

## **Effets du Traitement Par Galetage sur la tenue à l'usure de l'acier (RB40)<sup>1</sup>**

**L. Laouar<sup>2</sup>  
Abou-Saleh Nazih<sup>4</sup>**

**M. Labaiz<sup>3</sup>  
H. Hamadache<sup>5</sup>**

### **Résumé**

La plupart des pièces des machines tournantes sont sollicitées en rotation à des charges engendrant un phénomène de fatigue et en travaillant en contact avec d'autres pièces, elles finissent par se dégrader à cause du phénomène d'usure. Ces pièces nécessitent à cet effet un matériau à hautes caractéristiques mécaniques et une gamme d'usinage bien adaptée. Ces deux solutions bien qu'elles soient techniquement acceptables, ne garantissent pas un bon indice économique. Dans ce travail, nous avons opté pour un matériau ordinaire en l'occurrence : l'acier RB-40 auquel nous avons appliqué un traitement de galetage comme opération de finition. En plus des améliorations des caractéristiques mécaniques qu'il offre, ce procédé améliore nettement les défauts micro et macro géométriques. Il peut donc remplacer l'opération de parachèvement classique qui est la rectification.

<sup>1</sup> For the paper in Arabic see pages (91-92).

<sup>2</sup> Laboratoire de Mécanique Industrielle, Faculté des sciences de l'ingénieur, Université Badji Mokhtar -Annaba- Algérie.

<sup>3</sup> Laboratoire de Mécanique Industrielle, Faculté des sciences de l'ingénieur, Université Badji Mokhtar -Annaba- Algérie.

<sup>4</sup> Damascus University, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, DAMAS - SYRIA.

<sup>5</sup> Laboratoire de Mécanique Industrielle, Faculté des sciences de l'ingénieur, Université Badji Mokhtar -Annaba- Algérie.

## 1. Introduction

Toute pièce à usage mécanique doit présenter des propriétés mécaniques suffisantes pour satisfaire à des exigences précises selon l'utilisation. Parfois, les entreprises de construction mécanique rencontrent des difficultés pour le choix du matériau destiné à la fabrication des différentes pièces de machines dont on cherche toujours l'amélioration de la durée de vie, ce qui les oblige à importer ce matériau de l'étranger ; ceci a pour conséquence la diminution de l'indice technico-économique. Pour remédier à ce problème, on fait appel aux méthodes de fabrication qui permettent d'aboutir aux caractéristiques mécaniques souhaitées, tout en utilisant le matériau disponible ; ceci représente l'objectif à atteindre par l'étude présentée dans ce travail.

Ce travail porte sur l'emploi d'un acier auquel on fait subir un traitement mécanique par déformation plastique superficielle (DPS) en l'occurrence le galetage. Le galetage est un traitement mécanique de surface [1, 2] qui met en évidence une déformation plastique à froid des couches superficielles. Ce procédé conduit en général à une surface caractérisée par une faible rugosité [3-6], un écrouissage des couches superficielles [7, 8] et des contraintes résiduelles de compression [9, 10]. De ce nouvel aspect se déduit une amélioration de la tenue en fatigue et une tenue à l'usure des couches superficielles [11, 12].

Lors du galetage d'un acier de qualité standard, certains travaux ont révélé une amélioration de la rugosité d'environ 91% alors que la dureté a augmenté d'environ 10% [4]. La tenue en fatigue a augmenté de 40%. En tenant compte de la perte de masse, il a été constaté une amélioration de la tenue à l'usure de 98% par rapport au tournage [13]. Toutefois, l'effet du galetage dépend fortement des paramètres d'entrée et de la conception du dispositif [6, 14, 15]. Les réponses de sortie dépendent en grande partie d'une combinaison spécifique des différents paramètres envisagés en fonction des outils [6, 7], du matériau traité [1, 16, 11], des contraintes de travail ainsi que l'état initial des couches superficielles [17]. Dans le même contexte, notre étude se concentrera sur l'application de ce type de traitement sur des éprouvettes préparées par tournage à l'aide des régimes recommandés, sachant en se référant aux travaux déjà faits que le procédé favorise un meilleur état de surface et permet d'obtenir une dureté superficielle importante. Par ailleurs, nous examinerons la tenue à l'usure vis à vis de la rugosité et de la dureté

superficielle, des pièces tournées en comparant les résultats obtenus avec ceux sur des éprouvettes traitées par galetage.

## 2. Matériau et techniques expérimentales

### 2.1 matériau

Le matériau étudié est un acier livré par l'entreprise Arcelor Mittal steel de Annaba (Algérie) à l'état brut (sous la désignation RB40). Les analyses réalisées dans le laboratoire nous ont permis de déterminer :

#### a) Composition chimique

Une analyse chimique effectuée par absorption atomique a permis de révéler les constituants suivants : 0.34% de carbone, 1.25% de manganèse, 0.16% de silicium avec des traces de soufre (0.03%) et de phosphore.

#### b) Microstructure

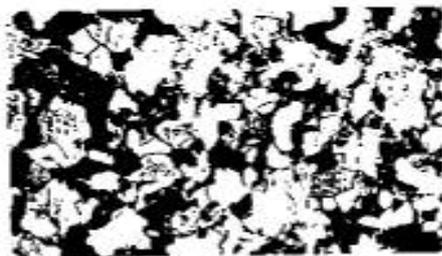


Fig.1 microstructure vue au grossissement 600X

La microstructure de l'acier Rb-40 a été mise en évidence au moyen d'une attaque chimique au Nital (4%HNB) sur un échantillon préalablement poli. Une observation au microscope optique effectuée avec un grossissement de 600X a révélé la présence de grains de ferrite et de perlite (fig.1).

#### c) Caractéristiques mécaniques

Les caractéristiques mécaniques du matériau ont été évaluées à l'aide d'un essai de traction effectué sur un barreau cylindrique prélevé du matériau en question. L'essai a permis d'enregistrer les propriétés suivantes :

- la limite élastique,  $\sigma_e = 44.74$  [ daN / mm<sup>2</sup> ]
- la résistance à la rupture,  $\sigma_r = 61.25$  [ daN / mm<sup>2</sup> ]
- l'allongement  $A = 20.6\%$

## 2.2 Préparation des éprouvettes

Les éprouvettes sous forme de barreau de  $\varnothing 10$  mm (fig.2) sont préparées par tournage avec un outil à charioter coudé à plaquette rapportée en carbure métallique de nuance P10 (d'après ISO), ayant les caractéristiques géométriques suivantes :

$$\gamma = 25^\circ ; \alpha = 5^\circ ; \varphi_1 = \varphi_2 = 45^\circ$$

Les régimes de coupe utilisés lors de l'opération de finition sont :

$N=500-1400$  trs/min ;  $a = 0.08 - 0.11$  mm/tr ;  $t = 0.075 - 0.25$  mm

Compte tenu de l'hétérogénéité du matériau et de l'usinabilité différente des éprouvettes, ce régime de coupe peut être corrigé de façon à cibler une rugosité de  $3,2 \mu\text{m}$  qui conduit à une efficacité du galetage [8].

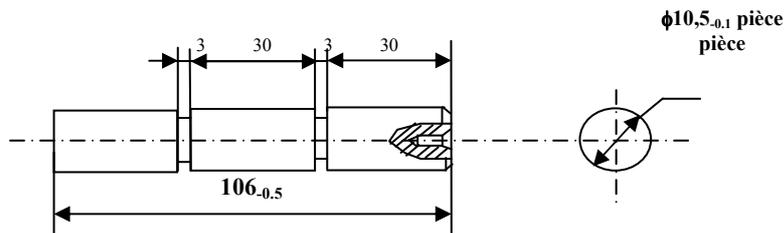


Fig.2 éprouvette préparée par tournage

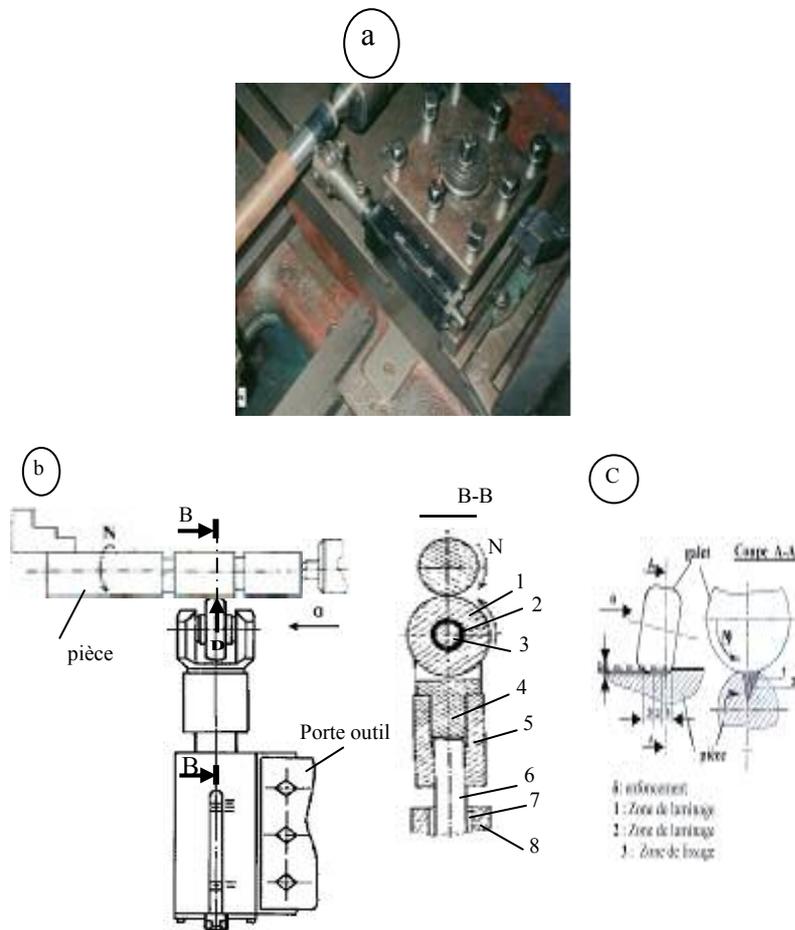
## 2.3 Mesure de rugosité

Les mesures de rugosité ont été effectuées au moyen d'un rugosimètre muni d'un palpeur et à affichage digital de marque (Rugotest TR100), capable de transcrire le signal reçu en valeur  $R_a$  et  $R_z$  avec une tolérance de  $\pm 15\%$ . Les plages de mesure sont respectivement de  $0,05$  à  $10 \mu\text{m}$  et de  $0,1$  à  $50 \mu\text{m}$ . La longueur de mesure est de l'ordre de  $6$  mm.

## 2.4 Techniques de galetage:

L'opération de galetage est effectuée sur un tour au moyen d'un dispositif (fig.3), la partie active est un galet cylindrique de  $\varnothing 36$  mm avec un arrondi  $R=2$  mm. Le galetage simule une opération de rectification ; dans la mesure où le mouvement de pénétration est obtenu par l'action du rouleau (ou galet) sous l'effet d'un effort réglable (ou pression de déformation) «  $P$  ». Le mouvement de formage est obtenu par la rotation de la pièce alors que l'avance longitudinale est attribuée au galet qui lui est communiqué par l'intermédiaire du chariot longitudinal.

Compte tenu du dégagement de chaleur dans la zone de traitement résultant du frottement entre le galet et la pièce, l'opération de galetage est effectuée dans les conditions de lubrification au moyen d'une solution aqueuse composée d'une huile SAE90.



**Fig.3 Dispositif de formage**

**a) photo du montage sur tour, b) schéma de l'opération de galetage, c) principe de galetage ; 1-galet ; 2-bague en bronze ; 3-axe ; 4-porte galet ; 5-bague d'assemblage ; 6-tige ; 7-manchon guide ; 8-corps**

Le régime de galetage est déterminé d'après les caractéristiques mécaniques initiales de la pièce. Tenant compte que le matériau admet une dureté initiale HRB=81-86, le régime recommandé est le suivant :

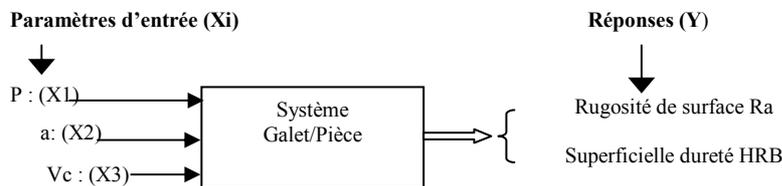
- effort de galetage :  $P = 5 - 20$  (kgf)
- avance :  $a = 0.05 - 0.1$  (mm/tr)
- vitesse de formage :  $Vc = 10 - 80$  (m/min)

Ainsi et compte tenu de la gamme fournie par la machine outil, il a été adopté les paramètres suivants :

- Vitesse de rotation de la pièce  
 $Vc = 10\text{m/min} \Rightarrow N=355$  tr/min ;  $Vc=45\text{m/min} \Rightarrow N=1120$  tr/min et  $Vc=80\text{m/min} \Rightarrow N=1800$  tr/min

- Avance :  $a = 0.054$  mm/tr ;  $a = 0.074$  mm/tr et  $a = 0.11$  mm/tr

Tous les essais de galetage ont été réalisés conformément au modèle de la planification des expériences [11, 9, 18], en envisageant 3 facteurs d'entrée à savoir P, a, Vc (fig.4) chacun d'entre eux est pris à 3 niveaux (Min., Moy. et Max.).



**Fig.4 Schéma de test**

La réponse de sortie Y(x) interprétant la rugosité Ra ou la dureté HRB peut être définie par la relation :

$$Y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + a_{12} X_1 X_2 + a_{13} X_1 X_3 + a_{23} X_2 X_3$$

### 2.5 Résultats expérimentaux

Les valeurs de mesures de rugosités « Ra » et de dureté superficielle relevées sur les éprouvettes tournées et traitées par galetage sont présentées sur le tableau 1. Ceci nous permet de voir et de comparer l'influence du traitement mécanique par galetage.

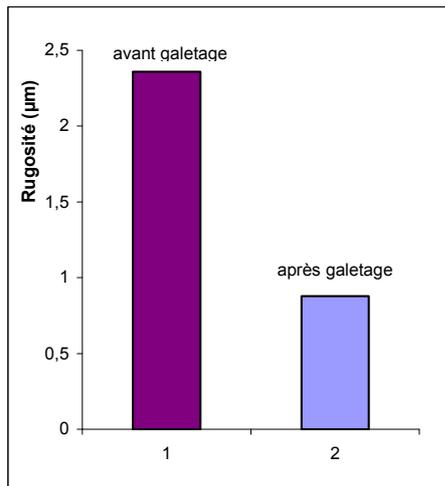
**Tableau 1**

N° Eprouvette	Ra ( $\mu\text{m}$ )		Dureté superficielle (HRB)	
	Avant galetage	Après galetage	Avant galetage	Après galetage
06	3.28	1.09	86	86
08	3.64	0.83	82	87
10	3.52	0.79	86	89
01	2.53	0.53	81	83
02	2.76	0.44	80	84
07	2.55	0.45	84	84
05	1.90	1.22	86	87
03	1.97	1.01	85	87
12	1.87	0.86	86	89
04	1.39	1.34	83	86
09	1.59	0.98	85	88
11	1.32	0.97	84	88
Valeurs Moy.	2.36	0.88	84	86.5

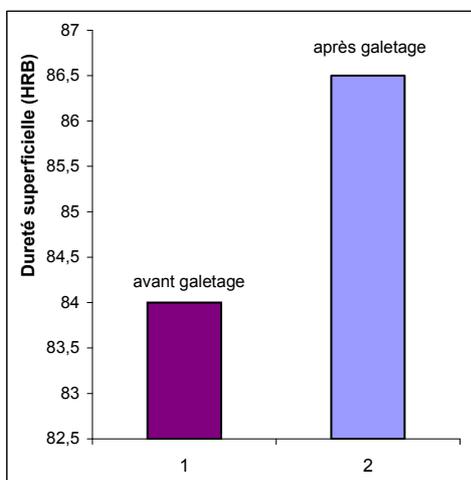
Il en ressort de ces résultats que les couches superficielles galetées acquièrent un bel aspect de surface suite à l'amélioration de la rugosité (fig.5) et se consolident d'avantage au vu de l'augmentation de la dureté (fig.6).

### 3. Essai d'usure

La méthode retenue pour la mesure de l'usure dans cet essai est celle par perte de masse. Pour activer le phénomène d'usure, nous avons utilisé des grains abrasifs en silices d'une granulométrie de 50  $\mu\text{m}$ , véhiculés par une huile épaisse (SAE90) ; ce qui correspond à l'usure par abrasion. Le montage ainsi que le dispositif, utilisé lors des essais sont présentés sur la figure 7. L'usure est caractérisée par la perte progressive du matériau à sa surface par suite de l'action mécanique de l'abrasif. L'abrasion est provoquée par des particules dures roulants entre deux surfaces (roulement/pièce) d'où abrasion à trois corps. L'effet abrasif des particules peut être accentué en jouant sur d'autres paramètres tels que, la forme des grains et la pression exercée. Il s'en suit que l'usure de la surface est une conséquence directe soit d'une déformation plastique soit d'un arrondissement de matière engendrée par cette action abrasive des particules siliceuses. D'une façon générale, le volume d'usure par abrasion est lié à la charge appliquée et à la distance parcourue



**Fig.5 Variation de la rugosité après traitement par galetage**



**Fig.6 Variation de la dureté superficielle après traitement par galetage**

### 3.1 Mode opératoire

On a choisi l'éprouvette qui possède le meilleur aspect de surface lors du galetage. L'essai s'effectue sur un tour parallèle, le dispositif équipé de roulement est monté sur la tourelle porte-outil d'une manière analogue à

un outil de tour voir fig.6. La fréquence de rotation de la pièce est maintenue constante durant l'essai ( $N = 500 \text{tr/min}$ ).

Le travail est réalisé selon les étapes suivantes :

- La pièce est prise dans un montage mixte sur tour.
- On déplace le chariot porte tourelle transversalement à l'aide du levier, vers la région désirée de la pièce jusqu'à l'obtention du contact avec le roulement ; la pièce entraînera alors le roulement par adhérence et à l'aide du vernier du chariot porte outil, on impose une légère pression de la même façon qu'on règle la profondeur de passe. Par ailleurs, la zone de contact est soumise à un jet d'huile SAE90 chargé d'abrasif ayant pour effet d'accélérer le phénomène d'usure.

On fixe le temps d'essai et on effectue la pesée de l'éprouvette à l'aide d'une balance analytique. De cette manière, on obtient la perte de masse «  $\Delta m$  » qui est la différence entre la masse «  $m_{i-1}$  » avant et «  $m_i$  » après l'essai.

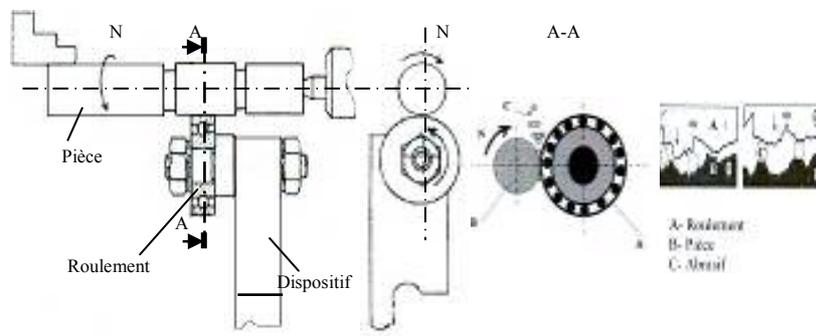


Fig.7 Montage d'essai d'usure

L'essai a permis de dégager les résultats suivants :

**Tableau 2 partie de l'éprouvette galetée**

$m_0 = 78.0053$  grs

ti (min)	m <sub>i</sub> (grs)	Δm (grs)	Us (μm)	di (m)
10	78.0024	0.0029	0.9	164.9
15	78.0010	0.0043	1.4	247.3
20	77.9472	0.0581	18.9	328.7
25	77.9335	0.0718	23.3	410.5
30	77.9243	0.0810	26.3	492.3
40	77.9001	0.1052	34.2	655.5
45	77.8947	0.1106	35.9	737.1
50	77.8625	0.1428	46.5	817.4
55	77.8609	0.1444	47.0	898.6
60	77.8380	0.1673	54.5	979.3

**Tableau 3 partie de l'éprouvette tournée**

$m_0 = 78.8380$ grs

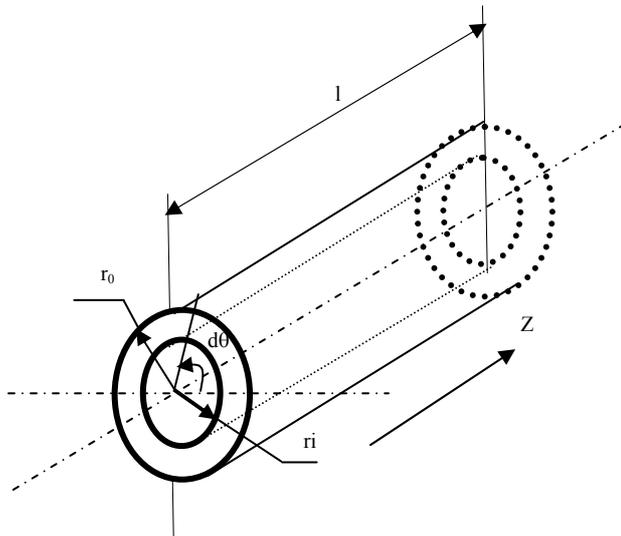
ti (min)	m <sub>i</sub> (grs)	Δm (grs)	Us (μm)	di (m)
05	77.4960	0.3420	112.0	80.7
10	77.3496	0.4884	160.7	159.8
15	77.0960	0.7420	246.2	235.7
20	77.0842	0.7538	250.3	314.0
30	76.9790	0.8590	286.1	467.6
35	76.8520	0.9860	329.9	540.7
45	76.4350	1.4030	476.2	674.5
50	76.4240	1.4140	480.2	748.9
55	76.3974	1.4406	489.7	822.1
60	76.3231	1.5149	516.3	891.8

### 3.2 Calcul de l'usure

Pour quantifier l'usure de la pièce, considérons le schéma de la figure 8. On considère que le contact s'effectue entre deux cylindres (pièce / roulement) sur une longueur  $l = 12$  mm (largeur du roulement). On suppose que la perte de masse (ou arrachement) de la couche superficielle de métal est théoriquement répartie de façon homogène et uniforme sur la

périphérie de la zone de contact, ainsi l'usure s'effectue couche par couche.

1)  $r_i = f(\Delta m)$  ;  $r_0 = 5.25 \text{ mm}$  ;  $l = 12 \text{ mm}$



**Fig.8 Schéma de calcul**

D'une manière générale, la masse est représentée par la formule :

$$m = \int \rho \, dv \quad \rho = \text{cte} \quad (\text{pour l'acier } \rho = 7.8 \text{ g/cm}^3)$$

$$\int_{m_0}^{m_1} dm = \rho \int_{r_0}^{r_i} \int_0^{2\pi} \int_0^l r \cdot dr \cdot d\theta \cdot dz \quad \text{d'ou } \Delta m = \rho \iiint r \cdot dr \cdot d\theta \cdot dz \longrightarrow r_0 > r_i$$

il n'y a pas de variation de longueur  $\longrightarrow \int dz = l = \text{cte}$

$$\Delta m = \rho l \iint r \cdot dr \cdot d\theta \longrightarrow \text{pièce de révolution} \quad \int d\theta = 2\pi$$

$$\text{Alors } \Delta m = \rho l 2\pi \int r \, dr = 2\pi l \rho 1/2 (r_0^2 - r_i^2).$$

$$\Delta m = \rho \pi l (r_0^2 - r_i^2) \dots \dots \dots (1)$$

$\Delta m < 0$  diminution dans la masse.

$$r_i = \sqrt{r_0^2 - (\Delta m / \rho \pi l)} \dots \dots \dots (2)$$

2) L'usure  $U_s = f(\Delta m)$  : sachant qu'elle peut être définie par la variation de l'épaisseur dans le sens radial d'où  $U_s = r_0 - r_i$  ce qui donne :

$$U_s = r_0 - \sqrt{r_0^2 - (\Delta m / \rho \pi l)} \dots \dots \dots (3)$$

La distance parcourue est définie par :

$$d_i = 2\pi n r_i t_i \dots \dots \dots (4)$$

De cette façon, on a établi les relations :  $r_i = f(\Delta m)$ ,  $U_s = f(\Delta m)$  et  $d_i = f(r_i, t_i)$  qui nous permettent d'établir les graphes représentatifs de l'usure  $U_s$  en fonction de la distance de parcours. Ceci permet de mesurer l'impact du procédé de traitement (galetage) sur la tenue à l'usure. Les graphes représentant l'évolution de l'usure des différentes parties de l'éprouvette (partie galetée et partie tournée) sont illustrés sur les figures ci-dessous:

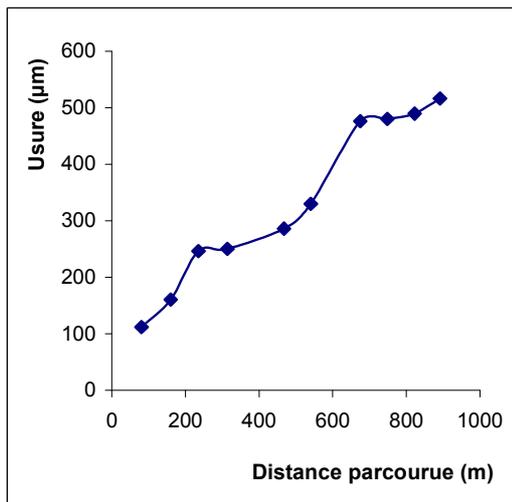
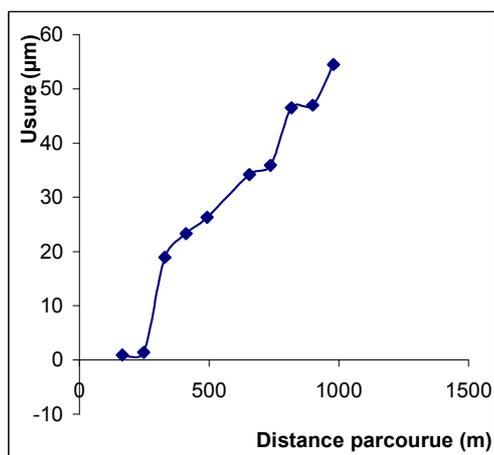


Fig.9 Evolution de l'usure de l'éprouvette tournée



**Fig.10 Evolution de l'usure de l'éprouvette traitée par galetage**

#### 4. Discussions

Suite aux séries d'essais expérimentaux ainsi réalisées on constate que :

- Pour la partie tournée fig.9 : les mesures effectuées après une longueur de 314m nous ont permis de constater que l'intensité de l'usure est croissante, ce qui définit l'usure initiale qui se prononce sur les aspérités les plus aiguës d'où faible longueur de contact. Ainsi, cette étape peut être attribuée au rodage de la pièce. Au delà de ce domaine, l'usure évolue avec un gradient décroissant. Ce domaine constitue l'usure normale de la pièce. Ce phénomène étant systématique, augmente de façon quasi linéaire avec la longueur de contact et semble prendre fin après 650 m de contact entre le roulement et la pièce, puisqu'il a été constaté que l'usure s'accroît davantage.

- Pour la partie galetée fig.10 : de la même manière qu'en tournage, il a été constaté qu'après une longueur de contact évaluée à 330m, l'usure reste négligeable. On en déduit que le galetage a déjà produit un rodage des pièces suite au nivellement des aspérités de rugosité et au lissage du profil de la surface galetée. Quoique la courbe d'usure évolue avec la même tendance que celle relative au tournage ; l'on remarque que la pente de la première courbe est la plus faible. Ainsi, à une longueur de contact donnée (ex. 1000 m), l'usure induite par tournage est de l'ordre de 500  $\mu\text{m}$  alors que celle relative au galetage n'est que d'environ 50  $\mu\text{m}$ .

On en déduit aisément que le galetage offre la meilleure résistance à l'usure. On remarque par la suite une usure accentuée, mais qui reste acceptable par comparaison à la partie tournée.

Ces résultats montrent que le degré d'amélioration du traitement par galetage est de l'ordre de 90%.

### **5. Conclusions**

L'étude, l'analyse et l'application du procédé de traitement mécanique en l'occurrence le galetage a permis de voir l'amélioration des propriétés physiques et géométriques du matériau examiné (RB40). Il ressort de ce travail, les conclusions suivantes :

- L'application du galetage favorise une meilleure rugosité par rapport au tournage. De plus, il permet d'obtenir une dureté superficielle élevée ce qui améliore nettement la résistance à l'usure.
- Le matériau ainsi traité peut être utilisé dans la fabrication des pièces mécaniques travaillant en frottement et peut remplacer certains aciers et ceci grâce à l'amélioration de ses caractéristiques mécaniques.
- Nous recommandons à l'utilisateur de l'acier (RB40) pour la fabrication des pièces mécaniques, d'introduire le procédé de galetage comme opération de finition dans la gamme d'usinage

## Références

- 1- A.C.E. MENDAR ; La technique du galetage ; métaux ; déformation N° 47 ; avril 1978.
- 2- D.D. PALCHEV ; Traitement de finition et de durcissement par déformations plastiques superficielles ; Moscou 1978.
- 3- L. Wagner, Mechanical surface treatments on Ti, Al and Mg alloys, Materials Science Engineering. Vol.A263, 1999, pp.210-216.
- 4- H. Hamadache, K. Chaoui, Mechanical properties Improvements of Rb40 steel through ball burnishing process, Séminaire International de Génie Mécanique, Oran, Avril 2002, pp.425-430.
- 5- MM. EL-Khabeery, Mh EL-AXIR ; Experimental techniques for studying the effect of milling roller-brunishing parameters on surface integrity , Int. J. Mach Tools Manufact Vol. 41 pp1705-1719, 2001
- 6- A. M. Hassan, The effect of ball and roller burnishing on the surface roughness of some non-ferrous metals, Journal of materials processing technology, Vol.72, 1977, pp.385-391.
- 7- P. I. Kudryavtsov, Surface work hardening delays fatigue development, Russian Engineering Journal, Vol. LII N°1, 1983, pp.61-65.
- 8- H.Hamadache, L.Laouar, N.E.Zeghib, K.Chaoui, Characteristics of RB40 steel superficial layer under ball and roller burnishing, Journal of Materials Processing Technology 180 (2006) pp.130-136.
- 9- H. Hamadache, K. Chaoui, Effect of diamond ball burnishing on surface characteristics and fatigue strength of XC55 steel, International Review of Mechanical Engineering, Vol.2, N°1, pp.40-48, January 2008.
- 10- F. CLOCKE, J. LIERMAN ; Roller Brunishing of Hard surfaces Int.J. Mach Tools Manufact Vol.38 pp419-423, 1998.
- 11- L. Laouar, Traitement mécanique des aciers XC48 et XC18-Optimisation et caractérisation, Thèse de Doctorat d'ETAT, Annaba 2007.
- 12- A.M. Hassan, A.D. Suleiman, Improvement in the wear resistance of brass components by ball burnishing process, J. Mater. Process. Technol. 96(1-3) (1999) 73-80.
- 13- H. Hamadache, L. Laouar, K. Chaoui, Influence des traitements mécaniques de surface sur la rugosité, la dureté et la résistance à l'usure d'un acier, Revue Synthèse, Université de annaba, N°15, pp. 120-128, Annaba 2006.

- 14- A.M. Hassan, An investigation into the characteristics of burnished cast Al–Cu alloy, *Int. J. Mach. Tools Manufact.* 37 (6) (1997), pp.813–821.
- 15- K.H. Wang, L.A. Blunt, K.J. Stout, The 3D characterisation of the surface topography of the ballizing process, *Int. J. Mach. Tools Manufact.* 38(5–6) (1998), pp.437–444.
- 16- H. Hamadache, K. Chaoui, Caractérisation physico-géométrique d'un acier 35NC6 traité par brunissage, 3<sup>ème</sup> Conférence Internationale sur la productique, Tlemcen 2005.
- 17- H. Hamadache, Influence du galetage sur la tenue en fatigue d'un alliage Al2024, thèse de Doctorat, Université de Annaba 2007.
- 18- J. GOUPY ; Plan d'expériences pour surfaces de réponse ; Editions Dunod, Paris 1999.

Received, 4-4-2006.