

Investigation expérimentale sur l'usure et la rugosité d'un contact EHD dans un milieu pollué

M. R. SARI^a, A. DJALAB^a, A. HAIHEM^b, L. FLAMAND^c

a. Département de Mécanique, Université 20 Août 1955 de Skikda BP 26, 21000 Algérie

b. Laboratoire de Mécanique Industrielle, Université Badji Mokhtar d'Annaba BP 12, 23000 Algérie

c. Laboratoire de Mécanique des Contacts et des Structures, CNRS UMR 5514 INSA de Lyon 69621 Villeurbanne cedex, France

Résumé:

Aujourd'hui, il est bien connu que la présence des particules polluantes dans les lubrifiants peut conduire à la rupture des éléments machines. Dans ce papier les résultats d'une investigation expérimentale sur la dégradation des contacts EHD dans les conditions de contamination les plus sévères (présence du sable) sont présentés. En effet, à partir des essais unifactoriels et multifactoriels basés sur la méthode de planification des expériences, ce travail a permis la mise en évidence de l'influence des paramètres de fonctionnement tels que : charge, vitesse, viscosité et concentration en polluant sur l'évolution de la température, de l'usure et de la rugosité Ra. Le traitement des résultats obtenus a permis également de déduire des modèles mathématiques d'usure et de rugosité en fonction des paramètres étudiés. Enfin, cette étude exprime les raisons de réduction de la durée de vie des mécanismes sous l'effet de la pollution solide des lubrifiants.

Abstract:

Today it is well known that the presence of solid particles in lubricants can lead to the failure of machines elements. In this paper, experimental results of an investigation on the degradation of EHD contacts under the effect of severe contamination conditions are presented. Indeed, with tests unifactoriels and multi-factors based on the method of planning experiments, this study allowed the description of the influence of operating conditions such as: load, speed, viscosity and contaminant concentration on the behaviour of temperature, wear and roughness. The treatment of obtained results enabled us to deduce mathematical models of wear and roughness according to the operating conditions. Finally, we conclude that the obtained results express the reduction reasons of mechanisms lifespan.

Mot Clefs : Contact, Pollution Solide, Lubrification, Usure, Rugosité

1 Introduction

Il est aujourd'hui bien établi que la présence des particules solides dans le lubrifiant est inévitable. Les lubrifiants utilisés sont déjà pollués même à l'état neuf, ils le sont davantage lors des opérations de montage, de maintenance ou de fonctionnement. Ces particules indésirables peuvent endommager les surfaces et conduire à la fatigue et à l'usure des éléments de machines.

Dans ces dernières années, le phénomène de la pollution solide des lubrifiants a fait l'objet de nombreuses études. Parmi les travaux relatifs à ce sujet, il convient de citer les travaux de Hunt [1] qui a procédé à une classification des particules selon leur morphologie en sept familles. Akl et Khalifa [2, 3] de leur part et à partir des essais menés sur une machine à galets, ont pu classer les particules en quatre classes correspondants aux périodes de rodage, de fonctionnement normal, de

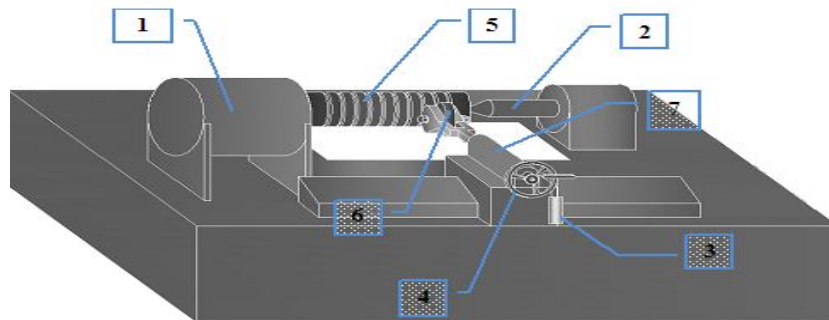
transition et de rupture du mécanisme. Kaneta et al [4, 5], ont suivi l'évolution d'un indente dans le contact et son effet sur l'épaisseur du film d'huile. Dwyer Joyce [6] à travers son étude a établi une classification des particules (Fragiles, Céramiques durs et Ductiles) selon leur comportement dans le contact. Le phénomène d'indentation et ses effets sur la durée de vie des mécanismes a été bien menée par Ville et Coulon [7, 8]. Récemment, Sari et al. [9, 10] ont prouvé que l'utilisation d'un lubrifiant contaminé par des particules de sable, conduit à une usure importante des contacts glissants aux premiers cycles de fonctionnement.

Dans ce papier les résultats d'une investigation expérimentale sur la dégradation des contacts EHD dans les conditions de contamination les plus sévères (présence du sable) sont présentés. En effet, à partir des essais unifactoriels et multifactoriels basés sur la méthode de planification des expériences, ce travail va permettre d'une part la mise en évidence de l'influence des paramètres de fonctionnement tels que : charge, vitesse, viscosité et concentration en polluant sur l'évolution de la température, de l'usure et de la rugosité Ra. Le traitement des résultats obtenus permettra également de déduire des modèles mathématiques d'usure et de rugosité en fonction des paramètres étudiés.

2 Procédure expérimentale

2.1 Dispositif expérimental

Les essais sont réalisés sur un dispositif original (FIG. 1) ou sont montés en contact deux roues cylindriques. Ce dispositif reproduit les conditions de fonctionnement d'un contact de roulement de type linéaire. Le principe consiste à faire entrer en contact une éprouvette cylindrique en acier C45 avec une roue cylindrique dure en acier 100C6. L'éprouvette est actionnée à une vitesse de rotation constante $n_1=500$ tr/min à l'aide d'un moteur électrique. La roue guidée en rotation est ensuite mise en mouvement sous l'action de l'éprouvette cylindrique.



- 1- Moteur électrique, 2- pointe tournante, 3- Jeux de poids, 4- volant de manœuvre, 5- Éprouvette cylindrique, 6- Roue cylindrique, 7- Chariot transversal.

FIG. 1 Diagramme schématique du dispositif expérimental

La charge au niveau du contact après étalonnage est égale à 180 N.

Les essais sont réalisés pour différentes conditions de fonctionnement (sec, lubrifié, pollué,...etc.).

2.2 Le lubrifiant

Les huiles utilisées dans les systèmes mécaniques assurent diverses fonctions. Elles permettent de réduire le frottement, évacuer les calories, refroidir et nettoyer les surfaces. Le lubrifiant utilisé dans notre étude est une huile extrême pression de type ISO VG 220. Il a une viscosité dynamique $\mu_0=0.033$ Pa.s à $T_0 = 40^\circ\text{C}$ et un coefficient de piezo-viscosité $\alpha_{p,v}=18.2 \times 10^{-9}$ Pa⁻¹. Il est représentatif d'une huile de transmission et couramment utilisé dans la lubrification des engrenages et roulements.

2.3 Le Polluant

Le polluant utilisé est une poussière de sable du Sahara, il simule le polluant issu du milieu extérieur. Il a été analysé chimiquement. Les résultats de cette analyse sont présentés dans la (FIG. 2). Elles montrent que les particules sont essentiellement constituées de quartz avec 90% qui est connu pour sa dureté, sa fragilité et qui peut être véhiculée par le vent jusqu'en Europe voire même en Amérique.

3 Résultats et discussions

3.1 Évolution de la température

Les températures pour différents essais à une vitesse de rotation 500 tr/min et une charge 180 N, sont relevées à l'aide d'un thermocouple infrarouge. Elles sont mesurées au point de contact (Roue-Éprouvette).

L'énergie mécanique perdue par frottement, transformée en chaleur, est généralement irrécupérable et parfois très difficile à évacuer. Les aspects thermiques du frottement peuvent avoir des conséquences inattendues. Nous constatons d'après la (FIG. 3) exprimant l'évolution de la température au cours du temps, que cette dernière augmente très rapidement de la température ambiante jusqu'à une certaine valeur, puis se stabilise autour d'elle. Cet échauffement important provient des déformations élastiques et plastiques se succédant à grande vitesse accompagnées de contraintes de frottement. D'autre part, on voit clairement que la température est élevée pour un contact sec si on compare à un contact lubrifié. Ceci explique le rôle important du lubrifiant dans l'évacuation des calories. On constate également que la présence des particules solides dans le lubrifiant qui favorise le frottement et l'usure, conduit à l'élévation de la température. L'échauffement est d'autant plus élevé pour un contact sec non lubrifié et surtout en présence des particules de sable de forte granulométrie.

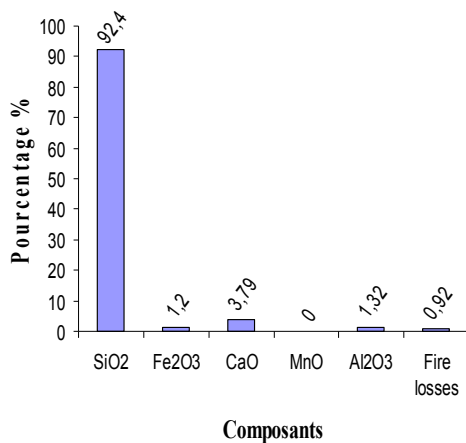


FIG. 2 Composition chimique du sable

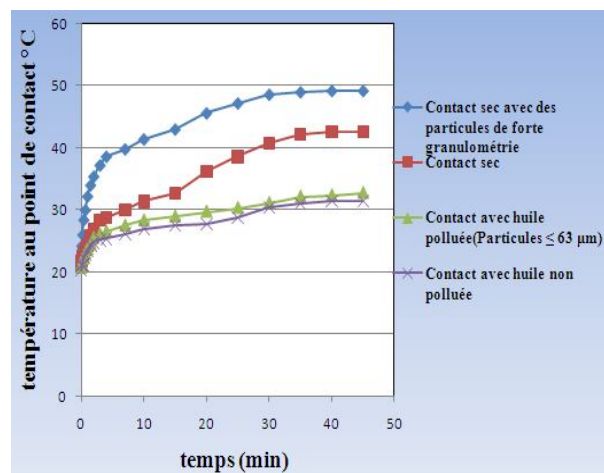


FIG. 3 Évolution de la température au point de contact (Roue-Éprouvette)

3.2 Évolution de l'usure

L'usure est évaluée par la mesure de la perte de côte. En effet, on a effectué trois mesures sur le diamètre de l'éprouvette et c'est la valeur moyenne qui a été considérée. On constate d'après les résultats de la (FIG. 4), que l'allure des courbes décrivant la tenue à l'usure pour l'acier C45 est pratiquement la même pour les différents essais menés. A première vue, on constate qu'elle obéit à la loi universelle de l'usure (rodage, usure normale et usure sévère). Elle augmente avec le temps de fonctionnement et diffère selon les conditions de fonctionnement des mécanismes. L'usure la plus

faible est observée pour le fonctionnement d'un contact lubrifié où l'huile joue un rôle clé dans la minimisation du frottement et par conséquent la diminution de l'usure. On constate également que la présence de fines particules de sable dans le lubrifiant (63 et 125 μm), a tendance à augmenter l'usure en la comparant à celle obtenue pour un contact lubrifié. En l'absence du lubrifiant (contact sec), l'usure est élevée et elle est notable pour un contact sec avec la présence des particules de sable de forte granulométrie.

3.3 Évolution de la rugosité

Dans cette étude, nous nous sommes également intéressés à l'évolution de la rugosité Ra de l'acier C45. Par définition la rugosité est l'ensemble des irrégularités d'une surface à caractère micrographique et macrographique. Généralement les surfaces usinées, ne sont pas parfaites, elles présentent des irrégularités dues aux procédés d'obtention, de fabrication, aux outils, ainsi qu'à la matière. D'après les résultats obtenus (FIG. 5), on constate qu'au cours de fonctionnement, la surface perd ses caractéristiques et son état devient mauvais. En effet pour un contact lubrifié, nous observons que la rugosité Ra diminue aux premiers cycles de fonctionnement, ceci est dû généralement à la phase de rodage qui se caractérise par l'élimination des aspérités d'une part et au lubrifiant qui joue un rôle important dans la diminution du frottement et de l'usure d'autre part, ce qui permet d'avoir un meilleur fini de surface. En analysant les résultats obtenus pour l'acier C45, on constate également que la présence des particules de sable dans le lubrifiant qui favorise le frottement et l'usure, conduit à un mauvais état de surface. Il est aussi bien clair qu'une concentration élevée en polluant conduit à une rugosité élevée. En effet, le passage d'une proportion élevée de particules dans le contact fait croître la rugosité. Cette dernière devient importante pour un contact sec avec la présence du sable et surtout avec des particules de forte granulométrie.

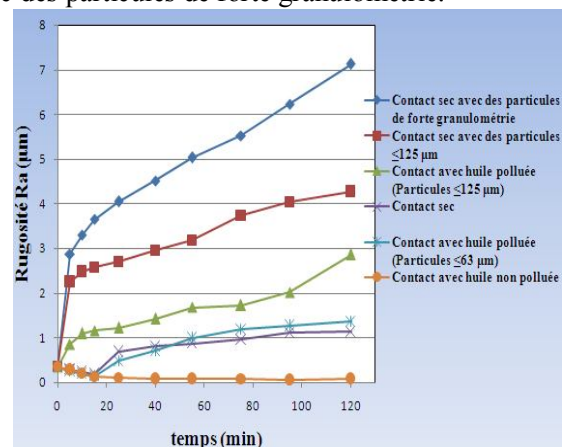
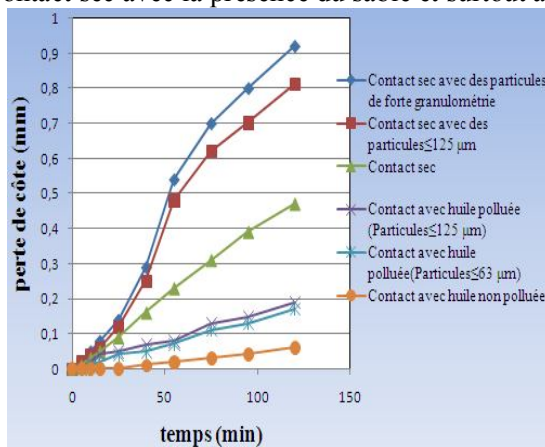


FIG. 4 Évolution de la l'usure au cours du temps FIG. 5 Évolution de la rugosité au cours du temps

3.4 Modèles mathématiques d'usure et de rugosité

L'objectif principal de cette section est d'établir des corrélations entre les paramètres de sortie (Usure et Rugosité) et les paramètres de fonctionnement sous une équation de la forme suivante :

$$Ra \text{ ou } W = C_1 \cdot V^{b_1} \cdot C^{b_2} \cdot \nu^{b_3} \cdot F^{b_4} \quad (1)$$

Avec :

C_1 : constante.

V , C , ν et F : sont la vitesse, la concentration en polluant, la viscosité et la charge respectivement.

b_1 , b_2 , b_3 et b_4 : sont des exposants qui montrent l'influence des paramètres d'entrée (vitesse, concentration en polluant, viscosité et charge) sur la rugosité et l'usure.

Pour ce faire, à partir du plan d'expériences indiqué dans le tableau 1, une série d'essais a été réalisée pour différentes combinaisons des conditions de fonctionnement du contact mécanique (concentration, charge, viscosité et vitesse).

Nombre d'essai	Valeurs des facteurs				Rugosité	Usure
	V (tr/min)	C (g/l)	ν (mm ² /s)	F (N)	Ra (μ m)	W (mm)
1	500	5	150	100	1,413	0,073
2	1000	5	150	100	1,08	0,096
3	500	10	150	100	1,656	0,09
4	1000	10	150	100	1,143	0,106
5	500	5	220	100	1,41	0,066
6	1000	5	220	100	0,85	0,086
7	500	10	220	100	1,636	0,09
8	1000	10	220	100	1,483	0,096
9	500	5	150	180	1,47	0,1
10	1000	5	150	180	1,203	0,13
11	500	10	150	180	2,613	0,146
12	1000	10	150	180	2,22	0,166
13	500	5	220	180	1,833	0,09
14	1000	5	220	180	1,47	0,1
15	500	10	220	180	2,516	0,103
16	1000	10	220	180	1,98	0,12

Tableau 1 Expériences planifiées

Un traitement statistique des résultats par la méthode des moindres carrés, a permis d'avoir les modèles mathématiques suivants :

$$\text{Pour l'usure de l'acier C45 : } W_{C45} = e^{-4,7037} \cdot V^{0,25} \cdot C^{0,29} \cdot \nu^{-0,44} \cdot F^{0,49} \quad (2)$$

$$\text{Pour la rugosité de l'acier C45 : } Ra_{C45} = e^{-1,4569} \cdot V^{0,37} \cdot C^{0,48} \cdot \nu^{-0,09} \cdot F^{0,59} \quad (3)$$

Selon les équations (2) et (3), on constate que l'usure et la rugosité varient proportionnellement avec la vitesse de rotation, la concentration en polluant et la charge. Par contre, elles sont inversement proportionnelles à la viscosité.

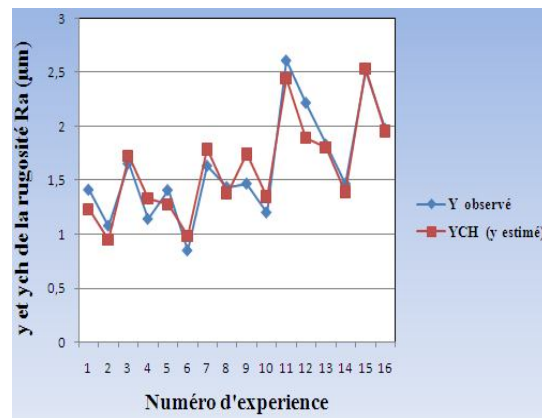
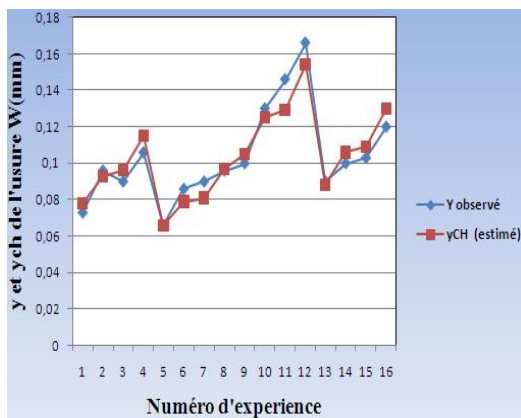
D'après le modèle d'usure, on voit clairement que la charge a un degré d'influence élevée sur l'usure, ensuite vient l'effet de la concentration en polluant et la vitesse de rotation.

Pour le modèle de rugosité, il est également bien clair que la charge, la concentration en polluant et la vitesse de rotation, ont un degré d'influence très élevée sur l'évolution de la rugosité.

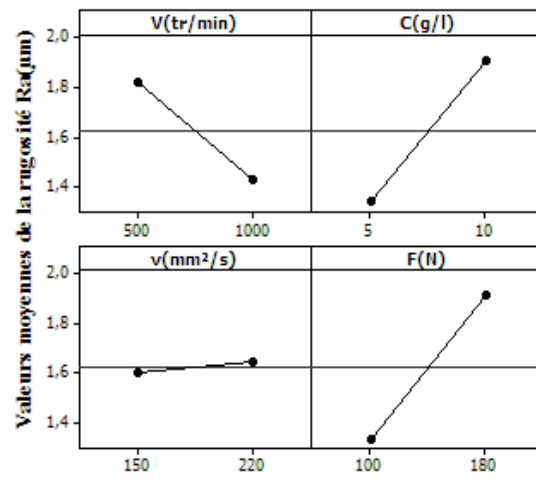
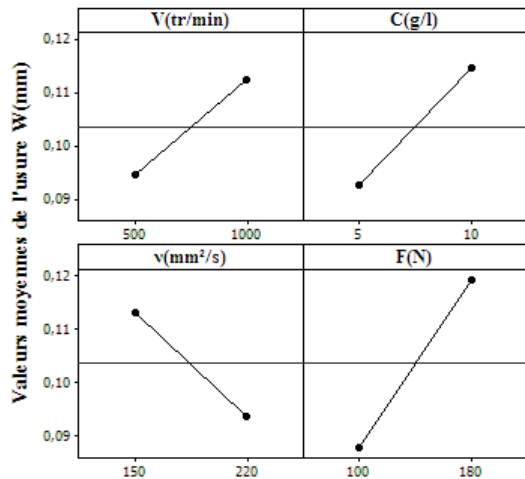
Dans la (FIG. 6) où sont représentées la différence entre les résultats expérimentaux (y observé) et les résultats obtenus par les modèles mathématiques (\hat{y} estimé) d'usure et de rugosité, on distingue qu'il y'a une bonne concordance entre expérimentation et prédiction.

La (FIG. 7) donne l'effet des principaux paramètres de fonctionnement sur les valeurs moyennes de l'usure et de la rugosité. En effet, il apparaît que l'usure moyenne (FIG. 7-a) est une fonction croissante de la charge, de la vitesse et de la concentration en polluant. Par contre elle est une fonction décroissante de la viscosité.

La (FIG. 7-b) montre pour sa part que la rugosité moyenne est une fonction croissante de la concentration en polluant et de la charge et qu'elle est une fonction décroissante de la vitesse de rotation. Il est également bien clair que la viscosité n'influe pas sur la rugosité moyenne.



a) Usure
 b) Rugosité
 FIG. 6 Confrontation des résultats expérimentaux et théoriques



a) Usure moyenne
 b) Rugosité moyenne
 FIG. 7 Effets des principaux paramètres sur l'usure et la rugosité.

Dans le tableau 2, on a évalué pour chaque modèle le coefficient de détermination R^2 . En effet, selon les résultats obtenus, on peut conclure qu'il y'a une bonne concordance entre modèles et expériences (valeurs de R^2 tendent vers 1).

Type du modèle	Equation du modèle mathématique	Coefficient de détermination, R^2
Usure de l'acier C45.	$W_{C45} = e^{-4,7037} \cdot V^{0,25} \cdot C^{0,29} \cdot v^{-0,44} \cdot F^{0,49}$	$R^2=0,9046$
Rugosité de l'acier C45.	$Ra_{C45} = e^{-1,4569} \cdot V^{0,37} \cdot C^{0,48} \cdot v^{-0,09} \cdot F^{0,59}$	$R^2=0,8941$

Tableau 2 Coefficient de détermination

4 Conclusion

L'objectif principal du travail présenté est d'une part de mieux comprendre le phénomène de la pollution solide des lubrifiants et d'autre part de voir ses conséquences sur les systèmes tribologiques (les deux corps en contact en particulier). Pour ce faire, un dispositif original qui simule les conditions de contamination les plus sévères (cas du sud algérien), a été construit. Il s'agit d'un banc expérimental où sont montées en contact une éprouvette cylindrique et une roue (contact entre deux roues cylindriques).

D'après les résultats obtenus, on peut tirer les conclusions suivantes :

- Au cours du fonctionnement, les composants machines se dégradent. Cette dégradation est évaluée par l'évolution de la température, de l'usure et de la rugosité.
- La présence des particules de sable dans un contact mécanique favorise et accélère l'avarie.
- La dégradation est plus prononcée pour un contact sec avec présence des particules de sable comparée aux résultats obtenus pour les autres types de fonctionnement.
- La présence des grains abrasifs laboure les surfaces et fait augmenter considérablement l'usure (surtout en présence des particules de forte granulométrie dans un contact sec).
- Les particules polluantes qui favorisent le frottement et l'usure, conduisent à un mauvais état de surface.
- L'usure et la rugosité de surface croît proportionnellement à la charge normale, à la vitesse de rotation, à la concentration en polluant et elles sont inversement proportionnelles à la viscosité du lubrifiant.
- D'après les valeurs du coefficient de détermination R^2 obtenus pour chaque modèle, on constate qu'ils expriment de la plus belle manière, la bonne concordance entre la théorie et l'expérimentation (valeurs de R^2 tendent vers 1).

Références

- [1] Hunt T. M., Handbook of wear debris analysis & particle detection in liquids. Elsevier Applied Science, 1993.
- [2] Akl E. S. Y., La méthode ferrographique, morphologique, avaries. Etude de la séparation morphologique des particules dans un contact hertzien lubrifié. Application aux mécanismes d'avaries, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon et Université Lyon-I, 1983.
- [3] Akl E. Y., Khalifa S. E., Flamand L., Berthe D., Investigation of wear debris associated with different stages of operation in EHD contact, Second A.S.A.T. Conférence, 671-687, 1987.
- [4] Kaneta M., Sakai T., Nishikawa H., Optical interferometric observations of the effects of a bump on point contact EHL, ASME J. of Tribology, 779-784, 1992..
- [5] Kaneta M., Nishikawa H., Local reduction in thickness of point contact EHL films caused by a transversely oriented moving groove and its recovery, ASME J. of Tribology, 635-639, 1994.
- [6] Dwyer Joyce R. S., Hamer J. C., Sayles R. S., Ioannides E., Surface damage effects caused by debris in rolling bearing lubricants, with an emphasis on friable materials, Mechanical Engineering Publications for the I. Mech. E., 17-24, 1990.
- [7] Ville F., Pollution solide des lubrifiants, indentation et fatigue des surfaces, Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 1998.
- [8] Coulon S., Prédiction de la durée de vie des contacts ponctuels lubrifiés en présence d'indentations, Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 2002.
- [9] Sari M. R., Haihem A., Flamand L., Effect of lubricant contamination on gear wear, Tribology Letters, 27, 119-126, 2007.
- [10] Sari M. R., Ville F., Haihem A., Flamand L., Effect of Lubricant Contamination on friction and wear in an EHL sliding contact, MECHANIKA, 82, 43-49, 2010.