

## COMPORTEMENT TRIBOLOGIQUE DU CONTACT SEC $Ti_3SiC_2/Al_2O_3$

Seif-Eddine BENDAOU(1), Mokhtar BOUNAZEF(2), Ali DJEFFEL(3)

(1) Centre Universitaire Ahmed ZABANA de RELIZANE  
Email : bendaoudi.seif@gmail.com

(2) Université Djillali LIABES de SIDI BEL ABBES  
bounazef@yahoo.com

(3) Université Abdelhamid IBN BADIS de MOSTAGANEM  
djeffalal@yahoo.fr

### Résumé :

La caractérisation tribologique des céramiques, est complexe. Elle dépend, comme pour la majorité des matériaux, de leurs compositions, des conditions de frottement et de l'environnement. L'objectif de ce travail porte sur l'étude du comportement en frottement à sec du  $Ti_3SiC_2$  contenant 8% de TiC. Pour cela, la modélisation du comportement de ce matériau, par la méthode des plans d'expériences, est adéquate. Les essais expérimentaux ont été effectués sur un tribomètre, en utilisant comme objet frottant sur le matériau étudié une tige semi-sphérique de corindon à bout chanfreiné sur son pourtour pour éviter tout coincement pouvant fausser le résultat pendant la rotation de l'éprouvette. A température ambiante de 20 °C et au taux d'humidité relatif de 20%, le matériau présente un coefficient de frottement variant entre 0,1 et 0,53 à plusieurs niveaux de vitesse de glissement dont la valeur se situe entre 5m/s et 60 m/s et sous une pression croissante appliquée sur la tige de 0,1 à 0,8 MPa.

L'exploitation des résultats du modèle obtenu par la méthode des plans d'expériences, expliquent le comportement tribologique de ce matériau par des courbes et des graphes qui nous montrent les différents cas de son utilisation en industrie.

Mots clés : Coefficient de frottement, Pin-on-disk, Plans d'expériences,  $Ti_3SiC_2$

### 1. Introduction :

Le  $Ti_3SiC_2$  est parmi les matériaux céramiques constituant une nouvelle classe de matériaux nano-lamellaires, avec des propriétés intermédiaires entre celles des métaux et celles des céramiques [1]. Pour les propriétés thermiques, mécaniques, chimiques et électriques, ils ont de nombreux points communs avec les carbures ou nitrures correspondants: un module de Young élevé et une bonne conductivité électrique et thermique. Cependant, mécaniquement, ils sont extrêmement différents: ils sont usinables, ont des valeurs de dureté plus faibles, résistent aux chocs thermiques et ont une étonnante résistance à la présence de défauts. La combinaison particulière de ces propriétés, est l'expression de la combinaison de deux types de liaisons dans leur structure: une majorité de liaisons métalliques fortes au sein de chaque feuillet de la structure nano-lamellaire, et de liaisons relativement faibles entre ces feuillets. Les études disponibles à l'heure actuelle sur le  $Ti_3SiC_2$ , précurseurs par les travaux de Barsoum et son équipe, expliquent certains comportements et prédéterminent des valeurs expérimentales, sans toutefois étudier l'influence des paramètres extérieurs sur elles. De nombreuses observations ont été rapportées par différents auteurs sur le comportement tribologique et essentiellement le frottement à sec, du  $Ti_3SiC_2$ , bien que de nombreuses questions subsistent sur les différentes facettes de son comportement.

La présente étude, porte sur le coefficient de frottement de  $Ti_3SiC_2$  pur et l'influence de TiC sur son comportement en friction. Elle est également une occasion pour présenter la modélisation d'un comportement par la méthode des plans d'expériences, qui nous permet de trouver un modèle mathématique comportemental et de prédire d'autres valeurs intermédiaires du coefficient de frottement de ce matériau. Les résultats obtenus sont alors analysés et synthétisés pour

comprendre le comportement de ce matériau et prédire par conséquent les paramètres optimaux de travail.

## 2. Essais expérimentaux :

Les échantillons de  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$  contenant de  $\text{TiC}$  ont été fabriqués par la méthode de thermo-pression, décrite en détail dans la référence [2]. Le matériau a été obtenu à partir d'un mélange des poudres élémentaires : titane, silicium, et carbone, avec des quantités massiques de :  $\text{Ti}:3$ ,  $\text{Si}:1$ ,  $\text{C}:2$  et d'autres éléments, comme accélérateurs réactifs, en faibles quantités ( $<0,1$ ). La présence des impuretés de  $\text{TiC}$  dans l'échantillon a été estimée à 8% en volume. La mesure surfacique de  $\text{TiC}$  s'est faite à l'aide du logiciel "Scion-Image" sur une micrographie obtenue à partir d'un échantillon éclairé avec une lampe à rayons ultra violets qui permettent de mettre en évidence cet élément. Une moyenne du pourcentage est calculée après plusieurs mesures surfaciques de sections différentes du même échantillon.

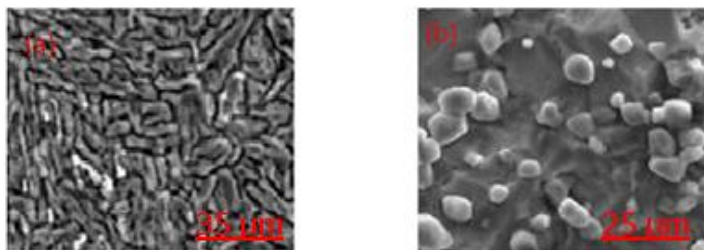


Figure 1 : Micrographies de microstructures de :  
(a)  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$  pure et (b)  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$  avec impuretés  $\text{TiC}$ .

Les micrographies de la figure 1 représentent deux images de microstructures du polycristallin  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$ . La figure 1-a est une micrographie montrant le  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$  à l'état pur sur laquelle on ne remarque aucune présence de  $\text{TiC}$  ; les grains sont relativement uniformes, de forme lenticulaire plate et leur taille moyenne varie entre 20 et 25  $\mu\text{m}$  dans la direction du grand axe (direction allongée). La figure 1-b est une micrographie prise au microscope électronique (MEB) en présence d'un flux lumineux ultra-violet sur laquelle on constate la présence des impuretés de  $\text{TiC}$ . Il se compose de grains dominants de  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$  qui ont aussi une forme lenticulaire plate, et des grains de  $\text{TiC}$ , de forme polygonale et dont la taille moyenne se situe entre 4  $\mu\text{m}$  et 6  $\mu\text{m}$ . Le  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$ - $\text{TiC}$  s'obtient avec un rajout d'une quantité infime de trioxyde de Béryllium à la poudre [3]. L'étude du comportement tribologique du  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$  avec ou sans  $\text{TiC}$ , a été faite par l'exposition des échantillons, sous forme de blocs circulaires, aux essais de frottement sur un tribomètre piloté par ordinateur (Fig. 2). Le frottement s'effectue contre une tige en corindon de diamètre  $d=5$  mm, sur laquelle on applique une pression qui varie entre 0,1 et 0,8 MPa, à des vitesses de glissement variant entre 5 - 60 m/s. Les essais ont été réalisés à température ambiante de 20°C et une humidité relative de 20 %. Un cycle continu de frottement d'une distance de glissement jusqu'au 10000 m, en contact sans lubrifiant, car il n'y a aucun changement notable au-delà de cette valeur. Le coefficient de frottement a été mesuré pour chaque condition d'essai donnée, et associé à une modélisation du comportement du  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$  par la méthode citée auparavant afin de comprendre sa tenue lors du frottement ainsi que les mécanismes qui expliquent cela.



### 3. Mise en équation et modélisation :

Afin de connaître l'influence des paramètres agissant sur le comportement tribologique du matériau Ti3SiC2, essentiellement sur le coefficient de frottement, la modélisation par la méthode des plans d'expériences, est adéquate. Elle permet de prédire les valeurs de  $f$  sans avoir recours à des expériences supplémentaires autres que celles effectuées dans le domaine expérimental [4].

Nous avons à notre portée 32 expériences effectuées sans un plan prédéfini dans lesquelles le paramètre vitesse de glissement prend les valeurs 5, 20, 40, 60 m/s ainsi que le paramètre pression appliquée par la tige sur la surface de contact et qui vari entre 0,1 - 0,8 MPa avec un pas de 0,1 MPa à chaque changement. La combinaison entre les 2 paramètres pour former le tableau d'expériences, est établie d'une façon aléatoire.

#### 3.1 Calcul des coefficients du modèle

La modélisation se fait par un polynôme du second degré Eq. 1, qui dérive du développement de la fonction en série de Taylor, dans lequel, chaque effet d'un paramètre est représenté par la variable  $x_i$  rattachée à un coefficient  $a_i$ . D'autres coefficients  $a_{ij}$  sont liés à l'interaction des effets  $x_i$  et  $x_j$ . La forme générale du modèle polynomial est donnée par Eq. 2 et Eq.3 (forme développée du modèle polynomial) [6].

$$[Y_{\text{calculé}}] = [X] \cdot [\text{Coefficient}] \quad (\text{Eq. 1})$$

$$y_i = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i x_i + \sum_{i=1}^k a_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k a_{ij} x_i x_j \quad (\text{Eq. 2})$$

$$y_i = a_0 + a_1 x_{i,1} + a_2 x_{i,2} + a_{12} x_{i,1} x_{i,2} + a_{11} x_{i,1}^2 + a_{22} x_{i,2}^2 + e_i \quad (\text{Eq. 3})$$

Avec :  $x_{i,1}$  : représente la  $i^{\text{ème}}$  valeur du facteur (1).  $x_{i,2}$  : Représente la  $i^{\text{ème}}$  valeur du facteur (2).

$y_i$  : Représente la  $i^{\text{ème}}$  valeur de la réponse.  $e_i$  : Représente l'écart entre la valeur mesurée et la valeur évaluée par le modèle mathématique pour l'expérience  $i$ .

En utilisant MATLAB pour le traitement des équations, dont le nombre est égal a celui des expériences, soit 32 équations, on obtient les coefficients à partir de l'Eq. 4 :

$$a = ({}^tXX)^{-1} \cdot {}^tX \cdot y \quad (\text{Eq. 4})$$

Où :  $a$  : coefficient relatif au paramètre  $X$ . ( ${}^tX$ ) : transposée de la matrice  $X$ . ( ${}^tXX$ )-1 : matrice inverse de la matrice ( ${}^tXX$ ).  $y$  : réponse mesurée expérimentalement, (coefficient de frottement).

Les valeurs des 6 coefficients sont reportées dans le tableau 1.

| Coefficients | $a_0$   | $a_1$    | $a_2$     | $a_{12}$ | $a_{11}$ | $a_{22}$   |
|--------------|---------|----------|-----------|----------|----------|------------|
| Valeurs      | 0,21315 | -0,13918 | 0,0348933 | 0,01782  | 0,140659 | -0,0226041 |

Tableau 1 : Valeurs des coefficients relatifs aux paramètres

#### 3.2 Modélisation mathématique

Après avoir estimé les coefficients, le modèle mathématique prend la forme suivante :

$$y = 0,21315 - 0,13918x_1 + 0,0348933x_2 + 0,140659x_{12} - 0,0226041x_{22} + 0,01782x_1x_2 \quad (\text{Eq. 5})$$

L'analyse préliminaire de l'Eq. 5: on constate que l'interaction vitesse-pression agit remarquablement par rapport aux même paramètres pris isolément et que l'influence de la vitesse de glissement est plus grande que celle de la pression appliquée.

#### 3.3 Qualité du modèle

##### 3.3.1 Qualité descriptive du modèle

Elle représente le degré de rapprochement entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées. Elle est estimée par l'Eq. 6 et doit vérifier l'Eq. 7 [8-9].

$$R^2 = 1 - \frac{SCER}{STCE} \quad (\text{Eq. 6})$$

$$0 \leq R^2 \leq 1 \quad (\text{Eq. 7})$$

Avec : *SCER* : Somme des Carrés des Ecart des Résidus. *STCE* : Somme Totale des Carrés des Ecart. Le coefficient descriptif du modèle est de 0,950, il est estimé très bon puisqu'il est proche de 1.

### 3.3.2. Qualité descriptive du modèle

Elle permet de juger la faculté du modèle polynomial de prédire des réponses sans toutefois effectuer des essais autres que ceux déjà faits. Son coefficient est calculé par :

$$Q^2 = 1 - \frac{PRESS}{SCT} \quad (\text{Eq. 8})$$

Avec : *PRESS* : Somme des Carrés des Erreurs de Prédiction. *SCT* : Somme des Carrés des écarts entre les essais et leur moyenne. Le coefficient  $Q^2$  varie entre  $(-\infty)$  et  $(+1)$ , cependant, le modèle est estimé prédictif quand la valeur du coefficient est proche de 1. C'est justement le cas pour notre modèle dont  $Q^2=0,916$ . Le modèle mathématique obtenu est de très bonne qualité. Fig. 3 illustre les résultats mentionnés ci-avant.

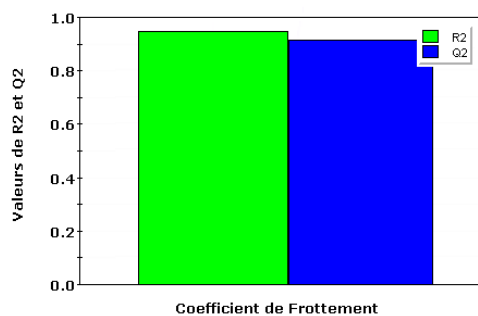


Figure 3 : Qualités descriptive et prédictive du modèle.

## 4. Analyse graphique des résultats

Dans cette partie, nous allons exposer une série de courbes, basée sur la théorie des plans d'expériences, interprétant le comportement du  $Ti_3SiC_2$  en friction sous l'effet des paramètres extérieurs.

### 4.1 Influence de la vitesse de glissement

La figure 4 illustre la variation du coefficient de frottement en fonction de la vitesse de glissement, et sous une pression constante en trois niveaux différents : (a) minimale de 0,1 MPa, (b) intermédiaire de 0,45 MPa, et (c) maximale de 0,8 MPa. Il en ressort qu'à travers ces 3 courbes, que quelque soit la valeur de la pression appliquée, le coefficient de frottement  $f$  diminue sensiblement avec l'augmentation de la vitesse de glissement sur une bonne partie de la courbe. Elles atteignent leur minimum tout de même pour qu'ensuite ces courbes accroissent; le coefficient de frottement augmente sur le reste des graphes. Les coefficients de frottement minimaux sont de  $f=0,117$  lorsque la vitesse de glissement est de 45,8 m/s pour une pression minimale de 0,1 MPa, de  $f=0,183$  lorsque  $V_{glis}=43,9$  m/s pour une pression moyenne de 0,45 MPa et de  $f=0,202$  lorsque  $V_{glis}=41,7$  m/s pour pression maximale de 0,8 MPa. Nous remarquons donc, qu'à une vitesse suffisamment grande ( $>40$  m/s) du domaine expérimental, le coefficient de frottement cesse de baisser, reste constant pendant une légère augmentation de vitesse puis augmente.

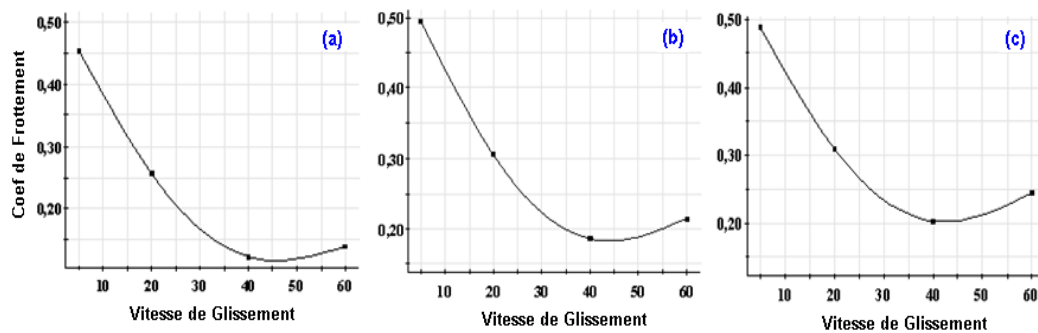


Figure 4 : Influence de la vitesse de glissement sous la pression :  
(a) minimale, (b) moyenne, et (c) maximale.

Un phénomène de stabilisation qui se passe pour les différents niveaux de pression, mais avec des valeurs correspondantes différentes. Pendant la phase d'augmentation, le coefficient de frottement atteint seulement les valeurs de 0,14 pour la basse pression, de 0,215 pour la pression moyenne et de 0,245 pour la pression de 0,8 MPa. Il reste donc relativement bas par rapport aux valeurs enregistrées pour les faibles vitesses.

#### 4.2 Influence de la pression appliquée

Le coefficient de frottement apparaît moins sensible à la pression appliquée par rapport à la vitesse de glissement. Dans cette série de graphes (Fig. 5a-b-c), les pentes des courbes sont moins raides; c'est ce qui explique que la variation du coefficient est lente avec le changement de la pression. Elles représentent la variation du coefficient de frottement en fonction de la pression, tracées à des niveaux de vitesses de glissement différents (5 m/s, 32,5 m/s et 60 m/s). On remarque que pour une vitesse minimale de glissement de 5 m/s (Fig.5a), le coefficient de frottement varie de 0,452 à 0,486 avec l'augmentation de la pression de 0,1 à 0,8 MPa en passant par un maximum de 0,497 pour une pression de 0,572 MPa.

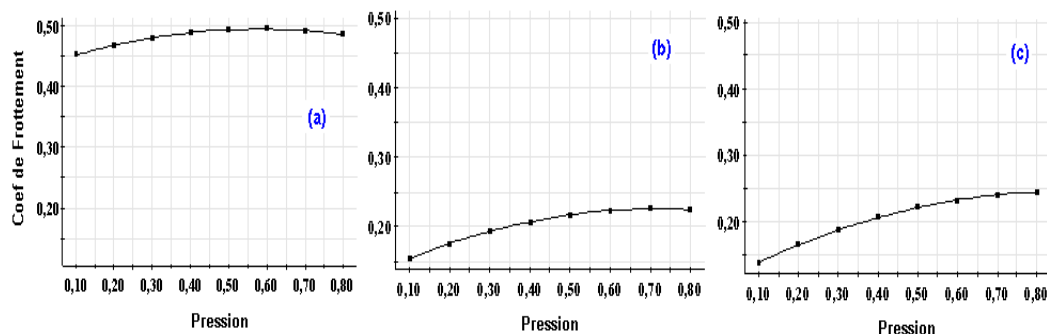


Figure 5 : Influence de la pression à une vitesse constante :  
(a) minimale, (b) moyenne, et (c) maximale.

Une variation de tendance similaire pour la vitesse moyenne de 32,5 m/s (Fig. 5b), cependant le coefficient de frottement prend des valeurs largement inférieures que les précédentes avec le changement de la pression exercée. A titre d'exemple on passe de la valeur de  $f=0,154$  pour une pression de 0,1 MPa à une valeur de  $f=0,226$  pour une pression de 0,8 MPa. Le coefficient de frottement varie donc d'une valeur de 0,072 pour une augmentation importante de pression. Sur la figure 5c, lorsque la vitesse est à une valeur constante de 60 m/s, le coefficient de frottement passe paradoxalement à des valeurs légèrement supérieures avec le changement de la pression, la tendance s'est inversée légèrement donc. On peut citer ici que  $f=0,137$  pour une pression de 0,1 MPa; il passe à  $f=0,244$  pour une pression de 0,8 MPa. Ici aussi, l'augmentation du coefficient de frottement est donc très petite; c'est ce qui démontre que l'influence de la pression est minime par rapport à la vitesse de glissement qui demeure le facteur dominant.

#### 4.3 Influence simultanée de la vitesse de glissement et de pression appliquée

Une représentation typique de l'influence simultanée des deux paramètres sur la variation du coefficient de frottement, est illustrée sous deux formes appelées habituellement surface de réponse (Fig. 6.a) en 3D et lignes Iso-réponses (Fig. 6.b) en 2D.

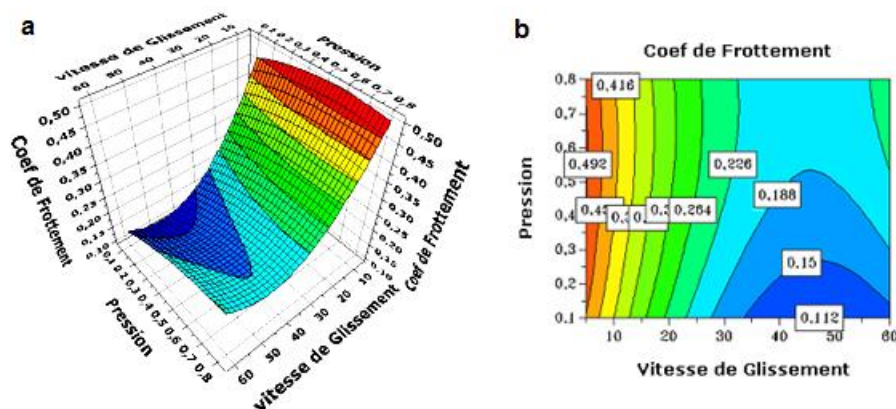


Figure 6 : (a) Surface de réponse ;(b) Iso-réponses, relatives à la variation du coefficient de frottement.

En réalité les iso-réponses ne sont que la projection de la courbe surface sur le plan inférieur. Ces représentations graphiques de l'équation du modèle constitue un point fort intéressant de la méthode des plans d'expériences. Elles donnent une autre vision d'analyse qui restitue de manière interprétable l'équation du modèle mathématique. Sachons que les représentations sont tracées en utilisant des valeurs réelles, nous voyons clairement l'évolution du coefficient de frottement en fonction des deux paramètres (Vitesse de glissement et pression d'application). Sur les 2 dernières figures, on voit que jusqu'à la valeur de la vitesse de 23 m/s, le coefficient de frottement  $f$  reste presque constant et change très peu avec l'augmentation de la pression entre 0,1MPa et 0,8 MPa et cela pour chaque vitesse de glissement choisie. Les lignes iso-réponses demeurent verticales dans cette partie du graphe. Par contre, au-delà de la vitesse citée, l'interaction vitesse-pression est très visible puisque les lignes s'inclinent et se courbent. A titre d'exemple pour une vitesse de 40 m/s et avec l'augmentation de la pression, en se déplaçant verticalement du bas du graphe de la figure (fig.6.b) vers le haut, le coefficient de frottement prend respectivement les valeurs de 0,112 - 0,150 - 0,188 et 0,203. Nous confirmons encore une fois que la pression agit très peu sur le changement du coefficient de frottement. Pour des valeurs de pression constantes, les graphes montrent que l'augmentation de la vitesse de glissement diminue le coefficient de frottement sur une bonne partie du domaine. Il y a cependant une augmentation de ce coefficient à partir de 0,54 MPa jusqu'à 0,8 MPa lorsque les vitesses de glissement sont élevées (57 m/s - 60 m/s). Cela confirme les tendances montrées par les figures 4a-b et c.

## 5. Discussion

Le frottement du corindon sur le  $Ti_3SiC_2$ , est un processus complexe, étroitement lié aux facteurs mécaniques, thermiques et physico-chimiques. Les résultats discutés sur la présente étude ont montrés que le coefficient de frottement dépend d'une manière claire de la vitesse de glissement et de la pression exercée. Cependant un certain nombre de mécanismes essentiellement physico-chimiques permettent l'apparition de composés chimiques sur la surface du matériau; ils agissent eux aussi sur le coefficient de frottement. Ces composés forment alors des films qui s'intercalent entre la tige et le matériau et joue le rôle du 3<sup>e</sup> corps. Le comportement tribologique de ce matériau [10, 11, 12, 13] devient alors ambigu par moment sans pour autant que l'on comprenne précisément comment. Cependant une explication peut être donnée pour expliquer l'augmentation du coefficient de frottement au-delà de 40 m/s alors qu'il diminue avant cette valeur. Quelques littératures [14, 15] ont prouvées que  $Ti_3SiC_2$  peut être oxydé à une certaine température par l'air pendant le contact. Une couche d'oxydes composée de  $SiO_2$  et de  $TiO_2$  se forme alors sur la surface de  $Ti_3SiC_2$  [16, 17]. Elle est dense et adhésive. Entre

10 m/s et 40 m/s, le coefficient est en perpétuelle diminution car plus la vitesse de glissement grandit, plus le dégagement de chaleur s'accroît au niveau du point de contact; cela favorise alors la formation d'oxydes qui couvrent par endroits la partie superficielle des échantillons. Cette couche isole donc partiellement et progressivement le  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$  du corindon et par conséquent les grains de TiC considérés comme étant plus dur que le matériau initial; le coefficient diminue alors. Par contre, lorsque la vitesse dépasse 40 m/s, il y a probablement arrachement et balayage de la couche des oxydes qui est projetée par le mouvement; les grains de TiC réapparaissent de nouveau alors sur la surface et rentrent en contact avec le corindon. Cela entraîne alors l'augmentation du coefficient de frottement qui atteint les valeurs de 0,14 ( $P=0,1$  MPa), de 0,215 ( $P=0,45$  MPa), et de 0,245 ( $P=0,8$  MPa). Les travaux d'El-Raghy et son équipe, ont démontré que le coefficient de frottement a atteint la valeur de 0,83 pour le  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$  lorsque la couche des oxydes a été empêchée d'être formée en isolant les éprouvettes du milieu extérieur; il n'y avait presque aucun film existant entre les surfaces de frottement. L'augmentation de la température, lors du frottement, semble aussi un facteur promoteur; la vitesse de croissance du film d'oxydes augmente exponentiellement avec la température [18]. Elle est cependant limitée par la vitesse de diffusion de l'élément le plus lent de la réaction [19, 20]. Néanmoins, il était difficile pour le film d'être maintenu sur la surface de frottement à une température suffisamment élevée, cela est dû au changement de sa viscosité ponctuelle et aux forces appliquées à cause de la vitesse de glissement élevée favorisant l'arrachement. Par conséquent, l'augmentation de chaleur lors du frottement pour des vitesses inférieures à 40 m/s peut modifier les propriétés mécaniques et métallurgiques des surfaces de glissement fournissant ainsi un mécanisme d'auto-antifriction ayant pour résultat la réduction du coefficient de frottement. Bien que l'influence du film et de la température soit visible, la présence des impuretés de TiC semble être un facteur dominant. La comparaison entre les travaux exposés sur les références citées (pour  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$  pure) et nos résultats (pour le  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$  avec 8% d'impuretés de plaquettes hexagonales de TiC formé par une réaction entre Ti et C), confirme cette hypothèse. Ces plaquettes qui semblent être plus dures que le matériau mère, augmentent alors les paramètres de rugosité sur la surface de frottement; cela a pour effet de changer le comportement tribologique du matériau étudié, autrement dit un coefficient de frottement plus élevé.

## 6. Conclusion

La céramique  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$  à 8% d'impuretés de TiC possède un comportement tribologique très dépendant de la vitesse de glissement et à moindre degré de la pression appliquée; cela est visible puisque son coefficient de frottement passe de 0,1 à 0,53 dans le domaine expérimental. Cette variation sur une plage assez large fait qu'elle peut être utilisée selon les conditions de travail dans diverses applications. Il est évident que selon qu'elle soit pure ou avec impuretés à des taux différents, le coefficient varie selon la quantité de TiC formé dans le matériau par ajout de  $\text{Be}_2\text{O}_3$  en poudre dans le mélange soumis à la thermo-compression. La modélisation du comportement tribologique de cette céramique en étudiant la variation du coefficient de frottement par l'utilisation de la méthode des plans d'expériences nous a permis d'une part de visualiser et d'illustrer graphiquement les valeurs de ce coefficient, et d'autre part d'avoir d'autres valeurs non mesurées en prévoyant des valeurs des paramètres agissant extérieurement à condition de travailler avec ce modèle à l'intérieur du domaine entre les valeurs maximales et minimales de la vitesse de glissement et de la pression. Autrement, à l'extérieur du domaine, les écarts entre le modèle et les valeurs trouvées du coefficient de frottement deviennent grands; s'éloignent donc des valeurs acceptables.

## 1.7 Références bibliographiques :

- [1] : Alexandra SOUCHET, "Comportement tribologique d'une phase MAX : Transition et effets d'échelle sur différents  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$ ", Ecole Centrale de LYON, 2004.
- [2] : Hongxiang Zhai, Zhenying Huang, Mingxing Ai, "Tribological behaviors of bulk  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$  and influences of TiC impurities", Materials Science and Engineering, A 435–436, pp 360–370, 2006.



- [3] : Zhenying Huang, Hongxiang Zhai, Minglin Guan, Xin Liu, Mingxing Ai, Yang Zhou, "Oxide-film-dependent tribological behaviors of Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>" Wear 262, 1079–1085, 2007.
- [4] : E.P.George and all "Statistics for Experimenters", Second edition, New York, 2005.
- [5] : Jacques GOUPY, "Plans d'expériences non conventionnels. Théorie et applications (ou comment sauver un plan raté)", Analusis : Journal Européen (23, pp 152-158), Hérault, Montpellier.
- [6] : Jacques Goupy, "Introduction aux plans d'expériences", Edition Dunod, Paris, 2001.
- [7] : Jacques GOUPY, Tutorial, "Les Plans d'Expériences", Revue MODULAD, 2006.
- [8] : F.Louvet, and all "les plans d'expériences une approche pragmatique et illustrée", Edition Expérimentique.
- [9] : D.C. Montgomery, "Design and analysis of experiments", New York, 2004.
- [10] : Z. Sun;Y. Z, "Tribological behavior of Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>-based material", J. Mater. Sci.Technol; pp 142-145, 2002.
- [11] : Y. Zhang, and all "Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> a self-lubricating ceramic", Materials Letters, V 55, pp 285-289, 2002.
- [12] : J.J. Hu, J.E. Bultman, S. Patton, and J.S. Zabinski, "Pulsed laser deposition and properties of Mn+1AX<sub>x</sub> phase formulated Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> thin films", Tribology Letters, V16, pp 113-122, 2004.
- [13] : T. El-Raghy&all "Effect of grain size on friction and wear behaviour of Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>", Wear, pp 125–130, 2000.
- [14] : M.W. Barsoum, and all "Oxidation of Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> in air", J.Electrochem. Soc. 144, pp 2508–2516, 1997.
- [15] : S.B. Li, L.F. Cheng, L.T. Zhang, "Oxidation behavior of Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> at high temperature in air", Material Sciences Engineering A341, pp 112–120, 2003.
- [16] : S.C. Lim, "the effects of sliding conditions on the dry friction of metals" ActaMetallica, pp767–772, 1989.
- [17] : S. Wilson, A.T. Alpas, "Thermal effects on mild wear transitions in dry sliding of an aluminum alloy", Wear pp 225–229, 1999 and pp 440–449.
- [18] : Shi-Bo Li, Wei-Hua Xiang, Hong-Xiang Zhai, Yang Zhou ; « Formation of TiC hexagonal platelets and their growth mechanism » ; Powder Technology 185 (2008) 49–53.
- [19] : Kubaschewski O., Hopkins B.E. ; « Oxidation of Metals and Alloys » ; Butterworths, London 1962.
- [20] : Beranger G., Armanet F., Lambertin M. ; « Active Elements in Oxidation and their Properties, Role of Active Element in Oxidation Behaviour of High Temperature Metals and Alloys » ; ed. E.Lang, Elsevier, 1989, pp. 33-5.