Evaluation de la Qualité de surface par la Dimension Fractale et les Paramètres de Volume

Evaluation of surface quality by Fractal Dimension and Volume Parameters

Mounira Bourebia[*1,2], Hichem Bounezour [1], Lakhdar Laouar [1] & Hamid Hamadache[3]

[1]*Laboratoire de Mécanique Industrielle (LMI), Université Badji Mokhtar, BP12, Annaba 23000, Algérie.*
[2]*Centre de Recherche en Technologies Industrielles CRTI ex-CSC, Alger*
3 Département de Génie Mécanique, Université Badji Mokhtar, BP12, Annaba 23000, Algérie.

Soumis le 12/11/2015 *Révisé le 16/06/2016* *Accepté le 21/06/2016*

ملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم نوعية السطح من خلال البعد الفراكتلي " D" وإعدادات الحجم (VMP، VMC، VVV). تم إجراء العمل التجريبي على طريقة المعالجة الميكانيكية للسطح (الصقل بواسطة كريه) ، المطبقة على سبائك الألمنيوم التجاري . ثلاثة عوامل أخذت في الاعتبار وهي سرعة التقدم "f" قوة ضغط " Py " وقطر الكريه " Db ". وقد تم تحديد النماذج الرياضية باستخدام خطط تجارب متعددة العوامل "Box-Behenken ", لأجل التنبؤ للبعد فرا كتالي " D" و إعدادات الحجم . قد مكنت النتائج التجريبية و المحاكاة الرقمية أن الكرات ذات القطر الكبير تحت الأحمال الخفيفة وسرعة التقدم المتوسطة، تساعد على التخلص من القمم والحد من البعد الفراكتلي مما يؤدي الى تحسين الجودة من السطح.

الكلمات المفاتيحة: *الصقل بالكريه ، إعدادات الحجم ، البعد الفراكتلي ، تصميم التجارب.*

Résumé

Cette présente étude a pour but, l'évaluation de la qualité de surface par la dimension fractale "D" et les paramètres de volume (Vmp, Vmc, Vvv). Un travail expérimental a été mené au moyen du procédé de traitement mécanique de surface, en l'occurrence le brunissage à la bille, appliqué sur un matériau en alliage d'aluminium commercial. Trois paramètres du régime de traitement ont été considérés, l'avance "f", la force de pression "Py" et le diamètre de la bille "Db". Des modèles mathématiques ont été dégagés en utilisant les plans d'expériences multifactorielles de "Box-Behenken" pour la prédiction de la dimension fractale "D" et les paramètres de volumes. Les résultats expérimentaux et de simulation ont permis de montrer que les billes de diamètre important sous les faibles charges et des vitesses d'avance moyennes, favorisent l'élimination des pics et la réduction de la dimension fractale d'où l'amélioration de la qualité de la surface.

Mots clés : *brunissage, paramètres de volume, dimension fractale, plans d'expériences.*

Abstract

This study aims, the evaluation of the surface quality by the fractal dimension "D" and volume settings (Vmp, Vmc, Vvv). Experimental work was conducted by process of surface mechanical treatment; in this case ball burnishing was applied on a commercial aluminum alloy material. Three parameters of regime were considered: "burnishing feed f", "burnishing force Py" and "burnishing ball diameter Db". Mathematical models were identified using the plans of multifactorial experiments "Box-Behnken" for prediction of fractal dimension "D" and volume parameters. Experimental and simulation results have enabled to show than the large diameter ball under low loads and medium feed speeds, favors the elimination of peaks and reduction of fractal dimension whence quality improvement of surface.

Keywords: *burnishing, volume parameters, fractal dimension, experimental designs.*

[*] *Auteur correspondant : mounirabourbia@gmail.com*

©UBMA - 2016

1. INTRODUCTION

La durée de vie d'un système mécanique est fortement influencée par l'état de surface en service, et les conditions de fonctionnement [1].Sachant que tout système mécanique est composé d'un ensemble de pièces liées entre elles, et en mouvement les unes par rapport aux autres, elles sont donc soumises aux frottements. Ils nécessitent ainsi la lubrification des surfaces en contact pour éviter l'usure rapide et la détérioration des surfaces fonctionnelles [2]. En conséquence, le bon fonctionnement des pièces dépend étroitement de la qualité de leurs usinages, ainsi que de leurs finitions.

Pendant longtemps l'industrie mécanique et en particulier l'industrie automobile a cherché un moyen d'améliorer les paramètres d'état de surface. Une intention considérable a été accordée à la longueur effective de contact qui s'établit entre les aspérités des profils conjugués, ainsi plusieurs profils différents peuvent avoir la même rugosité "Ra"[3]. Cette dernière qui est estimée sur la base des hauteurs moyennes des aspérités semble moins significative pour évaluer la qualité de surface et certaines propriétés tribologiques. Afin d'apporter une meilleure appréciation, l'état de surface peut être approché par la géométrie fractale. Cette approche, s'appuyant sur un paramètre fondamental qui est la dimension fractale "D" [4] a été mise en évidence grâce à la théorie des fractales fondées par Mandelbrot [5]. Les objets fractals ont la propriété d'autosimilarité ou d'auto-affinité. Plusieurs domaines de la science et de l'ingénierie ont utilisé l'analyse fractale pour expliquer certains phénomènes [6-9], telles que les modifications de la topographie de surface due à l'usure [10] et aux frottements [11, 12]. L'industrie automobile se sert de la dimension fractale "D" pour différencier la brillance des surfaces traitées, notamment la qualité des tôles, ainsi que le degré relatif des irrégularités de surfaces [13, 14]. L'expression de la dimension fractale "D" d'un profil de surface est envisagée dans les travaux [5, 15].La dimension fractale est comprise entre $1 < D < 2$ pour un profil fractal et $2 < D < 3$ pour une surface fractale. Plus D tend vers 1 pour un profil fractal ou vers 2 pour une surface fractale [6], plus la surface est régulière, brillante et présente une meilleure qualité. La dimension fractale constitue un paramètre d'envergure, elle permet de sélectionner le régime de traitement de surface le plus adéquat, et ceci selon la fonction souhaitée qui est liée à la qualité à réaliser (brillance, lubrification, résistance à l'usure, adhésion, frottement).Par ailleurs, il existe d'autres paramètres fonctionnels qui sont d'une grande importance pour l'appréciation de la qualité de contact des surfaces et leur lubrification, tels que "Vmp" (volume de matière des pics),"Vmc" (volume de la matière du cœur, et "Vvv" (volume du vide des vallées). Ces paramètres sont l'ultime évolution des paramètres fonctionnels Rk, Rpk, Rvk (profil) et Sk, Spk,etSvk (surface), calculés sur la courbe d'Abbott[16]. Les paramètres de volume constituent des repères dans les domaines d'usure et lubrification.

La réalisation d'une surface de qualité, réside dans le choix du processus de traitement le mieux adapté et le plus efficace à long terme, [17]. En effet, les traitements mécaniques de surface (TMS) sont des procédés de finition, qui opèrent sans perte de matière et contribuent énormément dans l'amélioration de la qualité des surfaces [18]. Parmi ces procédés, le brunissage à la bille est de plus en plus répandu, très simple et peu coûteux. De plus, en agissant par déformation plastique des couches superficielles, il améliore les caractéristiques micro-géométriques de la surface [19, 20]. Cependant il offre d'autres avantages tels que : l'augmentation de la dureté, la résistance à la corrosion et à la fatigue [21, 22, 23].

De nombreux travaux de recherches [24- 28] le préconisent pour le fini d'une surface. Les effets bénéfiques du procédé sont conditionnés par l'aptitude des matériaux à subir une déformation plastique superficielle (D.P.S). Les alliages non ferreux, tels que les alliages d'aluminium, sont reconnus pour leur bonne ductilité et s'apprêtent bien à l'action du brunissage [29, 30]. Dans ce travail expérimental, des éprouvettes en alliage d'aluminium ont été soumises au traitement par brunissage, et un régime optimal a été dégagé pour chacun des paramètres "D", "Vmp","Vmc" et "Vvv". Une relation entre ces derniers et les paramètres de traitement considérés (l'avance f", la force de pression "Py" et le diamètre de la bille "Db"), a été mise en évidence par des modèles mathématiques fondés sur les plans d'expériences multifactoriels [31].

2. MATERIELS ET METHODES

2.1 Matériau

Un alliage d'aluminium commercial, dont la composition chimique a été obtenu au moyen

©UBMA - 2016

du microscope électronique à balayage la FEG.SUPRA 40. La moyenne en poids % est de 98.83% Al, 0.39% Fe, 0.35% Si et 0.12% K. La microstructure de la surface observée par microscope optique type LOM, REICHERT Poly Var 2, révèle des grains allongés dans le sens de sollicitation montrant une dispersion de phases (phases de durcissement) type Al-Si-Fe (Fig.1).L'essai de traction et de micro-dureté, ont été effectués respectivement sur la machine ZWICK 1476 LET1 et un miro-duromètre (Controlab-Digital microhardness, Tester MXT70) avec une charge d'indentation de 300grs. Les résultats ont enregistré les caractéristiques mécaniques suivantes :
R_m = 124.7MPa, $R_{p0,2}$ = 121.4MPa, A = 21.717% et 34,6 HV pour une charge de 3N.

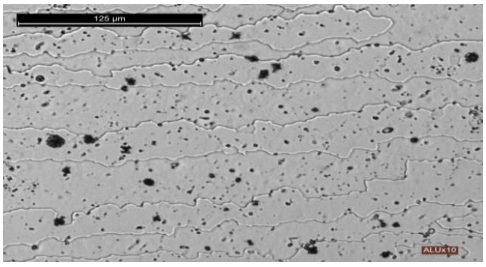

Figure 1.Microstructure de l'alliage

2.2 Préparation de l'échantillon

Un échantillon a été prélevé d'un barreau de diamètre 50mm et de longueur 500mm, préalablement préparé sur un tour 1k 62 avec un outil en carbure K16. En vue de se conformer aux plans d'expériences de Box et d'étudier l'influence des paramètres de brunissage, l'échantillon a été subdivisé en 15 paliers par des gorges de 1mm x 3mm (Fig.2). Pour une telle configuration le rapport (L/Dp), est tel que : $L^{0,75}$ / Dp≤2, ainsi le système est considéré comme rigide [32].

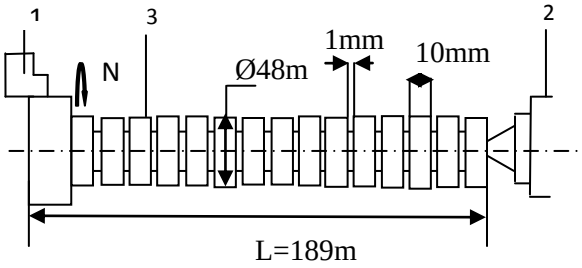

Figure 2. Montage et préparation de la pièce 1-mandrin 2- contre pointe 3- pièce

2.3 Opération de brunissage

L'opération de brunissage a été effectuée sur un tour universel Modèle 1K62 (Fig.3). Des billes en acier dur de diamètres 7mm, 10mm, et 13.5mm, ont été utilisées pour le brunissage (Fig.3 a), les couvercles ont été conçus spécialement en vue d'assurer un bon roulement de la bille en service. L'opération a été réalisée avec une fréquence de rotation de la pièce " n=224tr/mn " [28], et une seule passe sous une lubrification abondante au moyen d'une émulsion d'huile SAE20 [29] (Fig.3b). La déformation plastique des couches superficielles de la pièce est le résultat de l'action de la bille avec une force de pression Py combinée à une avance longitudinale f.

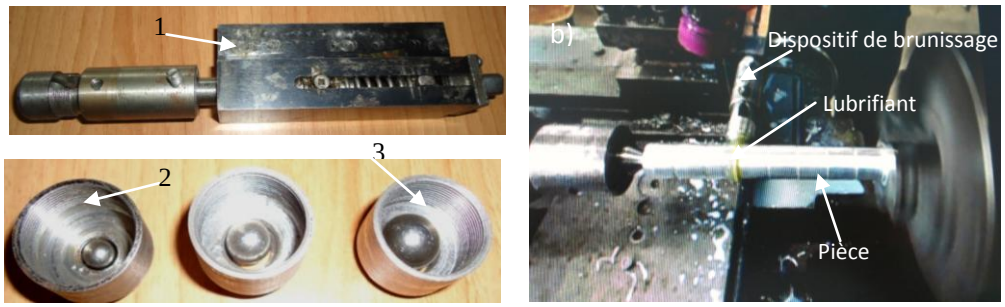

Figure 3.a) Outil de brunissage : 1) Dispositif de brunissage, 2) Couvercle 3) Bille
b) Opération de brunissage

2.4 Mesures de rugosité

L'état des surfaces pré-usinées et traitées par brunissage, a été caractérisé par les topographies et les paramètres de rugosité 3D, à l'aide d'un rugosimètre, modèle Taylor Hobson, Taly surf CCI, doté d'un logiciel d'analyse de surface Montains 4.0 (Fig. 4). Ce qui a permis d'obtenir les valeurs de la dimension fractale de surface "D", ainsi que des paramètres de volume (Vmp, Vmc, Vvv).

©UBMA - 2016

Figure 4. RugosimètreTaylor Hobson, Taly surf CCI

2.5 Méthodologie expérimentale

L'objectif de ce travail est d'étudier l'évolution de la qualité de surface en considérant le paramètre "D", ainsi que les paramètres de volume (Vmp, Vmc, Vvv). Une conception simple, conduite avec le modèle de planification d'expériences multifactorielles "plans de Box Behnken" selon le schéma de la figure 5 a été retenue pour cette étude. Chaque paramètre a trois niveaux comme le montre le tableau 1, quinze (15) expériences ont été menées avec la combinaison de valeurs indiquées dans le tableau 1.

X1 : l'avance "f"

X2 : l'effort de pression "Py"

X3 : le diamètre de la bille "Db".

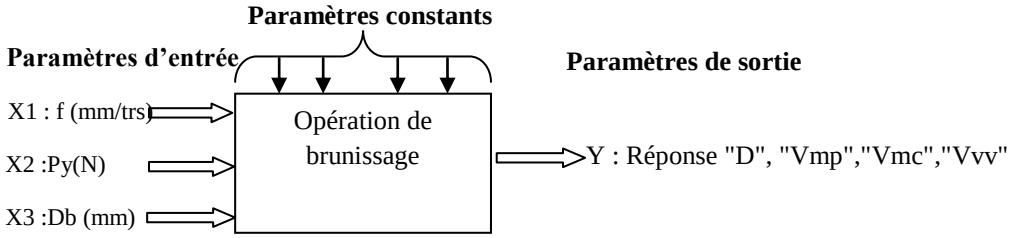

Figure 5. Schéma de l'expérimentation

Tableau 1 : Codage des paramètres de brunissage

Facteurs	Paramètres	Niveaux		
		-1	0	+1
X_1	f (mm/tr)	0.065	0.148	0.22
X_2	Py(N)	50	120	200
X_3	D_b(mm)	7	10	13.5

Les résultats expérimentaux sont illustrés sur le tableau 2.

Tableau 2. Conduite des essais et résultats expérimentaux

N°d'essai	Paramètres de traitement			Dimension fractale	Paramètres de volume		
	f (mm /tr)	Py (N)	Db (mm)	D_{moy}	Vmp ($\mu m^3/\mu m^2$)	Vmc ($\mu m^3/\mu m^2$)	Vvv ($\mu m^3/\mu m^2$)
1	0.065	50	10	2.37	0.0226	0.637	0.0835
2	0.22	50	10	2.20	0.0392	0.7391	0.0744
3	0.065	200	10	2.45	0.0613	1.5855	0.2193
4	0.22	200	10	2.59	0.0932	1.561	0.1860
5	0.065	120	7	2.49	0.0718	1.643	0.1407
6	0.065	120	13.5	2.42	0.0185	0.473	0.0588
7	0.22	120	7	2.44	0.0657	1.455	0.0918

©UBMA - 2016

8	0.22	120	13.5	2.35	0.0226	1.248	0.0948
9	0.148	50	7	2.39	0.0127	0.787	0.1373
10	0.148	200	7	2.42	0.0313	2.721	0.3200
11	0.148	50	13.5	2.41	0.013	0.486	0.0736
12	0.148	200	13.5	2.35	0.0228	0.846	0.1181
13	0.148	120	10	2.34	0.0586	0.789	0.1332
14	0.148	120	10	2.11	0.0451	0.814	0.1005
15	0.148	120	10	2.34	0.0602	2.036	0.1364

Ces résultats sont utilisés pour en déduire des modèles mathématiques permettant la prédiction des paramètres, D, Vmp, Vmc et Vvv. Le traitement des données est réalisé selon un algorithme développé dans les travaux [27].

3. SIMULATION NUMERIQUE

3.1 Traitement des données

Cette partie présente le traitement numérique des résultats expérimentaux du tableau2, et l'élaboration des modèles mathématiques pour chacun des paramètres (D, Vmp , Vmc , et Vvv), en fonction des trois paramètres considérés du régime de traitement (f, Py, Db). Les modèles mathématiques relèvent des plans de Box Behnken qui sont des modèles de second degré avec les interactions d'ordre deux [31] comme indiqué dans l'équation (1) :

$$\hat{y}= a_o+a_1x_1+a_2x_2+a_3x_3+a_{12}x_1x_2+a_{13}x_1x_3+ a_{23}x_2x_3+a_{11}x_1^2+a_{22}x_2^2+a_{33}x_3^2+e \quad (1)$$

La résolution numérique de cette équation a permis de calculer les paramètres suivant :

a) La dimension fractale "D" équation (2) soit :

$$\hat{D}= 2.2633+(-0.01875)*x1+(0.055)*x2+ (0.02625)*x3+(0.0775)*x1x2+(-0.005)*x1*x3+ (- 0.0225)*x2*x3+(0.085833)*(x1)^2+ (0.053333)*(x2)^2+(0.075833)*(x3)^2+e \quad (2)$$

Avec R^2= 0.99

Il en résulte une solution optimale (valeur minimale de D) caractérisée par :
D_{op}= 2.23±0.069 pour un régime de traitement équivaut à :
f=0.181 mm/trs, P_y=59.89N et Db=10.44mm.

b) Le volume de matière des pics "Vmp" équation (3) soit :

$$\hat{Vmp}=0.054633+(0.0058125)*x1+ (0.015138)*x2+(0.013075)*x3+(0.003825)*x1x2+ (0.00255)*x1*x3+(-0.0022)*x2*x3+(0.012071)*(x1)^2 +(-0.012629)*(x2)^2+(-0.022054)*(x3)^2+e \quad (3)$$

Avec R^2=0.94

Le volume optimal des pics (valeur minimale de Vmp) est :
Vmp_{op}=-0.0064±0.017 ($\mu m^3/\mu m^2$)
correspondant au régime de traitement :
f= 0.127mm/tr, Py=50N et Db=13.5mm.

c) Le volume de matière du cœur "Vmc" équation (4) soit :

$$\hat{Vmc}= 1.213+(0.083125)*x1+(0.508)*x2+ (0.44412)*x3+(0.0315)*x1x2+(0.24075) *x1*x3+ (-0.3935)*x2*x3+(-0.043875)*(x1)^2 +(-0.038625)*(x2)^2+(0.035625)*+e \quad (4)$$

Avec R^2=0.95

Le volume optimal du cœur correspond à la valeur maximale de la fonction et est égale à : Vmc_{op}=2.70±0.57 ($\mu m^3/\mu m^2$) pour le régime de traitement :
f= 0.065mm/tr, Py=200N et Db=7mm.

d) le volume du vide des vallées "Vvv" équation(5) soit :

$$\hat{Vvv}=0.12337+(0.006925)*x1+(0.059338)*x2+ (0.043063)*x3+(0.006025)*x1x2+ (0.021225) *x1*x3+(-0.03455)*x2*x3+ (0.024158)*(x1)^2+(0.041567)*(x2)^2+ (0.0026833)*(x3)^2+e \quad (5)$$

Avec R^2=0.98

Le volume du vide des vallées optimale est exprimé par la valeur maximale et est donnée par :
Vvv_{op}=0.314±0.032 ($\mu m^3/\mu m^2$) sous le régime de traitement suivant : f= 0.087mm/tr, Py=200N et Db=7mm.

3.2 Résultats et discussion

3.*2.1 Effet des paramètres de traitement sur la dimension fractale*

L'effet du diamètre de la bille sur la dimension fractale "D'' à différentes charges (Py) et vitesses d'avance (f), peut être évalué à partir des courbes (Fig.6). On peut observer que pour une bille de diamètre Db= 7mm (Fig.6a), la dimension fractale D tend à diminuer pour les faibles charges (Py=50N) associées aux avances

©UBMA - 2016

moyennes et maximales, atteignant une valeur inférieur à 2.35, signifiant ainsi une amélioration de l'état de surface. Par contre, quel que soit la vitesse d'avance combinée avec les grandes charges (Py=200N), la dimension fractale D converge vers une valeur maximale supérieure à 2.5, engendrant ainsi des irrégularités au niveau de la surface traitée, ce qui est constaté sur la topographie de surface (Fig.7a). Ceci peut être expliqué par l'importance de la composante radiale (Py_r) favorisant la bille de petit diamètre à pénétrer dans la matière, qui par effet d'indentation altère l'état de surface.

Toutefois l'utilisation d'une bille de diamètre Db= 10mm (Fig.6b) confirme le fait que ce sont les faibles charges et les valeurs d'avances moyennes et maximales, qui ont un effet bénéfique sur la surface. Ceci est dû à l'importance de l'effort axiale (Pya) par rapport à l'effort radiale (Pyr), favorisant ainsi la déformation des aspérités dans le sens longitudinal en permettant un meilleur lissage de la couche superficielle où la dimension fractale atteint sa valeur minimale de 2.11, ce qui est observé sur la topographie de surface (Fig.7b). En revanche les fortes charges sont défavorables pour la surface et tendent à augmenter la dimension fractale D.

L'emploi d'une bille de 13.5mm (Fig.6c) à des effets comme les cas précédents où D peut atteindre une valeur optimale de 2.32, donc un grand diamètre de la bille offre la possibilité de repousser plus de matière permettant le nivellement des aspérités au niveau de la surface traitée, ce qui est constaté sur la cartographie de surface (Fig.7c).

En général, la dimension fractale D est comprise entre 2 < D<3, plus D tend vers 2 plus la surface est lisse et régulière [5]. Pour minimiser D, il est recommandé d'utiliser un diamètre de bille moyen Db=10mm avec des faibles charges (Py=50N), des avances moyennes et même maximales (f=0.148mm /trs, f= 0.22mm/trs).

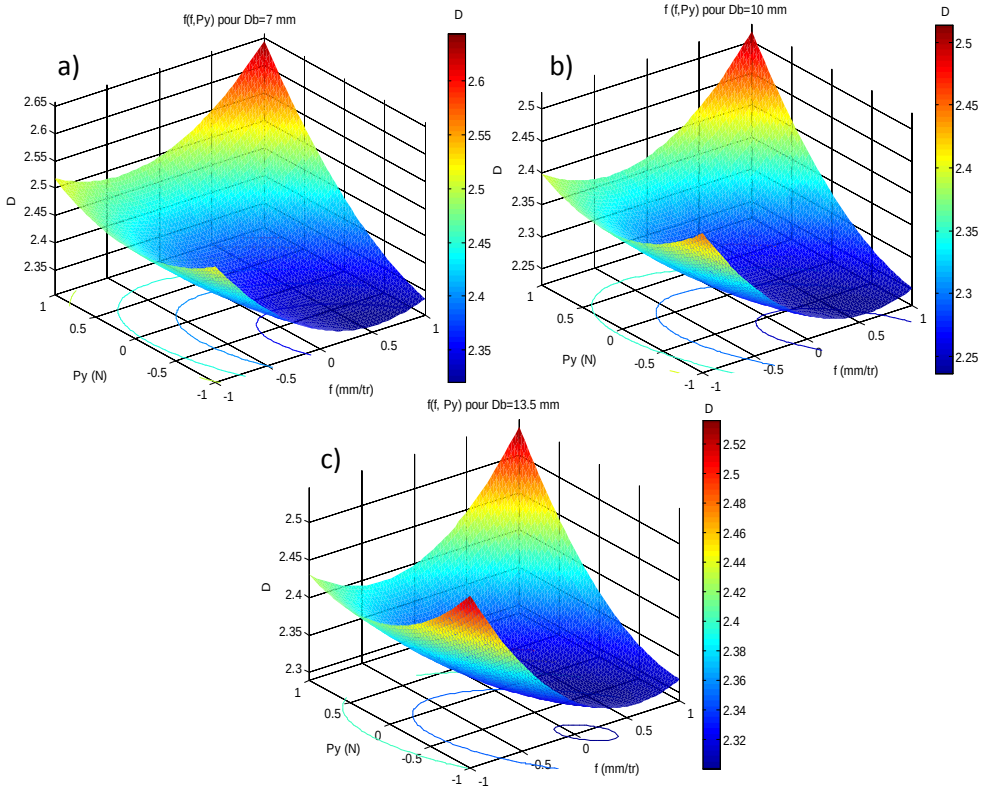

Figure 6. Effet de la force de pression et de l'avance sur la dimension fractale D pour : Db=7mm, Db=10mm, Db=13.5mm

©UBMA - 2016

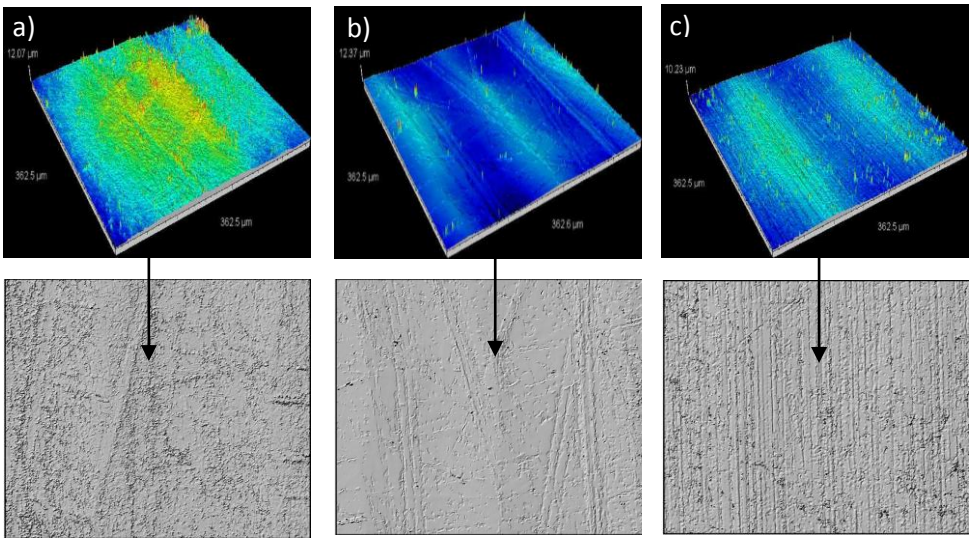

Figure 7. Dimension fractale des topographies des surfaces traitées pour :
a) D=2.59, b) D=2.11, c) D=2.20

3.2.2 Effet des paramètres de traitement sur le volume de la matière des pics Vmp

Le volume de matière des pics Vmp est un paramètre très important en tribologie, en particulier pour les surfaces travaillant en contact afin d'augmenter la portance, ce qui est bénéfique lors du rodage. Ce travail expérimental vise à minimiser ce paramètre en optimisant les éléments du régime de traitement (f, Py, Db). En effet en observant les courbes (Fig.8), on constate que l'avance n'a pas d'influence par rapport à la charge. La diminution de la charge favorise l'élimination des pics d'où la diminution de Vmp, le meilleur résultat Vmp = 0.005 $\mu m^3/\mu m^2$ est obtenu avec une bille de 13.5mm, une charge Py=50N et une vitesse d'avance f=0.065mm/tr. Ceci peut être interprété par le fait qu'un diamètre de bille important permet de lisser une plus grande surface en écrasant un plus grand nombre de pics, générant ainsi une surface plus régulière.

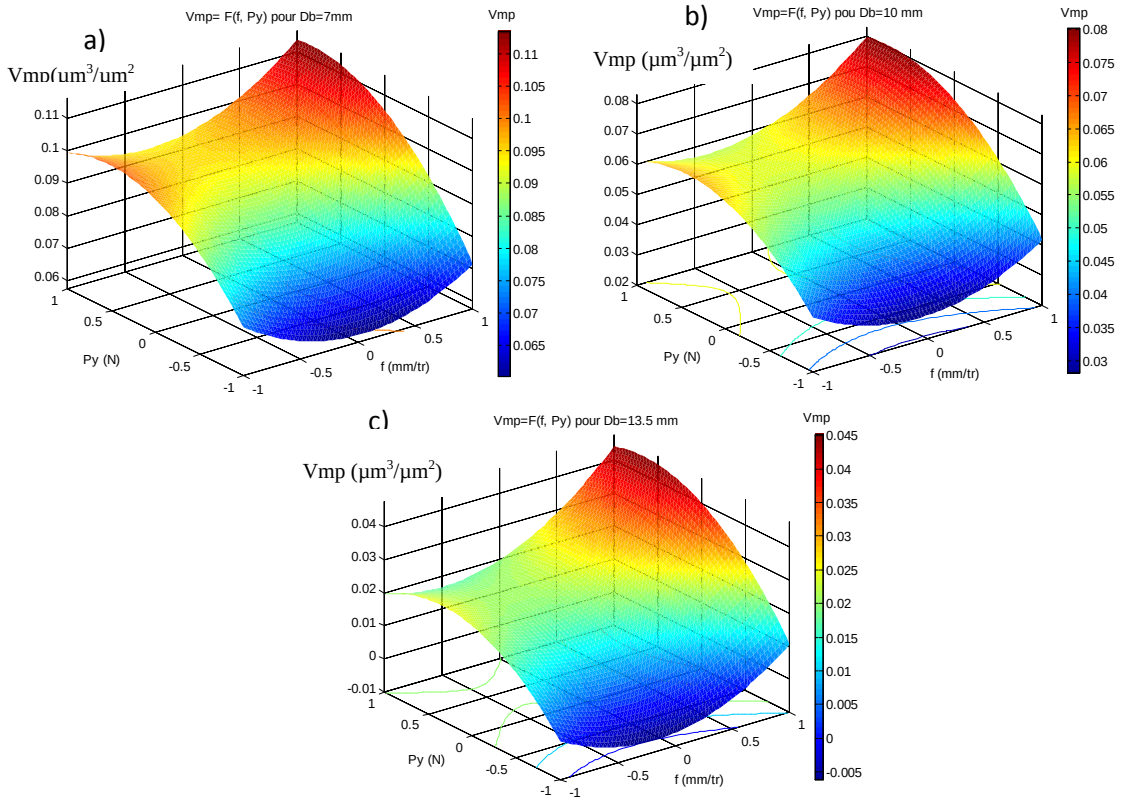

Figure 8. Effet de la force de pression et de l'avance sur Vmp pour :
Db=7mm, Db=10mm, Db=13.5mm

©UBMA - 2016

3.2.3 Effet des paramètres de traitement sur le volume de matière du cœur Vmc

Le paramètre Vmc est capital car il détermine la quantité de matière qui résiste à la fatigue et à l'usure durant un cycle de travail de la surface [33], plus Vmc augmente plus la surface résiste mieux à la fatigue. L'effet des paramètres du régime de traitement sur Vmc peut être estimé à partir des courbes illustrées dans la (Fig.9). La tendance générale des résultats révèle que pour les diamètres de bille Db= (7mm, 10mm) respectivement (Fig.9a, b), la vitesse d'avance n'influe pas sur Vmc. Ce dernier peut atteindre la valeur maximale Vmc=2.5µm^3/µm^2 en utilisant les charges importantes (Py=200N) combinées à une avance (f=0.065mm/tr) et un diamètre (Db=7mm). Par conséquent, les fortes charges sont favorables parce que l'action de la bille de brunissage est plus grande et l'écoulement de la matière est plus régulier à des faibles avances. Par ailleurs l'application de la bille de diamètre Db=13.5mm (Fig.9c) associée à une vitesse d'avance maximale (f=0.22mm/t), quel que soit la charge, occasionne des valeurs de Vmc plus importante. Ce qui n'est pas le cas pour les faibles valeurs d'avance, où on observe une diminution considérable de Vmc ; ce qui s'explique par le fait, qu'un rayon important de la bille associé à une faible avance, sous la pression provoque un écrasement des crêtes d'où un entassement des couches superficielles, provoquant la diminution de Vmc.

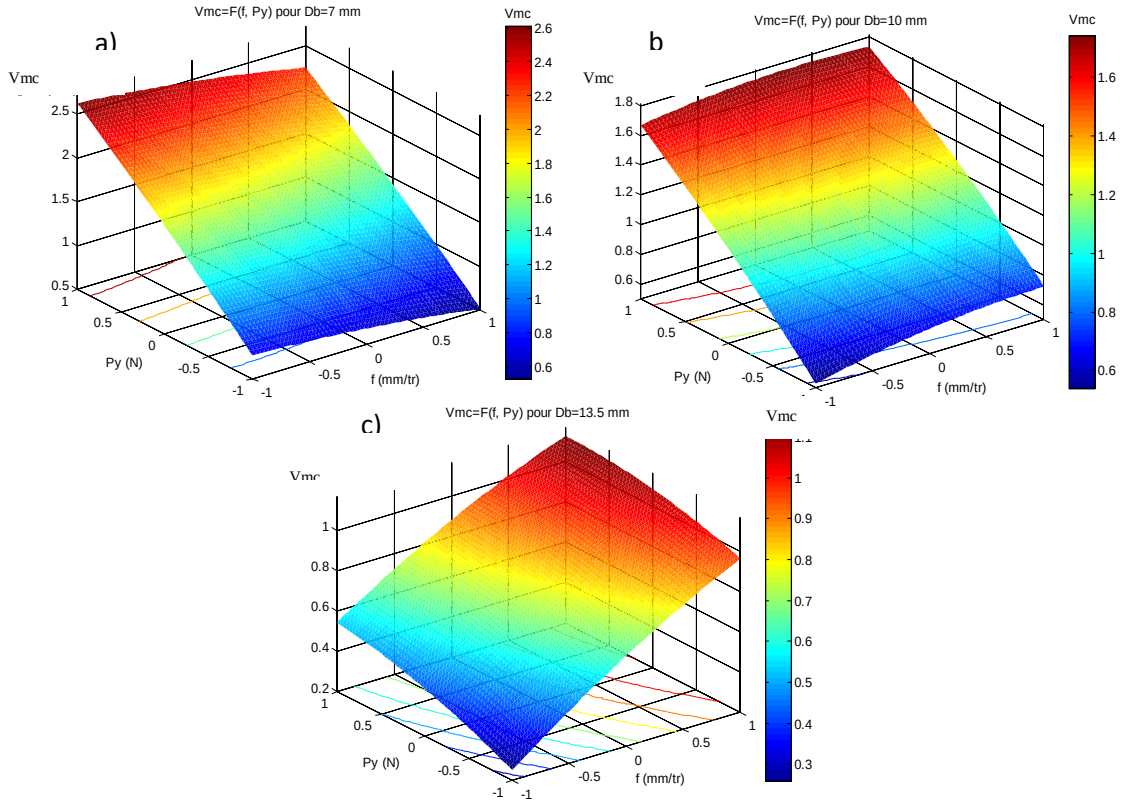

Figure 9. Effet de la force de pression et de l'avance sur Vmc pour : Db=7mm, Db=10mm, Db=13.5mm

3.2.4 Effet des paramètres de traitement sur le volume du vide des vallées Vvv

Dans le domaine de lubrification, le volume du vide des vallées "Vvv" est un élément d'envergure, plus il augmente plus la surface à des réserves pour retenir le lubrifiant [34], ce qui va permettre de diminuer les frottements et préserver l'état des surfaces en contact. La figure 10 présente l'effet des paramètres de brunissage (f, Py ,Db) sur Vvv. Les résultats montrent que la charge (Py) et le diamètre Db de la bille de brunissage, sont les facteurs les plus importants, affectant le paramètre Vvv. L'allure générale de ces courbes indique que la vitesse d'avance n'a pas d'effet significatif, par contre, les charges élevées (Py=200N) associées au faible diamètre de bille (Db=7mm) (Fig.10a) engendre une valeur Vvv importante atteignant 0.3µm^3/µm^2. Ceci s'explique par le fait que les fortes charges assurent une meilleure pénétration des billes de petit diamètre, ce qui a pour effet de générer des poches servant de

©UBMA - 2016

retenue de lubrifiant [34] indispensable aux surfaces travaillant en frottement. A l'inverse, l'application des diamètres importants de bille (10mm, 13.5mm), le paramètre de volume Vvv diminue, par le fait que la matière est beaucoup plus repoussée dans les vallées sous l'effet de la charge (Fig.10b et c) provoquant un entassement des couches superficielles du métal.

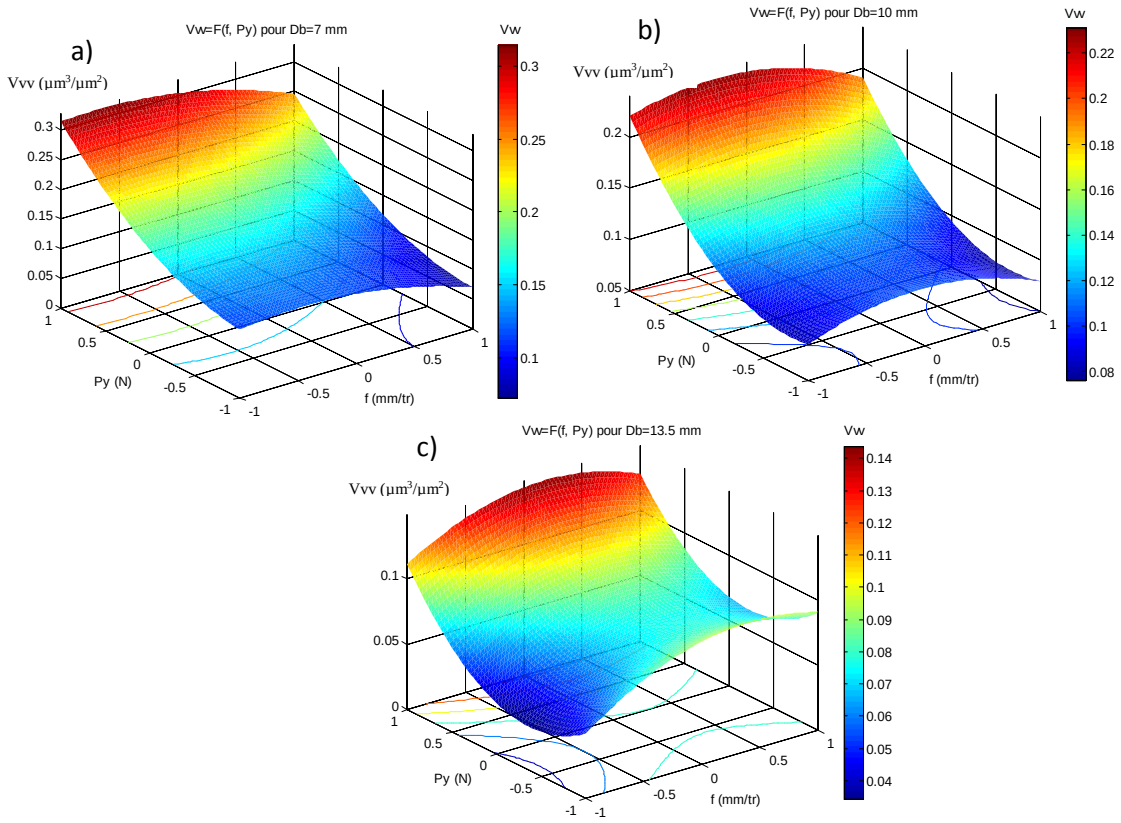

Figure 10. Effet de la force de pression et de l'avance sur Vvv pour :
Db=7mm, Db=10mm, Db=13.5mm

4.CONCLUSION

La qualité de surface ainsi que les paramètres de volume, sont influencés par de nombreux facteurs. L'amélioration du fini d'une surface, repose sur le contrôle des conditions de traitement et la manière de contrôler les résultats. Le présent travail a abouti aux conclusions suivantes :

- La qualité de surface de pièces en alliage d'aluminium peut être améliorée par le procédé de brunissage par suite du contrôle par la dimension fractale ;
- Les charges faibles, combinées aux valeurs d'avance moyennes ou même maximales, appliquées sur un diamètre de bille moyen (Db=10mm), permettent de minimiser la dimension fractale D, d'où l'amélioration de la qualité de surface ;
- Il a été montré qu'une bille de grand rayon soumise à de faibles pressions et des vitesses d'avance réduites, favorise l'élimination des pics en diminuant le paramètre Vmp ;
- Il est aussi recommandé d'utiliser une bille de petit diamètre avec de fortes charges combinées aux faibles valeurs d'avances pour accroître les paramètres Vmc et Vvv ;
- Les plans d'expériences peuvent constituer un outil de grande envergure pour prédire les régimes de traitement les plus adaptés, permettant ainsi de réaliser une meilleure qualité de surface. En effet, les modèles mathématiques établis sont utiles pour l'amélioration de la qualité des réponses des surfaces traitées, ainsi que la prédiction des paramètres d'entrée (régime de traitement) ;
- La prédiction de la dimension fractale permet de sélectionner les paramètres du régime les plus appropriés pour obtenir une meilleure qualité de surface. Par ailleurs, les paramètres de

©UBMA - 2016

volume (Vmp, Vmc, Vvv) prédits, contribuent à déterminer les propriétés tribologiques de la surface à réaliser, en offrant au fabricant la possibilité de choisir le régime de traitement le plus adéquat.

En perspectives :

- il serait intéressant d'introduire l'approche fractale pour l'amélioration de la portance, l'étude et l'estimation de l'aire de contact surfacique ;
- Envisager l'intérêt des paramètres de volume vis-à-vis de l'usure des surfaces travaillant en contact.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier les institutions suivantes : le Laboratoire de Génie des Matériaux de l'Université Badji Mokhtar/Annaba, P. Institut Premier, UPR 3346, département de mécanique et complexes des systèmes, ENSMA Université de Poitiers(France) -Nos remerciements vont également aux personnels d'essais mécaniques de URASM/ CSC-Alger et du Laboratoire LEM3 de Metz/ France.

REFERENCES

[1] Pierre S., 2009. Influence de la rugosité en fatigue de contact – rôle du rodage, Thèse de Doctorat, Ecole polytechnique, INSA Lyon, France, 33.

[2] Bourebia M & Laouar L., 2010. Procèdes d'usinage-effet sur la rugosité de surface, proceeding de la Première Conférence Internationale sur la Mécanique Avancé, Annaba, Algérie.

[3] Gaëtan L.G., 2012. Qualité géométrique & aspect des surfaces : Approches Locales et globales, Thèse de Doctorat, Université de Grenoble, France.

[4] Mandelbrot B., 1983. La géométrie fractale de la nature. Freeman, New York, 1-83.

[5] Cornet A., Deville J.P., 1998. Physique et Ingénierie des Surfaces EDP Sciences, 327-330.

[6] El-Sonbaty I.A., Khashaba U.A., Selmy A.I & Ali A.I., 2007. Prédiction de profils de rugosité de surface pour des surfaces broyées à l'aide d'un réseau de neurones artificiels et l'approche la géométrie fractale, *Journal of Materials Processing Technology* (200), 271-278.

[7] Demircia I., Mezghania S., Yousfia M., Zahouanic H & El-Mansoria M., 2013. Influence of scale roughness on friction in lubricated contacts, proceeding du 22ème Congrès Français de Mécanique (*Irevue, AFM*), Bordeaux. France.

[8] Qiuping Y., Jianjun S., Bo Yu & Chenbo Ma., 2016. A Fractal Model of Mechanical Seal Surfaces Based on Accelerating Experiment, Journal *Tribology Transactions.*

[9] JunZhu Y ., Wen-F.D., Jiu H & Yu-C.F., 2015. Surface fractal evolution of fracture behavior of polycrystalline CBN grains in high-speed grinding, *International Journal Advances Manufacturing Technology* 76, 1505–1513.

[10] Yin X & Komvopoulos K., 2010. An Adhesive Wear Model of Fractal Surfaces in Normal Contact. *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 47, N°7-8, 912 - 921.

[11] Paggi M & C.He Q., 2016. Evolution of the free volume between rough surfaces in contact, *Wear*, Vol.336, 86-95.

[12] Song Z & Komvopoulos K ., 2014.Contact mechanics analysis of oscillatory sliding of a rigid fractal surface against an elastic–plastic half-space, *Journal Philosophical Magazine* Volume 94, Issue 28, 3215-3233.

[13] Bigerelle M & al., 2013. Signature contacts tribological roughness calculated by a new peak radius of curvature estimation on fractal surfaces, *tribology international* Volume 65 , 235-247.

[14] Bigerelle M., 2014. Un système expert pour l'analyse des surfaces rugueuses, Mesrug.System, http://www.utc.fr/mesrug/, roberval.utc.fr/IMG/pdf/plaquette_version4.pdf.

[15] Gailly P., 2011. Etude de l'évolution de l'état de surface de matériaux optiques sous bombardement ionique à faible énergie, thèse de doctorat, Université de Liège – Centre Spatial de Liège, Belgique.

[16] Khawaja Z., 2014. Analyse des états de surface en science des matériaux: caractérisation multi-échelles par ondelette et Détermination de l'anisotropie des surfaces, thèse de doctorat, Université de Technologie de Compiègne, France.

[17] Bourebia M., 2010. Influence des procédés d'usinage sur les rugosités de surface et leurs répercussions sur un contact mécanique, mémoire de magistère en Génie Mécanique, université Badji Mokhtar Annaba.

[18] Chomienne V. & al., 2016. Influence of ball burnishing on residual stress profile of a 15-5PH stainless steel. CIRP *Journal of Manufacturing Science and Technology* 13, 90–96.

[19] Hamadache H., Zemouri Z., Laouar L & Dominiak S., 2014. Improvement of surface conditions of 36 Cr Ni Mo 6 steel by ball burnishing process. *Journal of Mechanical Science and Technology* 28 (4) 1491~1498.

[20] Bourebia M & Laouar L., 2015. Influence des paramètres de traitement par brunissage sur la texture de la surface, proceeding du 22ème Congrès Français de Mécanique, (*Irevue, AFM*), Lyon, France.

[21] Hamadache H., Laouar L & Chaoui K., 2006. Influence Des Traitements Mécaniques De Surface sur La Rugosité, La Dureté et la Résistance a L'usure d'un Acier (RB40), *Revue des sciences et de la technologie Synthèse* N° 15, 120-127.

[22] El-Axir M.H., Othman O.M & Abodiena A.M., 2008. Improvements in out-of-roundness and microhardness of inner surfaces by internal ball burnishing process, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 196, Issues 1–3, 120-128.

[23] Laouar L., Hamadache H & Mekhilef S., 2005. Influence du traitement mécanique par brunissage sur la

©UBMA - 2016

tenue à l'usure de l'acier (RB40) produit à Sider , Revue des sciences et de la technologie Synthèse N° 14, 55-61.

[24] Hiegemann L., Weddeling C., Ben Khalifa N & Tekkaya A.E., 2015. Prediction of roughness after ball burnishing of thermally coated surfaces, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 217, Pages 193-201.

[25] Hiegemann L., Weddeling & Erman Tekkaya A., *2016.* Analytical contact pressure model for predicting roughness of ball burnished surfaces, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 232, 63-77.

[26] Dabeer PS & Purohit GK., 2010. Effect of ball burnishing parameters on surface roughness using surface roughness, *methodology production engineering and management*, 111-116.

[27] Laouar L., Hamadache H., Saad S., Bouchelaghem A & Mekhilef S., 2009. Mechanical surface treatment of steel-Optimization parameters of regime, *Physics Procedia* 2, 1213-1221.

[28] Bourebia M., Laouar L & Hamadache H., 2013. Amélioration de la qualité de surface par le procédé de brunissage, proceeding du 21ème Congrès Français de Mécanique, , (*Irevue, AFM*), Bordeaux, France.

[29] ElAxir M H., & al., 2008. Study on the inner surface finishing of aluminum alloy 2014 by ball burnishing, *Journal of Materials Processing Technology*, 202, 435–442.

[30] Bourebia M., Laouar L., Hamadache H & Bouchelaghem A., 2014. Traitement Mécanique de surface - Effet sur la dureté superficielle d'un alliage d'aluminium, Proceeding de la VIIIèmes Journées d'Etudes Techniques – JET', Marakech, Maroc.

[31] Goupy J., 1999. Plan d'expériences pour surface de réponse, collection Dunod.

[32] Dietrich R., Garsaud D., 1981. Précis de méthodes d'usinage Edition Fernand Nathan.

[33] Norme ISO 13565-2, Caractérisation des hauteurs par la courbe de taux de longueur portante (courbe d'Abbott) http://www.mip2.insa-lyon 2015.fr/Etats de surface/méthodes, 2015.

[34] Paramètres surfaciques d'état de surface, Digital Surf

http://www.digital-surf.com/fr/guidearealfieldparameters.html,2016.

NOMENCLATURE

D *: Dimension fractal ;*

Dp : Diamètre de la pièce (mm);

L : Longueur de la pièce (mm);

Db : Diamètre de la bille (mm);

Py : Force de pression (N);

f : L'avance (mm/trs);

$\hat{y}$ *: Réponse prédite par le modèle;*

a_0 *: La valeur de la réponse à l'origine du repère;*

$\hat{D}$ *: Dimension fractale prédite ;*

e : Erreur du modèle;

D_{moy} *: valeur moyenne de la dimension fractale;*

D_{op} *: Dimension fractale optimale;*

Vmp : volume de matière des pics ($\mu m^3/\mu m^2$);

Vmc : volume de la matière du cœur ($\mu m^3/\mu m^2$;

Vvv : volume du vide des vallées ($\mu m^3/\mu m^2$);

©UBMA - 2016