

Détermination pratique des paramètres géométriques d'un contact de type Saphir- Laiton : application dans la modélisation de la RTC

Bensaad Bourassia¹, Bourouga Brahim² et Garnier Bertrand²

¹LMSR, Faculté des sciences de l'Ingénieur, l'université de Djillali Liabes, Sidi Bel Abbes 22000, Algérie.

²Laboratoire de Thermocinétique de l'école polytech. de l'Univ. de Nantes UMR6607, BP 50609, Nantes Cedex 3, France.

Accepté le 28/07/2010

ملخص

نهتم في هذه الدراسة بتغيير بنية سطح تلامس صلب – صلب بين مادة ملساء وغاية في الصلابة (السفير) وأخرى خشنة وسهلة التشوه (الليتون أو الفولاذ) خاضعة لحمولة تدريجية. نحاول شرح هذا التغيير ببيانات مقطعية ومصورات متجانسة عبر الحاجز الشفاف للسفير. الحدود المهمة هي النسبة الحقيقية للتلامس S^* ، كثافة نقاط التلامس N والمسافة الفاصلة للمستويات المتوسطة d . تجري قياس الميكروصلابة للمادة الأكثر رخاوة. الطبوغرافية تسمح أساسا بتقدير S^* و d . S^* تستنتج أيضا من نسبة ضغط التلامس إلى الميكروصلابة. المصورة تسمح بحساب مناطق التلامس وبإظهار، في وقت حقيقي، تغير بنية الحد الفاصل. في هذه المطبوعة، نكتفي بمقارنة القيمة المقاسة للمقاومة الحرارية للتلامس (RTC) على جهاز قمنا بانجازه مع القيمة المقدرة لنموذج مختار.

الكلمات المفتاحية: سطح تلامس؛ المقاومة الحرارية للتلامس؛ النسبة الحقيقية للتلامس؛ كثافة نقاط التلامس؛ رسم مقطعي؛ ميكروصلابة.

Résumé

Dans cette étude, nous nous intéressons à l'évolution de la structure d'une interface de contact solide – solide entre un matériau lisse et infiniment rigide (saphir) et un autre rugueux et déformable (laiton ou acier), soumise à un chargement progressif. On tente de bien déceler cette évolution par des relevés profilométriques et par imagerie à travers la paroi transparente du saphir. Les paramètres intéressants sont le taux réel de contact S^* , la densité de points de contact N et la distance de séparation des plans moyens d . On procède également à la mesure de la micro-dureté du matériau le plus mou. La topographie permet d'estimer essentiellement S^* et d . S^* est également déduit du rapport de la pression de contact par la micro-dureté. L'imagerie permet de comptabiliser les zones de contact et de visualiser en temps réel l'évolution de la structure de l'interface. Dans la présente communication on se limite à comparer la valeur mesurée de la RTC sur un dispositif que l'on a mis au point à celle estimée au moyen d'un modèle choisi.

Mots clés : interface de contact ; résistance thermique de contact ; taux réel de contact ; densité de points de contact ; profilométrie ; micro-dureté.

Abstract

In our study, we are interested in the evolution of the structure of interface of contact between two solids subjected to a progressive load. The first solid is smooth and rigid (sapphire) and the second is a rough and deformable (brass or steel). We try to reveal this evolution by profilometric measures and by imagery through the transparent sapphire. The interesting parameters are the real rate of contact S^* , the density of contact points N and the separation distance d . We also proceed to the measure of the micro-hardness of the softest material. The topography allows to estimate essentially S^* and d . S^* is also deduced from the report of the contact pressure by the micro-hardness. The imagery allows to count the contact zones and to show in real time the evolution of the interface structure. In the present communication we present just the comparison of the measured value of the TCR on a device which we finalized to that estimated by a chosen model.

Keywords: contact interface; thermal contact resistance; the real rate of contact; density of contact points; profilometry; micro-hardness.

Autour correspondant: bourassia@yahoo.fr (Bensaad Bourassia)

1. INTRODUCTION

L'hypothèse de résistance thermique de contact introduit dans la condition thermique de liaison aux interfaces solide-solide un paramètre qui se substitue à la perturbation thermique dans le voisinage immédiat du contact. Cette perturbation est due à l'imperfection des surfaces en contact. Ainsi la RTC caractérise l'aptitude de la zone interfaciale à transmettre la chaleur d'un solide à l'autre et permet d'écrire la condition de frontière à l'interface. Elle a suscité beaucoup d'intérêts aussi bien sur le plan de l'expérience que sur celui de la modélisation. Jusqu'à des dates récentes, les auteurs se sont investis surtout dans l'étude du contact thermique statique. Une façon générale, on distingue ceux ayant pour objet l'aspect mécanique et/ou statistique tendant à décrire la structure de l'interface, de ceux sur le transfert thermique à travers le contact réel et le fluide interstitiel et les phénomènes de micro constriction thermique. Parmi les modèles les plus connus et les plus utilisés nous citons ici quelques uns. Le modèle à aspérités cylindriques équidistantes de Bardon [1, 2] dans lequel les aspects mécaniques et thermiques sont décrits de façon égale. Il a été repris par Belghali [3] pour étudier l'effet de la distribution des aspérités de surface sur la RTC. Il a été également utilisé par Assefraoui [4] et par Bensaad [5] pour tenter de corréler deux valeurs de la RTC estimées simultanément, l'une par voie de mesure thermique l'autre par caractérisation mécanique et géométrique des surfaces en contact. Bensaad l'a utilisé également pour étudier l'effet de la double échelle de rugosité sur la résistance thermique de contact. Le modèle de Bardon a été étendu au contact dynamique de type pièce-outil de forgeage à chaud par Bourouga et alii [6]. Puis, il y a les modèles orientés essentiellement sur l'aspect mécanique tel

que celui de Greenwood et Williamson [7] dans lequel les auteurs font un nombre important d'hypothèses, notamment que les déformations sont soit purement élastiques soit purement plastiques. On retiendra seulement que dans ce dernier modèle et dans le cas élastique, l'aire de contact réel est proportionnelle à la charge. Cette proportionnalité entre le contact réel et la charge sera également mise en avant par le modèle de Bush *et alii* [8]. Le modèle de Whitehouse et Archard [9] reste voisin de celui de Greenwood et Williamson mais diffère de ce dernier par la levée de certaines hypothèses fortes telles que celle du rayon de courbure constant ou encore celle sur le choix d'une distribution gaussienne des hauteurs d'aspérités. Cooper *et alii* [10] montrent à travers une étude théorique et expérimentale que le transfert à l'interface dépend de façon cruciale de la distribution des quelques grands pics de surface et que de ce fait l'hypothèse d'une distribution gaussienne des hauteurs est suspecte. Notons au passage qu'un travail récent sur les effets de la distribution de taille et de la forme des aspérités sur le contact thermique a été proposé par Garnier *et alii* [11]. Mikic [12] propose un modèle de conductance thermique qui envisage séparément les cas suivants : déformation plastique pure, déformation plastique des aspérités et déformation élastique du substrat et déformation élastique pure. Par la suite, partant de l'idée que le passage d'un mode de déformation à un autre ne peut être un 'basculé', Sridar et Yovanovich [13] propose un modèle élasto-plastique qui puise ses origines dans celui de Cooper *et alii*. Enfin on relèvera que Majumdar et Bhushan propose un modèle fractal permettant d'estimer avec une bonne précision le taux réel de contact [14, 15].

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 : N , S^* et d .

Le texte du présent article est organisé en trois sections : la première présente le principe de mesure, la seconde sert à décrire la démarche expérimentale. La troisième est dévolue aux tous premiers résultats expérimentaux obtenus.

2. LE PRINCIPE DE MESURE

L'idée de base est d'estimer les paramètres d'interface qui déterminent la RTC à partir de relevés profilométriques ou d'imagerie. Ces paramètres sont le taux réel de contact, la densité de points de contact et la hauteur du pic le plus haut. On considère le cas favorable d'un contact plan entre un matériau lisse et infiniment rigide (saphir) et un autre, rugueux et déformable (laiton), soumis à un chargement progressif.

On ne s'intéressera ici qu'à des surfaces dont la rugosité est réalisée par usinage sous forme d'un réseau de pyramides dont on a choisi les dimensions. Cela revient à dire que la densité de point de contact N est connue a priori. Mais en raison de l'imperfection de l'usinage, on procède à l'estimation de N , du moins pour les faibles pressions, à partir de traitements d'images de la surface de l'échantillon obtenues par photographie à travers la paroi transparente en saphir. L'interface est alors chargée d'une pâte opaque.

La valeur de la distance de séparation d des plans moyens est déterminée à partir des topographies relevées à chaque palier de charge.

Le taux réel de contact est estimé à partir de ces mêmes relevés

profilométriques par analyse des courbes d'Abbott de la surface de l'échantillon avant et après chargement. Il est également déterminé à partir des mesures de la pression de contact et de la microdureté de l'échantillon. Cette dernière est mesurée pour tout le domaine de valeurs de l'effort appliqué pour tenir compte du phénomène d'écrouissage. A travers la détermination du taux réel de contact S^* , on s'intéresse aussi au déplacement de matière à l'origine de l'accroissement de la surface réelle de contact.

En parallèle, nous procédons à la mesure de la résistance thermique de contact sur un dispositif que nous avons étudié, réalisé et mis au point à cet effet. Les valeurs de RTC mesurées seront comparées systématiquement aux valeurs estimées à partir d'un modèle théorique choisi.

I. 2.1 Modèle de calcul de la RTC

Nous avons choisi le modèle théorique de Bardon pour l'estimation de la RTC. On rappelle que la résistance de contact à l'interface tient compte du passage de la chaleur en parallèle, à la fois par la voie directe solide-solide où le flux doit traverser une résistance de constriction notée R_s et par la voie indirecte à travers l'interstice caractérisée par la résistance de la lame fluide notée R_f . Elle est donc considérée comme la résultante de ces deux résistances en parallèle R_s et R_f telle que :

$$\frac{1}{RTC} = \frac{1}{R_s} + \frac{1}{R_f} \Rightarrow RTC = \frac{R_s \cdot R_f}{R_s + R_f} \quad (1)$$

Pour l'estimation de la résistance R_s , nous avons retenu le modèle simple de Bardon [1] qui considère que tous les points de contact ont la même taille et une répartition uniforme. Ce choix est justifié par la nature des surfaces analysées dans la présente étude.

Pour des aspérités cylindriques

équidistantes la résistance R_s peut prendre la forme simple suivante :

$$R_s = \frac{\sqrt{\pi}}{2\lambda_s \sqrt{N \cdot S^*}} \left(1 - 1,41 \sqrt{S^*} \right) + \frac{2d'}{\lambda_s \cdot S^*} \cdot (1 - S^*) \quad (2)$$

où : $S^* = A_r / A_a$, N est la densité des aires de contact et $d' = \frac{\lambda_1 \cdot d_2 + \lambda_2 \cdot d_1}{\lambda_1 + \lambda_2}$ et

λ_s est la moyenne harmonique des conductivités des deux milieux en contact λ_1 et λ_2 : $\frac{2}{\lambda_s} = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2}$

L'expression de la résistance de la voie fluide est :

$$R_f = \frac{d}{\lambda_f^e} \quad (3)$$

λ_f^e est la conductivité thermique effective du milieu interstitiel, d est la distance de séparation des plans moyens des surfaces en contact.

Les équations 2 et 3 montrent que R_s et R_f dépendent fortement de N , S^* et de d .

2.2 Procédure expérimentale

Avant de monter l'échantillon sur le dispositif de mesure, on procède d'abord à des relevés topographiques au moyen d'un profilomètre optique. Pour chaque mesure, thermique ou mécanique, l'échantillon métallique et le saphir doivent être bien nettoyés. Ensuite, on procède au montage de l'ensemble échantillon– saphir et à la mise en contact pour un bon alignement de l'ensemble. Pour un échantillon donné, on réalise ainsi huit mesures thermiques correspondant à des pressions de contact allant de 0,5 à 216 bars.

Après chaque expérience réalisée à une pression de contact donnée, on fait un relevé profilométrique de la surface. Par la suite, sur le dispositif expérimental, on remplace la boîte froide par la plaque d'observation, on charge l'interface pour

le ramener à la pression de contact et on procède à une prise de vue de l'interface sous charge à travers la paroi de saphir.

Rappelons que pour le matériau constituant les échantillons, on procède également à l'essai de micro-dureté. Ce dernier se présente comme une série de relevés que l'on effectue avec différentes valeurs de l'effort appliqué. Pour chaque valeur d'effort, on réalise sept empreintes et on considère la valeur moyenne pour le tracé de la courbe de micro-dureté.

3. APPROCHE EXPERIMENTALE

Nous présentons dans cette section le dispositif de mesure de la RTC, et la cellule de visualisation qui permet l'observation et la photographie sous microscope.

II. 3.1 Le dispositif de mesure de la RTC

Il est composé de cinq éléments principaux (Fig. 1). Le saphir (1), l'échantillon en laiton ou en acier muni de thermocouples (5), la chaufferette (3), la boîte froide (4) et le système de chargement pneumatique (7).

L'échantillon repose sur la chaufferette électrique constituant la source chaude, montée sur un siège faiblement conducteur (11). La boîte à eau (source froide) est disposée en contact parfait avec le saphir. On enduit les surfaces très lisses du saphir et de la boîte à eau de graisse graphitée pour améliorer le contact thermique. En fait, la boîte à eau vient remplacer la couronne portant la fenêtre de visualisation comme cela est représenté sur la figure 1a. Elle est traversée par un écoulement d'eau régulé thermiquement et sert ainsi à entretenir un gradient de température suivant l'axe de symétrie. L'ensemble saphir – échantillon – chaufferette est monté sur un siège conique (10) porté par une bille en Acier (9). L'effort de charge d'origine pneumatique allié à ce type d'appui

(rotule) sert à éviter les contacts partiels (phénomène d'entrebâillement) à l'interface.

Les échantillons sont de forme cylindrique de hauteur 10mm et de diamètre 8mm. Chacun est équipé de quatre thermocouples de type K soudés au fond de trou radiaux de 0.5mm de diamètre. Les positions des points de mesure se situent dans l'axe de

l'échantillon. Les distances respectives des soudures chaudes jusqu'à l'interface sont respectivement de 1.5, 3.5, 5.5 et 7.5mm. Cet échantillon est en contact imparfait avec une plaque de saphir monocristallin se présentant comme un disque poli de même diamètre (8mm) et d'épaisseur 2mm. Ses deux faces sont polies et présentent une rugosité Ra de l'ordre de 30nm.

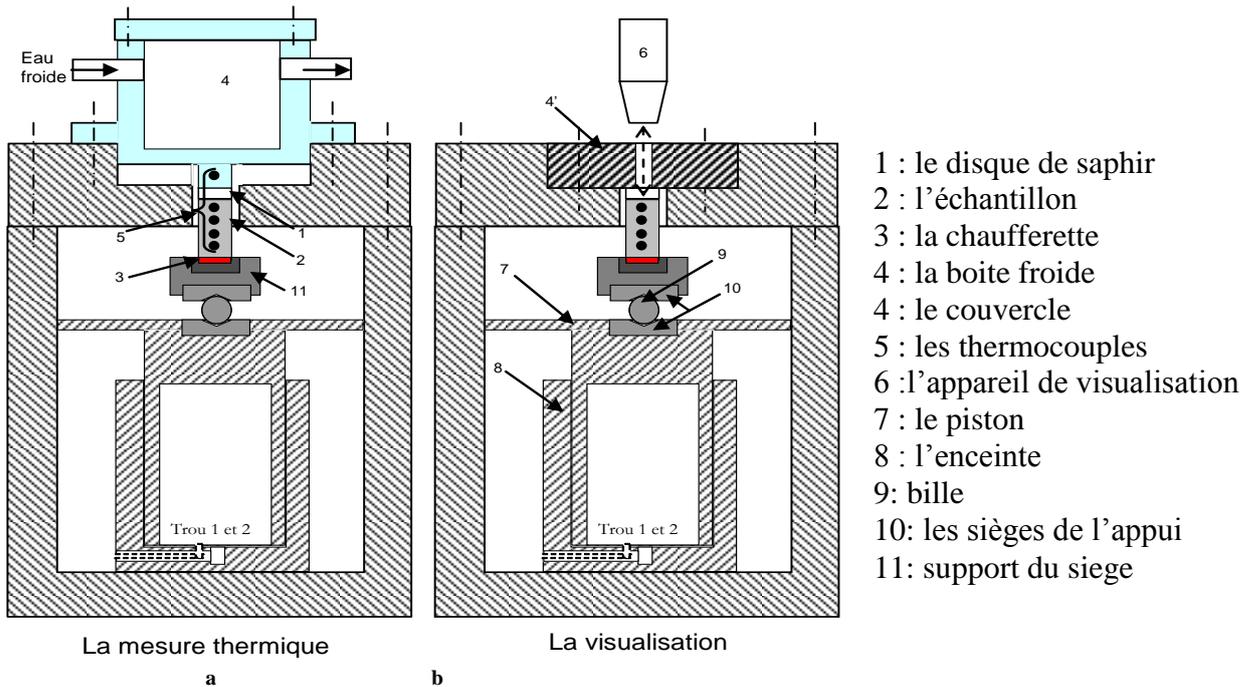


Figure 1. Le schéma de principe du dispositif de mesure

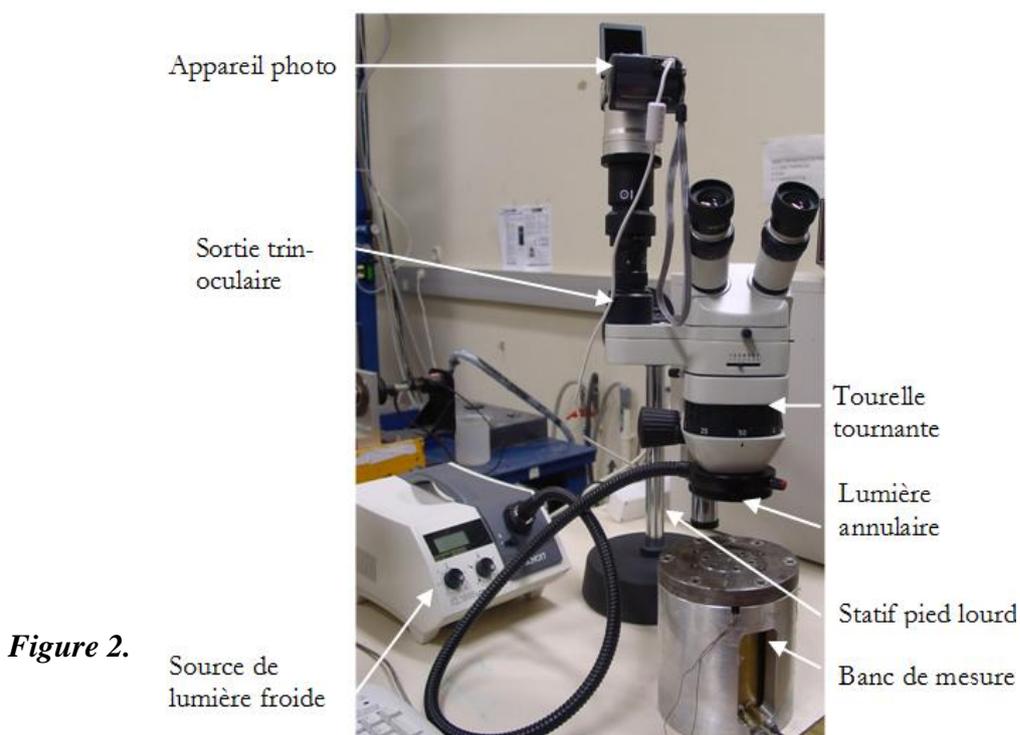


Figure 2.

Sur son autre base, l'échantillon est mis en contact avec une chaufferette électrique de même section pouvant dissiper une puissance de 4 watts. L'ensemble chaufferette - échantillon rugueux - saphir est monté aligné dans un gabarit associé à un système de chargement pneumatique qui transmet la charge à l'échantillon par le biais d'une bille de roulement de telle sorte que les interfaces présentent des contacts uniformes. Le système de chargement pneumatique est conçu et réalisé au laboratoire. Il est constitué essentiellement d'un cylindre de 60mm de haut et 95mm de diamètre intérieur et d'un piston métalliques suffisamment rigides pour supporter la pression de l'air comprimé délivrée par du réseau (environ 6bars). Deux trous sont réalisés sur la paroi du cylindre. Le premier assure l'entrée de l'air comprimé et le second accueille un capteur de pression, de type Kistler XT-190M-7-BAR-G. Il est relié à un conditionneur de type AW180-A10S-FN ayant une sortie analogique 0-10volts en courant continu. Comme le montre la figure 1, le cylindre accueille le piston avec un jeu très faible permettant à ce dernier de se déplacer sans frottement sous l'action de l'air comprimé rentrant par l'ouverture N°1. Les déperditions à travers le jeu sont négligeables devant la pression régnant à l'intérieur de l'enceinte. Le rapport entre la section de l'échantillon et la section circulaire du piston supportant la pression d'air permet de déterminer la pression apparente de contact. Cette dernière est contrôlée grâce au capteur de pression implanté tout en bas de la paroi latérale de l'enceinte. Un régulateur de pression est utilisé pour réguler la pression d'air du secteur afin de la garder constante. En aval, une vanne est placée juste à l'entrée du cylindre. Elle permet de contrôler le débit d'air provenant du réseau. Une bille en Acier transmet l'effort de compression venant du système pneumatique vers l'ensemble saphir-échantillon. Elle permet à

l'échantillon de pivoter librement et être guidé pour venir en contact plan avec le saphir. La bille est positionnée entre deux sièges, le premier est fixé sur le piston et le deuxième loge l'échantillon métallique. Une couronne en acier dur d'une épaisseur de 20mm est montée au-dessus de l'enceinte contenant le système pneumatique. Cette couronne offre la possibilité d'emplacement des différents accessoires nécessaires à la mesure thermique et à la visualisation de l'interface.

Une alimentation stabilisée est reliée à la chaufferette. La mesure du courant permet le réglage du chauffage. Une chaîne d'acquisition est utilisée pour enregistrer les réponses des thermocouples et du capteur de pression.

3.2 La cellule de visualisation (Fig. 1b)

Au moyen d'un mécanisme appelé ici la cellule de visualisation, on charge l'interface saphir-métal jusqu'à la pression de contact choisie pour réaliser la mesure de la RTC. Pour cela, la plaque de saphir est encastrée sur le bâti grâce à une couronne en acier (4' sur Fig. 1b) d'épaisseur 10mm solidaire du couvercle du système de chargement pneumatique. Une fenêtre d'observation de 3mm de diamètre au centre de cette couronne permet l'observation et la photographie de l'interface. La photographie à travers le saphir transparent est faite au moyen d'un appareil photo numérique monté sur un stéréo-microscope K700 qui offre un grossissement allant de 6 à 50X. De haute résolution, l'appareil photo offre un grossissement supplémentaire de 1,25X. Il est monté sur la sortie Trino du stéréo-microscope. L'éclairage annulaire à fibre optique est monté sur l'objectif primaire du stéréo-microscope. Il donne une diffusion uniforme de la lumière au niveau de la surface observée. L'appareil photo est piloté par un PC. Un logiciel de traitement d'image permet par la suite de déterminer le nombre de points de contact.

La figure 2 présente les différentes composantes de la cellule de visualisation.

3.3 Dispositif de profilométrie (Fig. 3)

Avant et après chaque chargement pour la mesure de la RTC, on relève la topographie de la surface de l'échantillon qui est mise en contact avec le saphir. Pour cela, on utilise un profilomètre UBM de type UBC14 à focalisation dynamique. Sa définition est de $0,5\mu\text{m}$ dans le plan de la surface et de 6nm dans la direction normale à la surface.

4. LES PREMIERS RESULTATS

Ils ne concernent que des surfaces dites 'contrôlées'. Nous avons choisi de débiter l'étude sur des surfaces d'échantillon à aspérités pyramidales obtenues par usinage.

4.1 La détermination de S^* et de d par l'analyse topographique

On se propose d'observer le processus de déformation à la surface d'une éprouvette cylindrique en laiton ayant une base présentant une topographie pyramidale. La pyramide élémentaire présente $280\mu\text{m}$ de côté de la base et $60\mu\text{m}$ de hauteur avec des imperfections d'usinage qui différencient les pyramides entre elles. Des relevés topographiques sont réalisés avant et après chaque chargement sur une zone couvrant une douzaine de pyramides. La figure 4 montre un exemple. On suppose que cette zone est représentative de la totalité de la surface. Par la suite, les relevés de chaque pyramide sont considérés individuellement pour un même traitement.

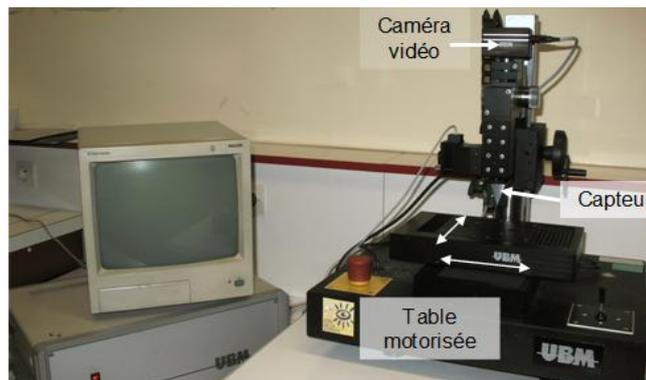


Figure 3. Le profilomètre optique

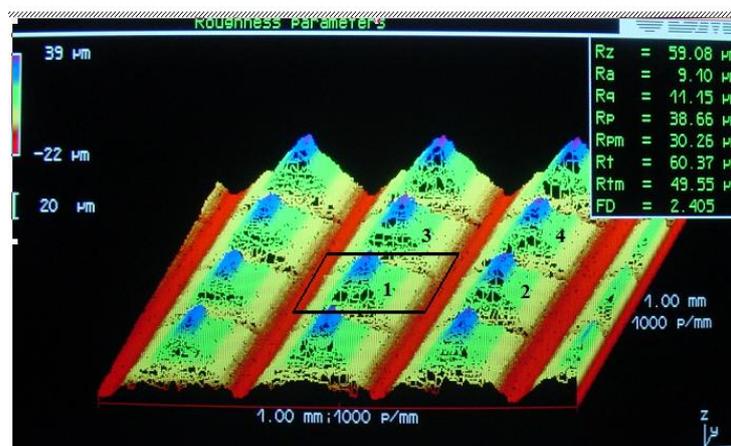


Figure 4. Exemple d'un relevé profilométrique $S=1\text{mm}^2$

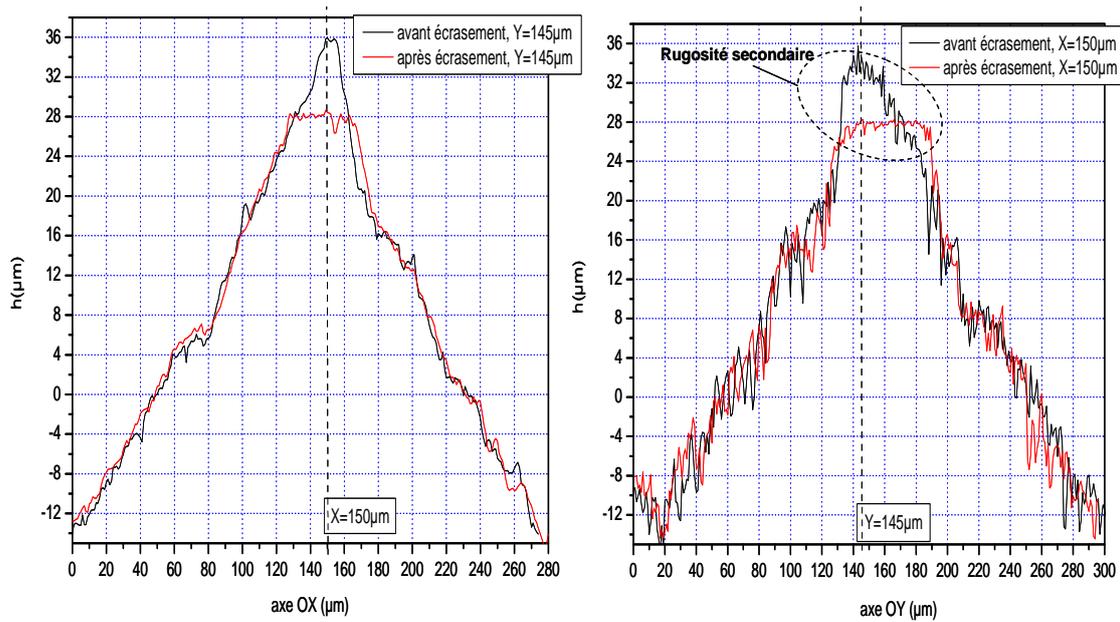


Figure 5. Les profils de la pyramide 4C écrasée à $P=21MPa$: (a) suivant l'axe (OX), (b) suivant l'axe (OY)

4.1.1 Les paramètres de rugosité : « détermination de d »

Sur le tableau 1, on présente l'évolution décroissante des paramètres de rugosité en fonction de la pression de contact de la pyramide numéro 4, lors de l'écrasement par palier. R_a et R_q restent quasi constants, seuls R_p et R_t sont fortement modifiées par le chargement. Au chargement maximum de $P=211bar$, on observe un écrasement égal à $10.1\mu m$ donné par la variation de la rugosité totale R_t . R_p représente la distance d entre le plan moyen de la surface rugueuse et le pic le plus haut. On note que cette distance a décré de $8,5\mu m$.

L'étude comparative des relevés topographiques des pyramides montre, qu'en raison des différences entre les rugosités secondaires, et probablement de celles entre les géométries des sommets, on observe d'une pyramide à une autre que la valeur de R_p présente des variations. Mais ces dernières restent faibles. La valeur de d entre les deux surfaces est prise égale à la valeur moyenne de R_p , déduite de l'observation pour chaque charge. Avant chargement on

trouve $d=36,3\mu m$. L'évolution de d en fonction de la pression de contact est donnée dans la dernière colonne du tableau 1.

Tableau 1. Les paramètres de rugosité de la pyramide 4

P (bars)	R_a (μm)	R_q (μm)	R_p (μm)	R_t (μm)	d (μm)
0	8,79	10,72	37,45	57,38	36,3
2,3	8,72	10,65	36,02	54,22	35,5
83,1	8,71	10,61	33,66	51,76	33,5
211,4	8,65	10,49	28,94	47,31	30

4.1.2 Estimation de S^* à partir des courbes de portance

On peut estimer S^* en utilisant la courbe d'Abbott de trois manières différentes La première qui s'inspire de la technique de superposition de profils proposée par Fenech et Roshenow [16] est proposée par Assafraoui [4]. Elle consiste à supposer que le taux réel de contact corresponde à l'abscisse du point de concours des deux courbes de portance

établies avant et après chargement. La seconde consiste à considérer que le taux réel de contact est approximativement égal à la portance à hauteur de la rugosité totale enregistrée après écrasement. C'est l'hypothèse de la troncature considérée dans certains modèles mécaniques [17]. Ces deux premières méthodes présentent l'inconvénient d'ignorer la seconde échelle de rugosité que l'on peut observer aisément sur les surfaces très rugueuses, comme cela est le cas des surfaces pyramidales. Cela est illustré par l'exemple sur la figure 5 qui représentent les profils suivant les deux axes perpendiculaires de la base d'une pyramide. On relève bien une rugosité secondaire caractérisée par une valeur de R_t de l'ordre de $2\mu\text{m}$.

Une troisième méthode qui peut être alternative, consiste à analyser finement le relevé topographique de la surface après écrasement. Dans un premier temps, celle-ci est applicable aux surfaces à aspérités pyramidales seulement. Le champ d'observation du profilomètre est alors limité au sommet écrasé, pour s'intéresser particulièrement à la seconde échelle de rugosité. On relève la topographie avec une finesse permettant de distinguer la variation du taux de portance entre deux valeurs que l'on notera G_{min} et G_{max} . Cette observation est faite sur toute la population de la douzaine de pyramides supposée représenter l'intégralité de la surface étudiée. À chaque pression, on estime que la valeur moyenne de S^* est comprise dans l'intervalle moyen [G_{min} , G_{max}] sans plus de précision. Sur la figure 6, on donne un exemple d'analyse de courbes de portance de la pyramide 4 de la figure 4. On y représente trois courbes. La première en triangle plein représente la portance avant chargement. Les deux courbes, en carrés et en cercles pleins, donnent portance de la pyramide après un chargement de $P=211\text{bars}$. La courbe en cercles pleins bénéficie d'une résolution verticale améliorée. Cela a permis de détecter clairement la présence de la

rugosité secondaire. Sur cette courbe, les trois premiers points représentent la portance liée à cette rugosité secondaire. Le premier point est défini comme G_{min} , valeur minimale de la portance après chargement sûrement inférieure à la valeur minimale de la surface réelle de contact S_{min} . La variation de pente observée après le troisième point traduit sans aucun doute la limite de la rugosité secondaire. Cela a été observé systématiquement sur les relevés des douze pyramides couvrant la section observée. On pourrait interpréter cela par une densité de creux de plus en plus faible menant à la valeur de la portance du palier correspondant à une hauteur d'un peu moins de $28\mu\text{m}$. Cette valeur de portance est maximale et dépasse sûrement la valeur maximale du taux réel de contact. S^* présente une valeur supérieure à celle de G_{min} et inférieure à celle de G_{max} . L'analyse des courbes d'Abbott enregistrées avant et après chaque chargement, permet de déterminer la valeur moyenne de S^* sur la surface d'observation. Connaissant les valeurs de N , d et S^* , on peut alors estimer la RTC au moyen du modèle théorique simple de Bardon [4].

4.1.3 Discussion des résultats de la topographie (Fig. 7)

En comparant les résultats de mesure de la RTC aux valeurs théoriques données par le modèle retenu, on a pu constater que la détermination de S^* à partir du point d'intersection des deux courbes d'Abbott avant et après chargement ou à partir de l'hypothèse de troncature (fondée sur la différence des valeurs de rugosité totale avant et après chargement) tend à le surestimer. Ces deux techniques ignorent la rugosité secondaire. Cela explique la grande différence entre la mesure de RTC et son estimation en fonction de S^* obtenu par ces deux techniques. Ces dernières ne prennent en compte que la première échelle de rugosité, c'est celle de la taille de la pyramide. L'examen du détail de la

courbe de portance des régions hautes de la rugosité après écrasement a mis en évidence la présence d'une seconde échelle de rugosité aux sommets des pyramides qui ne peut être négligée. On détermine ainsi un intervalle de valeurs du taux de portance borné par les limites de cette échelle de rugosité. On constate que, à chaque pression, la valeur mesurée de la RTC reste comprise entre les deux valeurs de RTC estimées en fonction de ces deux valeurs limites de S^* .

4.2 Estimation de S^* par caractérisation mécanique

On considère que la pression apparente de contact est égale à la micro-dureté au niveau du sommet de l'aspérité. S^* est estimé par le modèle de Bowden et Tabor [18, 19] en utilisant la dureté Brinell H_B issue d'un essai mécanique classique. Ensuite en vue d'explorer l'effet du phénomène d'érouissage sur le contact réel, S^* est estimé en fonction de la micro-dureté effective H_c obtenue par le modèle de Yovanovich [20]. H_c vient remplacer H_B dans le modèle de Tabor tel que: $S^* = A_r / A_a = P / H_c$

L'essai de dureté Vickers de la figure 8 sur du laiton montre qu'à partir d'une charge égale à 100g, la dureté reste

constante (1,265GPa) est égale à H_B . Elle permet, ainsi que les pentes des sommets des 12 pyramides et la pression de contact, d'estimer la micro-dureté effective du matériau H_c au niveau des spots de contact. H_c se déduit par l'expression [6]:

$$\frac{P}{H_c} = \left(\frac{P}{1,62 \cdot c_1 \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma_0 \cdot m} \right)^{c_2}} \right)^{\frac{1}{(1+0,071 \cdot c_2)}}$$

Cette relation met en évidence le degré de dépendance du rapport P/H_c aux paramètres $\sigma/m, c_1, c_2$ et P .

$\sigma_0 = 1\mu m$ et c_1 et c_2 sont déterminés par l'expérience. Pour des matériaux dont H_B est de l'ordre de 1,3 à 7,6GPa, c_1 et c_2 s'écrivent :

$$\begin{cases} \frac{c_1}{H_{BGM}} = 4,0 - 5,77 \cdot Z + 4,0 \cdot Z^2 - 0,61 \cdot Z^3 \\ c_2 = -0,570 + \frac{Z}{1,22} - \frac{Z^2}{2,42} + \frac{Z^3}{16,58} \\ Z = \frac{H_B}{H_{BGM}} \end{cases}$$

La figure 7 compare le résultat de calcul utilisant H_B et H_c . La pente moyenne des 12 pyramides est de 0,54.

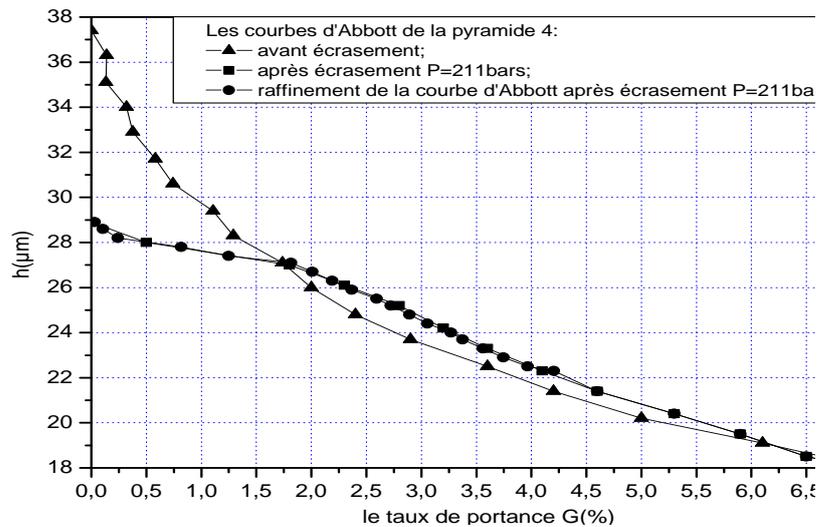


Figure 6. Courbes d'Abbott de la partie haute de la pyramide 4 avant et après écrasement à P=211bars

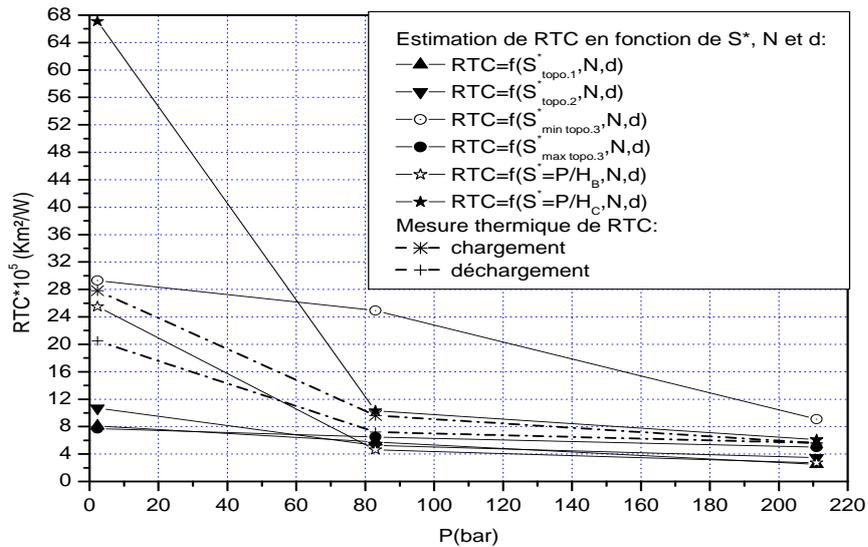


Figure 7. La comparaison de RTC mesurée et RTC estimée en fonction de S*, N et d

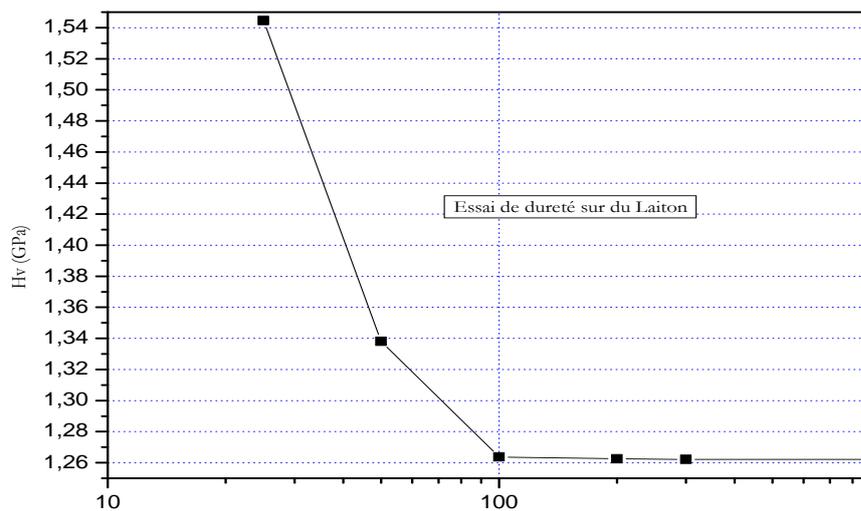


Figure 8. Essai de micro-dureté Vickers, laiton

4.2.1 Discussion des résultats de la caractérisation mécanique (Fig. 8)

A faibles pressions (2,3 bar), l'estimation de la RTC en fonction de H_B et H_c donne respectivement un écart relatif de 8% et 140% de celle estimée par la mesure thermique. A hautes pressions (83 bar et 211 bar) On constate que l'utilisation de la dureté Brinell surestime le taux réel de contact, et donne ainsi une valeur de RTC beaucoup plus faible que celle estimée par la mesure thermique

(écart relatif de plus de 45%). Tandis que les valeurs de S^* estimées en fonction de H_c , que ça soit avec le modèle de Tabor, sont bien contenu dans l'intervalle $[G_{min}, G_{max}]$. Dans ce cas la RTC est estimée avec un écart relatif de 8% de la RTC obtenue par la mesure thermique.

4.3 La mise au point d'une technique pour la détermination de N et S* par l'imagerie

Au cours du chargement, l'interface saphir –métal est photographiée. Le traitement de l'image permet de compter

les spots de contact et estimer l'aire réelle de contact. Sur la figure 9, on présente l'évolution d'une interface pyramidale saphir-laiton au cours de chargements à $P= 0.5, 3, 20, 80$ et 211 bars. Bien que l'usinage a été soigneusement réalisé, la densité de point de contact n'atteint sa

valeur maximale qu'à $P = 83$ bars. Cette technique est donc prometteuse. La densité de points de contact déterminée par cette technique est utilisée dans l'estimation de la résistance thermique de contact.

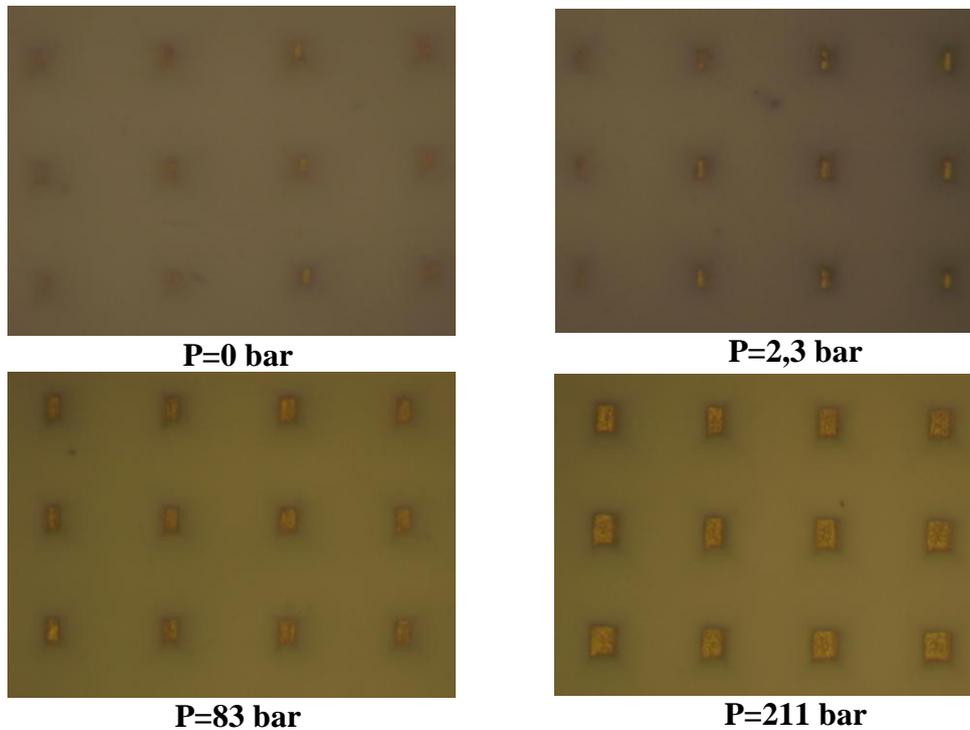


Figure 9. L'évolution de l'interface saphir-laiton sous chargement progressif

5. 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 particulière entre un matériau très dur, lisse et transparent comme le saphir de synthèse et le laiton ou l'aluminium. De plus la surface de l'échantillon est pyramidale pour mieux maîtriser la densité de point de contact.

L'analyse profilométrique montre l'estimation du taux réel de contact, basée sur la comparaison des courbes d'Abbott. Cette technique surestime S^* . Elle ne prend pas en compte la deuxième échelle de rugosité au niveau des sommets des

aspérités. En revanche, l'analyse de la courbe d'Abbott après chargement et notamment la détection du premier changement de pente donne une valeur de portance qui correspond au taux réel de contact.

La mesure de la micro-dureté combinée au modèle de Yovanovich donne des valeurs de RTC très proche de la mesure.

Enfin, la détermination de N et S^* par l'imagerie donne des résultats intéressants notamment pour des chargements assez importants.

6. NOMENCLATURE

A_a | La surface apparente de contact

	(m ²)
A_r	La surface réelle de contact (-)
c_1 et c_2	Coefficients de la micro-dureté (-)
d	La distance de séparation entre les deux plans moyens des surfaces en contact (μm)
H_B	Dureté Brinell (GPa)
H_{BGM}	La moyenne géométrique des valeurs minimale et maximale de H_B lors d'un essai (GPa).
H_c	Dureté effective (GPa)
m	La pente du sommet de l'aspérité (-)
N	Densité de points de contact (m ⁻¹)
P	La pression de contact (Mpa ou bar)
R_a	La rugosité moy. arithmétique (μm)
R_p	La hauteur du pic le plus haut par rapport au plan moy. de la surface (μm)
$R_q = \sigma$	La rugosité moy. quadratique (μm)
R_t	La rugosité totale (μm)
RTC	La résistance thermique de contact (m ² K/W)
S^*	Taux réel de contact (%)

Références

- [1] J.P. Bardon, *Contribution à l'étude du transfert de chaleur au contact de deux matériaux*, Thèse de doctorat d'état, université de Poitiers, 1965.
- [2] J.P. Bardon, *Introduction à l'étude des résistances thermiques de contact*, R.G.T. Vol. 125, 1972.
- [3] M. Belghali, «*Etude de l'effet de la distribution des aspérités de surface sur la résistance thermique de contact métalliques pressés*», Thèse de doctorat, université de Nantes, 1995.
- [4] A. Assefraoui, *Etude optique, mécanique et thermique simultanée et sous pression d'écrasement, de la résistance thermique et des microdéformations (densité et aire des points de contact) d'une interface Aluminium- Saphir. Comparaison avec un modèle prédictif*, Thèse de doctorat, université de Nantes, 1999.
- [5] B. Bensaad, *Etude expérimentale 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 Polytechnique de l'université de Nantes, 2008.
- [6] B. Bourouga, V. Goizet et J.P. Bardon, *Modèle prédictif de résistance thermique de contact dynamique adapté au cas de l'interface pièce-outil de forgeage*, Int. J. of Heat & Mass Transfer, Vol. 46, Issue 3, 2002, p.565-576.
- [7] J.A. Greenwood et J.B.P. Williamson, *Contact of nominally flat surfaces*, Proc. R. Soc., London, Vol. 295, 1966, p.300-319.
- [8] A.W. Bush, R.D. Gibson et T.R. Thomas, *The elastic contact of a rough surface*, Wear, Vol. 35, Issue 1, 1975, p.87-111.
- [9] J.F. Archard et R.A. Onions, *The properties of random surfaces of significance in their contact*, Proc. Roy. Soc. Lond., Vol. A. 316, 1970, p.97-121.
- [10] M.G. Cooper, B.B. Mikic et M.M. Yovanovich, *thermal contact conductance*, Heat Mass Transfer, Vol. 12, 1969, p.279-300.
- [11] B. Garnier, D. Pierrat et F. Danes, *Distribution de taille et de forme des aspérités : effets sur le contact thermique*,

la revue de métallurgie-CIT/ Science et Génie des Matériaux, 2000.

[12] B.B. Mikic, *Thermal contact conductance; theoretical considerations*, Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 17, Issue 2, 1974, p.205-214.

[13] M.R. Sridhar, M. Yovanovich, *Elasto-plastic contact conductance model for isotropic conforming rough surfaces and comparison with experiments*, J. of Heat Transfer, Vol. 118, 1996, p.3-9.

[14] A. Majumdar et B. Bhushan, *Fractal model of elastic –plastic contact between rough surfaces*, Journal of tribology, Vol. 113, 1991, p.1-11.

[15] B. Bhushan, A. Majumdar, *Elastic-plastic contact model for bi-fractal surfaces*, Wear, Vol. 153, Issue 1, 1992, p. 53-64.

[16] H. Fenech et W. Rohsenow, *Thermal contact conductance of metallic surfaces in contact*. Massachus Institute of technology, 1959.

[17] T. Hisakado et T. Tsukizoe, *Effects of distribution of slopes and flow pressures of contact asperities on contact between solid surfaces*, Wear, Vol. 30, 1974, p.213-227.

[18] D. Tabor, *The hardness of materials*, Oxford, Clarendon Press, 1951.

[19] F.P. Bowden et D.Tabor, *Friction and lubrication of solids*, Part. I, Clarendon Press, Oxford, 1964.

[20] M. Yovanovich, *Micro and macro hardness measurements, correlations and contact models*, 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, 2006, p.9-12.