugueux au sommet de la pyramide qu'on peut bien distinguer sur la figure 9b.

Enfin on a tenté d'innover dans le domaine des transferts aux interfaces solide-solide en ayant recours à l'imagerie. Le traitement des images a nécessité le développement d'un programme de traitement d'image sous environnement Matlab. Les premiers essais ont fait apparaître de grosses difficultés, notamment celle du choix des critères de seuillage des couleurs. Puis la recherche d'une pâte de remplissage tendant à rendre opaques les interstices de l'interface, s'est révélée très difficile aussi. Nos premières estimations ont révélé que les critères retenus dans le traitement des images sont pénalisant pour les deux paramètres importants S^* et N . L'estimation de S^* donne des valeurs trop faibles. Elles sont un ordre de grandeur plus faible que celles obtenues à partir de l'essai de dureté ou par profilométrie.

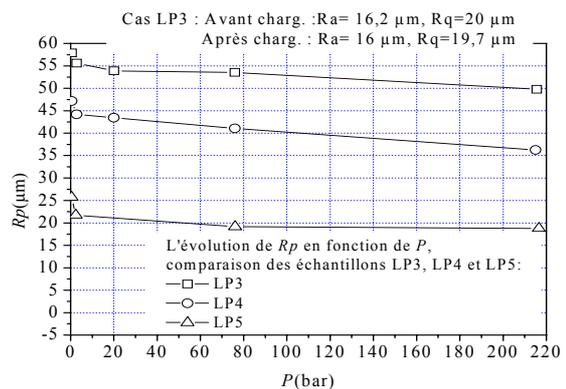


Fig. 8 : Paramètres de rugosité $R_q=f(P)$ et $R_p=f(P)$

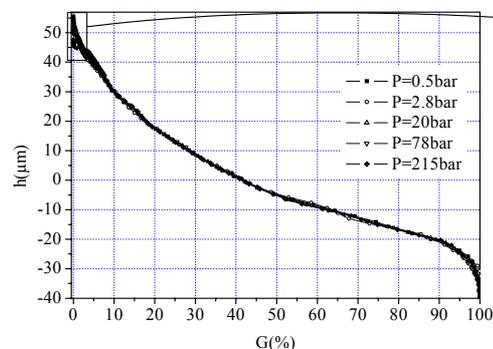


Fig. 9.a : Courbes d'Abbott des surfaces chargées aux différents niveaux de pression

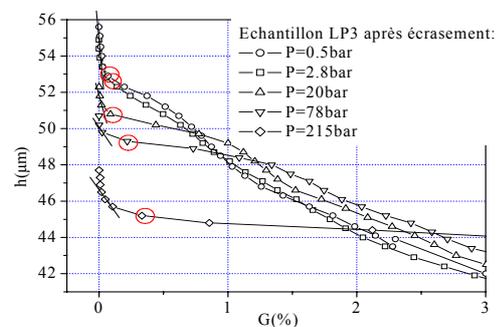


Fig. 9.b : Détail de la figure 9.a ; domaine des faibles valeurs de portance

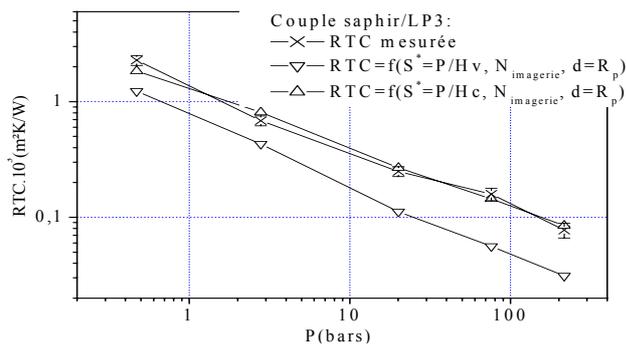


Fig.10 : Valeurs de RTC mesurées et estimées en fonction de $S^*=P/Hc$ et $S^*=P/Hv$

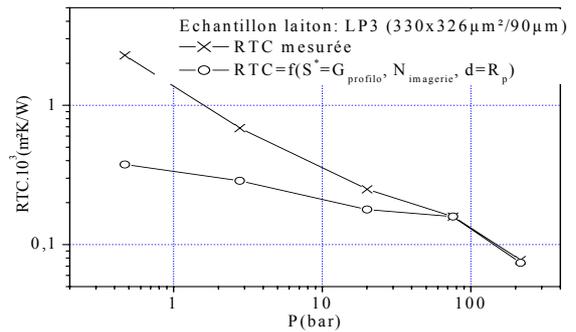


Fig.11: Valeurs de RTC mesurées et estimées en fonction de $S^*=G$ obtenu par la profilométrie

4. Conclusion

Nous avons présenté une approche expérimentale servant à étudier l'évolution des paramètres de contact en vue d'estimer théoriquement les variations de RTC. Elle utilise une interface de type laiton/saphir. La mesure de la micro-dureté combinée au modèle de Yovanovich donne des valeurs de RTC très proches de la mesure mais ne permet pas de distinguer la contribution de la rugosité secondaire. L'analyse profilométrique est basée sur l'analyse des courbes d'Abbott relevées après écrasement. La détection du premier changement de pente donne une valeur de portance pouvant représenter celle du taux réel de contact pour les fortes charges. Enfin, l'analyse macroscopique des images obtenues montre que l'évolution du contact réel se fait, au début du chargement par multiplication des points de contact puis par étalement de la matière au niveau des sommets des aspérités pour les fortes charges. On conclut que l'hypothèse de N égale à la densité de pyramides n'est valable qu'à partir d'une charge égale à 20 bars. La technique de l'imagerie n'est pas tout à fait au point et présente des difficultés notamment dans le choix de la pâte de remplissage l'interface et dans le choix des critères de seuillage des couleurs.

Références

- [1] B. Bensaad, B. Bourouga, Etude de l'évolution de la structure d'interface de contact saphir- laiton, *Proc. 1^{ère} Conf. Int. sur la Conversion et la Maîtrise de l'Energie* (Sousse, Tunisie, 11-13 avril 2008).
- [2] B. Bensaad, Etude exp. de l'évolution et de l'établissement de l'état de surface d'un matériau métallique en contact avec un plan de saphir : application à la modélisation des résistances thermiques de contact, Thèse de doctorat, Ecole Polytech. Univ. de Nantes (14 nov. 2008).
- [3] M. Belghali-Adil. , Etude de l'effet de la distribution des aspérités de surface sur la résistance thermique des contacts métalliques pressés, Thèse de doctorat, Ecole Polytech. Univ. de Nantes (01 dec. 1995).
- [4] M. Williamson, A. Majumdar, Effect of surface deformations on contact conductance, *J. Heat Transfer*, 114 (1992), 802-809.
- [5] M. Yovanovich « Micro and macro hardness measurements, correlations and contact models ». 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 9-12 January 2006, Reno, Nevada.
- [6] F. P. Bowden et D. Tabor « Friction and lubrication of solids ». Part. I, Clarendon Press, Oxford, 1964.