

EFFET DE LA MORPHOLOGIE DU SABLE SUR L'USURE DES SURFACES EN CONTACT

MANSOURI M., HAIHAHEM A. & TAYEBI B.

Laboratoire de mécanique industrielle, Département de Génie Mécanique, Université de Annaba

RESUME

Le problème de l'usure abrasive se pose avec acuité dans le sud algérien. L'introduction des grains de sable entre les surfaces de contact des pièces en mouvement diminue considérablement la durée de vie des mécanismes. Notre travail consiste à stimuler ce type de contact par deux cylindres tangents, l'un menant (échantillon) et l'autre mené (roulement). Le polluant est introduit dans le convergent, puis récupéré. Il est analysé chimiquement et morphologiquement avant et après son introduction. Deux échantillons ont été utilisés dans nos expériences ; un acier doux et un acier d'amélioration. Les paramètres charges et vitesses de roulement sont maîtrisées.

Les résultats montrent un écrouissage plus important des surfaces de la pièce en acier d'amélioration, donc l'usure est moindre. D'autre part, suite à l'analyse morphologique, nous avons constaté que si à la première introduction les grains de sable ont une forme ovale et sont relativement gros, l'écrouissage est important, une fois fragmenté par le contact les grains deviennent plus petits, anguleux et présentent des arêtes tranchantes, et accentuent l'usure par abrasion et par fatigue en détachant des particules métalliques fines.

Mots clés : lubrification, polluants solides, usures, contact EHD, comportement

ABSTRACT

The abrasive wear problem settles with sharpness in the south of Algeria. The introduction of sand particles between the contact surfaces of pieces in mouvement drastically diminishes the life time of the mechanisms. Our work consists to stimulate this type of contact by two tangent cylinders, leading and gearing samples. The pollutant is introduced in the convergent, than recuperated. It is chimically and morphologically analysed before and after its introduction. Two samples have been used in our experiences; soft steel and hard steel. The changed parameters and speeds of the bearing are controlled.

The results show, when first injected, the pollutant generates an important surface hardening within the hard metal leading to better wear resistance. In reinjected the recuperated pollutant, the two materials are subjected to abrasion and fatigue wear by removal of thin metallic particles. Morphological analysis revealed that this behaviour is due to changes in the form of pollutant particles, as the original ones which were relatively thick and ovaloid are transformed into small and sharp particles as they have been fragmented and broken during mechanical contact.

INTRODUCTION

Généralités

L'abrasion et la fatigue des pièces mécaniques appartiennent aux plus importantes usures conduisant soit à une détérioration, soit à une défaillance totale des pièces, voire même d'installations complètes. Ces usures sont très souvent causées par la présence de polluants extérieurs dans les contacts.

L'objet de notre travail est d'étudier l'effet de ces polluants sur l'usure des surfaces. Cette étude expérimentale consiste à introduire du sable tamisé dans un contact roulant cylindre/cylindre sous charge et vitesse contrôlées (fig. 1). Parmi les travaux relatifs à ce sujet, nous citerons U. Ikramov [1] qui a fait des approches de calcul d'usure par abrasion. Zm Gahr [2] classifie ce type d'usure par les microcopeaux (polluants internes), la cassure, le sillon et la microfatiqgue (fig. 2). Kragelski a été le premier à constater le caractère

dynamique de l'usure abrasive [3]. Skundin [4] propose un procédé quantitatif qui permet de déterminer le degré de capacité de rouler des grains.

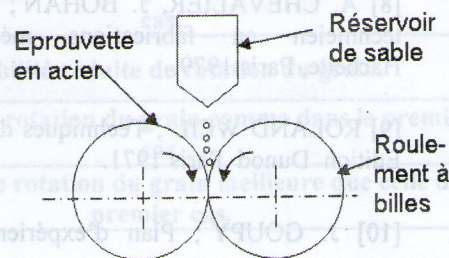


Fig. 1a : Schéma du dispositif.

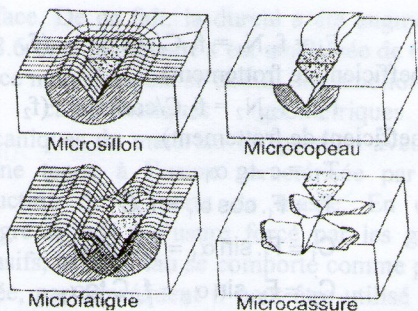


Fig. 1b : Différents mécanismes de l'usure abrasive produite par un grain de sable modelé [2].

Matériaux utilisés

Eprouvettes : deux types d'acier (A60 et XC55) de dureté HRC 35 et 45 et de diamètre 25 mm.
Un roulement : 100C6, de dureté HRC 61 et de diamètre 25 mm.
Polluant : sable du grand sud algérien, nettoyé et tamisé.

Modélisation

Suite aux observations précédentes, on adopte le modèle choisi par Ikramov U. [1] : le grain de sable (fig. 3) est modélisé par quatre arcs de cercle de différents rayons ; deux arcs de cercle sont remplacés par des tangentes (fig. 4). La difficulté de modéliser l'état de surface des pièces en frottement réside dans la complexité des irrégularités, qui sont :

- Les écarts de formes,
- Les ondulations,
- La rugosité.

La rugosité diffère suivant les directions et elle change durant le processus d'usure.



Fig. 3 : Grains de sable aux angles émoussés.

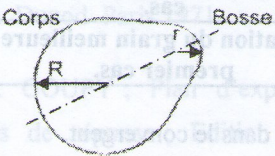


Fig. 4 : Contact d'un grain de sable modélisé avec les surfaces des pièces.

Plusieurs chercheurs ont essayé de modéliser l'état de surface des pièces en frottement ; on opte pour une modélisation simple qui consiste à considérer les surfaces I et II (fig. 4) des pièces comme étant des plans lisses inclinés suivant des angles α_1 et α_2 .

INTERACTION DES GRAINS DE SABLE AVEC LES SURFACES DES PIECES

Mouvement des grains de sable dans le convergent

On suppose le modèle « éprouvette - grain de sable - contre-pièce » dans un plan, soumis à des force et à des moments. Il est à souligner que le matériau de l'éprouvette est moins dure que celui de la contre-pièce (roulement). Le grain de sable arrive dans le convergent formé par l'éprouvette et la contre-pièce dans une position quelconque. La figure 5 présente quatre différentes possibilités de position extrême initiale de grain de sable dans le convergent.

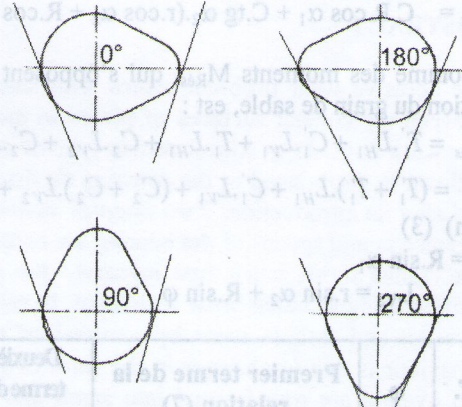


Fig. 5 : Différentes possibilités de position initiale du grain de sable dans le convergent.

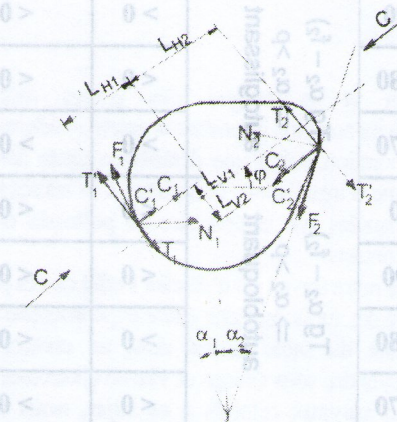


Fig. 6 : Forces agissantes sur un grain de sable dans le convergent dans une position initiale quelconque.

Toutes les autres positions intermédiaires sont aussi probables. Dans un premier temps, le grain de sable, quelque soit sa position dans le convergent, est soumis à des efforts de compression (fig. 6). On remarque que ces forces de compression créent des moments pouvant engendrer la rotation du grain de sable sur lui-même, et aussi des forces de frottement s'opposant au mouvement de rotation. Le centre instantané de rotation est, pour des raisons de simplification, supposé coïncider avec le centre O_1 du corps du grain de sable. Il est à rappeler que les deux pièces (échantillon et roulement à billes), qui ont des diamètres proches tournent à la même vitesse ω .

La somme des moments, qui produisent la rotation du grain de sable, est:

$$M_{Rot} = C_1 \cdot L_{H1} + T_2 \cdot L_{H2} \text{ (N.m)} \quad (1)$$

C_1 : Force de compression en N ($C_1 = C_2 = C$)
 T_2 : Composante de F_2 en N ($T_2 = C \cdot \text{tg } \alpha_2$)
 L_{H1} : Longueur en mm ($L_{H1} = R \cdot \cos \alpha_1$)
 L_{H2} : Longueur en mm ($L_{H2} = r \cdot \cos \alpha_2 + R \cdot \cos \varphi$)

$$M_{Rot} = C \cdot R \cdot \cos \alpha_1 + C \cdot \text{tg } \alpha_2 \cdot (r \cdot \cos \alpha_2 + R \cdot \cos \varphi) \text{ (N.m)}$$

La somme des moments $M_{R\acute{e}s}$, qui s'opposent à la rotation du grain de sable, est :

$$M_{R\acute{e}s} = T_1' \cdot L_{H1} + C_1' \cdot L_{V1} + T_1 \cdot L_{H1} + C_2 \cdot L_{V2} + C_2' \cdot L_{V2} + T_2' \cdot L_{H2}$$
$$= (T_1' + T_1) \cdot L_{H1} + C_1' \cdot L_{V1} + (C_2' + C_2) \cdot L_{V2} + T_2' \cdot L_{H2}$$

(N.m) (3)
 $L_{V1} = R \cdot \sin \alpha_1$
 $L_{V2} = r \cdot \sin \alpha_2 + R \cdot \sin \varphi$

$$F_1 = f_1 \cdot N_1 = f_1 \cdot C / \cos \alpha_1 \quad (f_1 \text{ est un coefficient de frottement})$$

$$F_2 = f_2 \cdot N_2 = f_2 \cdot C / \cos \alpha_2 \quad (f_2 \text{ est un coefficient de frottement})$$

$$T_1 = C \cdot \text{tg } \alpha_1$$

$$T_1' = F_1 \cdot \cos \alpha_1 = f_1 \cdot C$$

$$C_1' = F_1 \cdot \sin \alpha_1 = f_1 \cdot C \cdot \text{tg } \alpha_1$$

$$C_2' = F_2 \cdot \sin \alpha_2 = f_2 \cdot C \cdot \text{tg } \alpha_2$$

$$T_2' = F_2 \cdot \cos \alpha_2 = f_2 \cdot C$$

Pour qu'il y ait rotation, il faut que :

$$M_{Rot} > M_{R\acute{e}s}$$

En utilisant les relations (2) et (3), on peut écrire :
 $R \cdot \cos \alpha_1 \cdot [1 - (f_1 + \text{tg } \alpha_1)] + (r \cdot \cos \alpha_2 + R \cdot \cos \varphi) \cdot (\text{tg } \alpha_2 - f_2) - f_1 \cdot \text{tg } \alpha_1 \cdot R \cdot \sin \alpha_1 - (1 + f_2) \cdot (r \cdot \sin \alpha_2 + R \cdot \sin \varphi) > 0$

Le premier terme de l'inégalité ne dépend pas de la position du grain de sable et est toujours positif. Le troisième terme est négligeable par rapport aux autres et ne dépend pas de la position du grain. La question est de savoir pour quelle position (angle de rotation φ), la différence entre le deuxième et le quatrième terme de la relation (5) est-elle positive ?

$$(r \cdot \cos \alpha_2 + R \cdot \cos \varphi) \cdot (\text{tg } \alpha_2 - f_2) - (1 + f_2) \cdot (r \cdot \sin \alpha_2 + R \cdot \sin \varphi) > 0 \quad (6)$$

Le produit $(f_2 \cdot r \cdot \sin \alpha_2)$, étant négligeable par rapport aux autres termes, on peut écrire :

$$(r \cdot \cos \alpha_2 + R \cdot \cos \varphi) \cdot (\text{tg } \alpha_2 - f_2) + (-r \cdot \sin \alpha_2 - R \cdot \sin \varphi - f_2 \cdot R \cdot \sin \varphi) > 0 \quad (7)$$

Les différents cas de figures pour l'inégalité (7) sont représentés dans le tableau 2.

Réf.	φ	Premier terme de la relation (7)	Deuxième terme de la relation (7)	Observations
1	0	$\text{Tg } \alpha_2 - f_2$ $\Rightarrow \alpha_2 > \rho$ autoglossant	> 0	< 0 Rotation possible du grain si le 4 ^{ème} terme de la relation (5) est inférieur à la somme des 1 ^{er} et 2 ^{ème} terme, c.à d. cela dépend des dimensions R et r et des angles α_1 et α_2 .
2	90		> 0	
3	180		< 0	Possibilité réduite de rotation du grain.
4	270		> 0	Rotation du grain assuré
5	0	$\text{Tg } \alpha_2 - f_2$ $\Rightarrow \alpha_2 < \rho$ autobloquant	< 0	Possibilité de rotation du grain comme dans le premier cas.
6	90		< 0	Possibilité réduite de rotation du grain.
7	180		> 0	Possibilité de rotation du grain comme dans le premier cas.
8	270		< 0	Possibilité de rotation du grain meilleure que celle du premier cas.

Tab. 2 : Analyse des possibilités de position du grain dans le convergent.

On constate que le grain de sable, sous certaines conditions, pour n'importe quelle position, peut tourner sur lui-même. Les positions les plus stables sont données par les possibilités réduites de rotation. Le fait que le grain puisse tourner sur lui-même a pour conséquence une diminution de l'usure abrasive. Il est fort intéressant de souligner que, pour certaines positions du grain dans le convergent (fig. 7), les forces de frottement F_1 et F_2 produisent des forces (composantes C'_1 et C'_2) qui tendent à enfoncer le grain dans l'une des surfaces. Le grain s'enfonce dans le matériau le plus tendre. Cette pénétration du grain joue aussi le rôle de frein et empêche le grain de continuer à tourner sur lui-même.

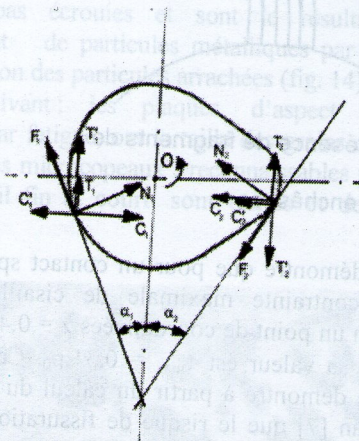


Fig. 7 : Forces agissantes sur le grain de sable pour un angle de rotation $\varphi = 0^\circ$.

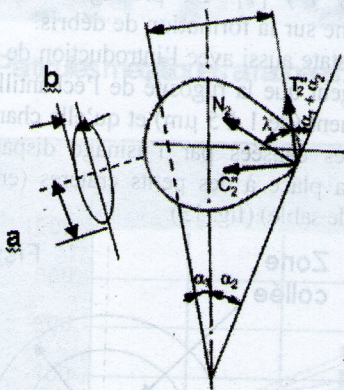


Fig. 8 : Grain de sable encastré avec diagramme des force.

La profondeur de pénétration du grain de sable dépend :

- De la taille du grain,
- Du nombre de grains dans le convergent,
- De la force de compression,
- Des coefficients de frottement.

Le grain de sable, ainsi encastré et immobilisé en rotation, est soumis à des sollicitations de flexion, de

compression et de cisaillement comme le montre la figure 8.

Compte tenu du caractère fragile du grain de sable, la contrainte équivalente est calculée d'après le critère de la plus grande contrainte normale.

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{2} \left[\sigma_{max} + \sqrt{\sigma_{max}^2 + 4\tau_c^2} \right] \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (8)$$

Vu que $\sigma_{max} = \sigma_F + \sigma_C$, on peut donc écrire :

$$\sigma_{max} = \frac{4.C}{\pi.a.b} \left[\frac{l}{a} (\sin \alpha_1 - \cos \alpha_1 \cdot \tan \alpha_2) + \cos \alpha_1 \right]$$

Donc la contrainte équivalente peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\sigma_{eq} = \frac{2.C}{\pi.a.b} \left[\frac{l}{a} (\sin \alpha_1 + \cos \alpha_1 \cdot \tan \alpha_2) + \cos \alpha_1 + \sqrt{\left[\frac{l}{a} (\sin \alpha_1 + \cos \alpha_1 \cdot \tan \alpha_2) + \cos \alpha_1 \right]^2 + 4(\sin \alpha_1 + \cos \alpha_1 \cdot \tan \alpha_2)^2} \right] \quad (9)$$

Si cette contrainte équivalente brise le grain de sable comme l'ont montré les expériences ; elle le brise d'autant plus facilement à l'encastrément pour des petites valeurs de a et b et pour des grandes valeurs de l , α_1 , α_2 . La longueur l et les angles α_1 et α_2 sont grands pour les gros grains de sable. On peut donc en déduire que les gros grains de sable cassent plus facilement que les plus fins. La partie incrustée de grain de sable, séparée par cassure du reste du grain passera à travers le convergent. L'autre partie du grain va revivre le cycle de « rotation, pénétration, immobilisation-cassure ». On peut dire que le grain de sable, qui initialement est émoussé, est morcelé en petits grains aux arêtes vives (fig. 9).

Comportement des pièces

L'usure abrasive a lieu sous la forme de microfatiqes, de microsillons et de microcopeaux. Initialement (sans apport de sable), la pression entre les deux cylindres (échantillon et roulement) se situe dans le domaine élastique, mais avec l'introduction de sable dans le convergent, les déformations locales se situent dans le domaine plastique (fig. 10).

La dureté plastique H d'un matériau, qui est la pression d'écoulement du matériau, est définie comme la pression moyenne de contact sous l'indenteur [4], soit :

$$H = \bar{p} = F_z/A \quad \text{(N/mm}^2\text{)} \quad (10)$$

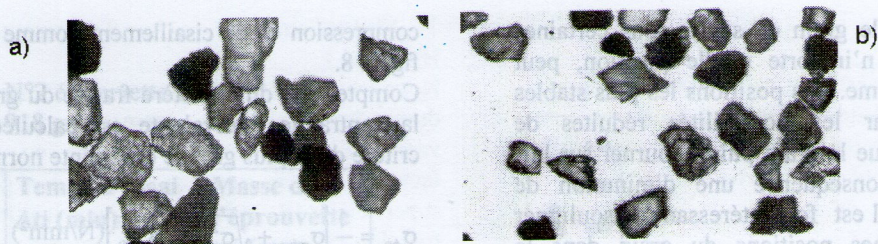


Fig. 9 : Aspects de grains de sable après un passage dans le convergent :
a) Epreuve en acier XC 55, b) Epreuve en acier A 60.

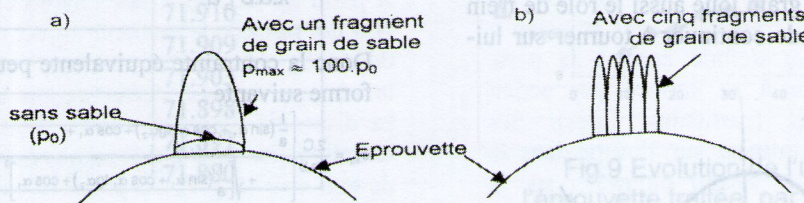


Fig. 10 : Pressions théoriques dans le contact en présence de fragments de grain de sable ($\omega = 0$) :
a) un seul fragment enchâssé, b) cinq fragments enchâssés

Où A est la surface permanente laissée par l'indenteur (fig. 11) lors du chargement et du déchargement.
L'analyse de Johnson [6] pour décrire des expériences d'indentation avec des cônes et des pyramides est applicable quand l'indenteur est sphérique [4]. L'existence d'un mode de déformation radial compressif lors de l'indentation sphérique est représentée sur la figure 11.
La pression moyenne de contact est liée aux grandeurs élastiques E et plastique Y par la relation :

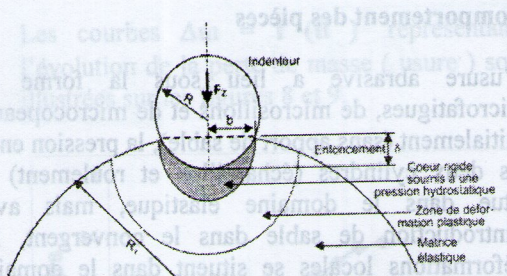


Fig. 11 : Indentation d'un matériau homogène élastoplastique.

$$\frac{p}{Y} = \frac{2}{3} \left[1 + \ln \left(\frac{1}{3} \frac{E \cdot b}{Y \cdot R} \right) \right] \quad (11)$$

- b : demi-largeur du contact (égale au rayon du cercle de contact) en mm,
- R : rayon de l'indenteur sphérique en mm,
- E : module d'élasticité en N/mm²
- Y : contrainte seuil en tension en N/mm².

Il a été démontré que pour un contact sphère-plan que la contrainte maximale de cisaillement se trouve en un point de coordonnées $z = 0,48 \cdot b$ et $x = 0$ et que sa valeur est $\tau_{\max} = 0,31 \cdot p_0$. Comme il a aussi été démontré à partir du calcul du critère de Dang Van [7] que le risque de fissuration se situe dans la zone de glissement (fig.12).
On constate que la naissance d'une fissure n'a pas lieu au point d'application de la contrainte maximale de cisaillement ($z = 0,48 \cdot b$ et $x = 0$), mais à la surface de la circonférence de contact ($z = 0$ et $x^2 + y^2 = b^2$) [7]. La propagation de la fissure débouche sur la formation de débris.
On constate aussi avec l'introduction de sable dans le convergent que la rugosité de l'échantillon augmente légèrement (de 1 à 5 μm) et qu'elle change d'aspect : les stries causées par l'usinage disparaissent pour céder la place à des petits cratères (empreintes des grains de sable) (fig. 13).

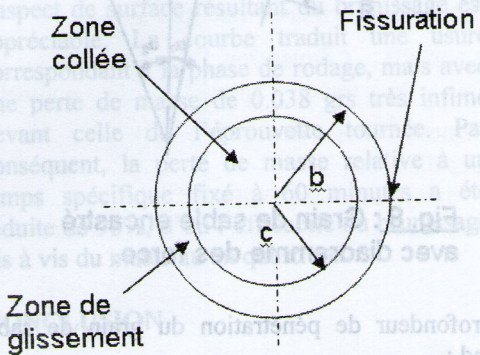


Fig. 12 : Contact sphère-plan et risque de fissuration.

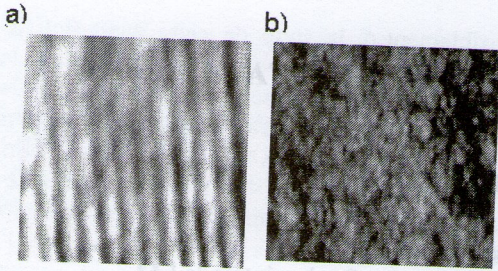


Fig. 13 : Etats de surface.
a) initial ; b) usé

L'état écroui est reconnaissable à l'aspect bruni de la surface. L'alternance brillant-terne est frappante : les parties brillantes, qui sont les fonds des microcratères, ne sont pas écrouies et sont le résultat d'un arrachement de particules métalliques par fatigue. L'observation des particules arrachées (fig. 14) livre le constat suivant : les plaques, d'aspect brillant, arrachées par fatigue, ont la taille des grains de sable alors que les microcopeaux, reconnaissables par leur forme en fil fin et court, sont ternes et de faible quantité.

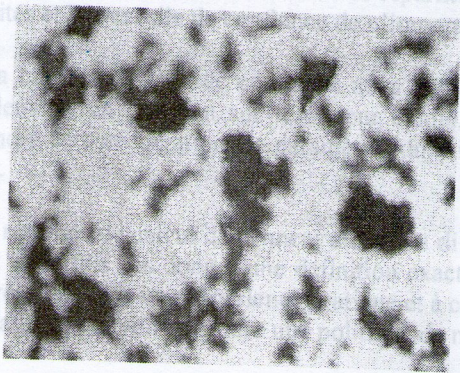


Fig. 14 : Particules métalliques arrachées.

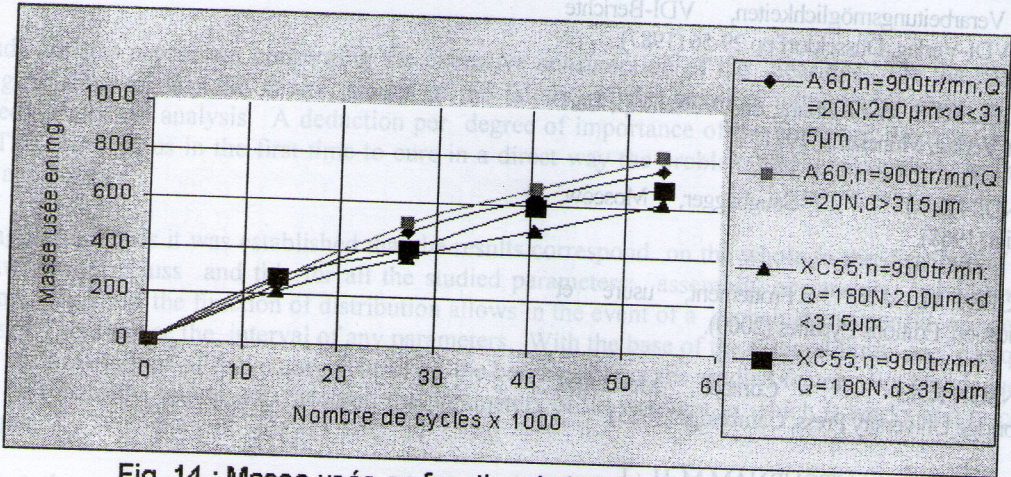


Fig. 14 : Masse usée en fonction de la taille du grain de sable.

La difficulté lors du calcul du volume réside dans la complexité de la détermination des différentes épaisseurs (celle soumise à des pressions hydrostatiques et celle subissant une déformation plastique. A cet effet, nous avons préféré mesurer la masse usée en fonction de certains paramètres (fig. 15).

La résistance à l'usure abrasive de l'acier d'amélioration XC 55 est meilleure que celle de l'acier de construction à usage général A 60. Les aciers, subissant un écrouissage voient leur usure légèrement ralentie, vu que ce n'est pas toute la surface qui est écrouie et que la profondeur de l'écrouissage reste faible car elle est de l'ordre de la taille d'un fragment de grain de sable.

Sur la figure 14, nous voyons que l'usure des aciers augmente avec la taille des grains de sable. Les différentes courbes présentent une usure importante aux premiers cycles et atteint 600 mg après seulement 4.10^4 cycles.

Initialement, le grain, étant émoussé, ne produit que des microsillons et des micro-empreintes, qui sont assujettis à des microfatiqes. Après la cassure du grain en particules à arêtes vives, nous avons la production de microcopeaux. Par ailleurs nous avons constaté que le volume de matière arrachée par microfatiqes est de loin plus important que celui de matière arrachée par microcopeaux. Cela implique le choix d'un matériau résistant surtout à la fatigue.

CONCLUSION

L'analyse du comportement du grain de sable du Sahara, dont la forme est émoussée initialement, fait ressortir sa capacité de rouler sur lui-même dans le convergent. Cette capacité a pour effet de diminuer l'usure abrasive. Le fait que le grain de sable se morcelle dans le convergent, avant sa traversée du contact, et donne des particules aux arêtes vives, accentue l'usure abrasive. Il a été démontré dans cette étude que les grains de sable de grande taille cassent plus facilement que ceux de taille réduite.

Les expériences réalisées montrent que la masse usée augmente avec la taille du grain. La courbe de la masse usée en fonction du nombre de cycles présentent au démarrage et jusqu'à environ 4.10^4 cycles une usure abrasive accélérée, qui s'explique par l'arrachement de la rugosité initiale ; puis quand la rugosité a changé et s'est adaptée à la forme et taille des grains de sable, la pente de la courbe diminue.

L'observation des particules métalliques arrachées et celle des surfaces usées montre que l'usure par microfatigues est prépondérante. Le choix du matériau adéquat doit être effectué en tenant compte de cette donnée et il serait judicieux de choisir un matériau résistant à la fatigue, comme par exemple un acier à ressort.

BIBLIOGRAPHIE

1. IKRAMOV U. : Berechnung und Bewertung des abrasiven Verschleißes, Verlag Technik, Berlin (1987).
2. ZUM GAHR K. H. : Grundlagen des Verschleißes, in metallische und nichtmetallische Werkstoff und ihre Verarbeitungsmöglichkeiten, VDI-Berichte 600.3, VDI-Verlag, Düsseldorf pp.29-56 (1987).
3. KRAGELSKI, I. W.: Reibung und Verschleiß, Carl Hanser Verlag, München, 1971.
4. SKUNDIN B. M. : Saugbagger, Moscow, Energija (1968).
5. GEORGES J. M. : Frottement, usure et lubrification, Editions Eyrolles (2000).
6. JOHNSON K. L. : *Contact Mechanics, Cambridge University Press. Cambridge (1985).
7. DANG VAN K., MAITOURNAM M. H. : J. Mechanics and Physics of Solids, 41, pp. 1691-1710, (1993).