

Etude numérique et expérimentale de l'état de contact entre l'outil et la pièce lors d'un procédé de super finition par toilage.

BOUKTIB Naoufal¹, KHELLOUKI Abdeljabar¹

¹ Equipe : Mécanique avancée et applications industrielles, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Université Moulay Ismail B.P. 15290,
Al Mansour, Meknès, Maroc
Bouktib.naoufal@gmail.com

RESUME :

Les procédés de super finition sont connus par leur aptitude d'améliorer la topographie de la surface et d'augmenter la résistance à l'usure et la tenue à la fatigue des pièces mécaniques. En super finition par toilage, l'outil est une bande abrasive supportée par un galet de contact en polymère (Fig.1), de ce fait l'outil est extrêmement élastique d'où la particularité de ce nouveau procédé par rapport aux autres procédés de super finition conventionnels où l'outil est rigide.

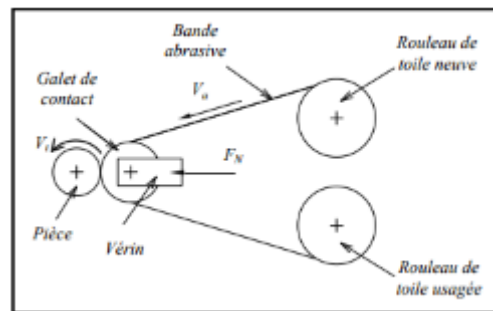


Fig.1 : Le procédé de toilage

L'objectif de cette étude est d'apporter une meilleure compréhension des mécanismes de contact entre l'outil et la pièce lors d'un essai de toilage. Trois approches ont été étudiées : une approche théorique basée sur la théorie du contact de hertz entre 2 cylindre, la deuxième est expérimentale basée sur un essai de toilage instrumenté avec un galet de contact en polymère, une bande abrasive en polyester et une pièce en acier dure 100Cr6 et la troisième approche est numérique basée sur des simulations numériques par éléments finis en utilisant le logiciel ABAQUS.

Les résultats montrent que plus la pression de contact augmente et/ou la dureté de galet de contact diminue plus l'aire de contact augmente. Les résultats théoriques sont sensiblement proches aux simulations numériques ainsi que ceux expérimentales.

Les mots clés : Toilage, super finition, élasticité, abrasifs, Méthode des Eléments Finis, contact d'hertz.

1. Introduction :

De nos jours, le toilage est devenu une méthode d'usinage largement utilisée, y compris la superfinition des matériaux après tournage dur et l'usinage des pièces avec surface libres.

Le toilage est un procédé qui consiste à appliquer une pression entre une bonde abrasive et une pièce en rotation à l'aide d'un galet de contact, En même temps la bonde abrasive oscille selon la direction axiale de la pièce. L'avantage de ce procédé par rapport à d'autres procédés de superfinition est l'utilisation d'un galet de contact élastique et une bonde abrasive qui se régénère automatiquement.

Des recherches concernant l'analyse de l'intégrité de surface lors d'un procédé de toilage J.Rech et al [1] and A.Khellouki et al [2], montrent un certain nombre de phénomènes physiques en relation avec les conditions de contact et l'usure de la bande abrasive. L'analyse de ces phénomènes passe par l'étude des mécanismes de la coupe en toilage et des paramètres locaux gouvernants cette opération.

L'étude de contact entre l'outil et la pièce se fait en se basant sur plusieurs paramètres comme la vitesse de la bande, la pression de contact, l'élasticité du galet de contact etc. Mais l'analyse des conditions de contact reste le paramètre clé de cette étude. Dans ce contexte, la plupart des études théoriques sont basées sur l'analyse statique par la théorie du contact de Hertz. W. WANG et al [3] ont proposé un modèle de contact de Hertz simplifié entre un cylindre et une surface plane pour étudier par la suite la zone de contact.

L'objectif de ce travail consiste à effectuer une étude numérique, expérimentale et théorique des différents aspects du contact élastique entre la pièce et l'outil qui se compose de l'ensemble galet de contact et la bande abrasive et par la suite comparer les résultats obtenus. Dans cette étude, la définition des paramètres locaux de contact surtout la surface de contact est prioritaire pour trouver le lien avec la topographie de la surface toilée et le processus de l'enlèvement de la matière.

2. Le contact entre la bande abrasive et la pièce :

1. Caractéristique d'un contact élastique lors d'un procédé de toilage :

La mise en œuvre d'un support élastique pour manœuvrer des outils abrasifs trouve son origine dans la pratique élémentaire qui consiste à appliquer manuellement des toiles pour polir des pièces dont l'objectif est de suivre les formes irrégulières des pièces.

(Fig.2) montre deux outils abrasifs de forme sphérique, l'un rigide et l'autre élastique, destinés à polir une surface fraisée qui a une certaine rugosité. L'outil rigide pénètre dans la surface en

enlevant toute la matière qui se trouve dans sa trajectoire laissant ainsi son empreinte sur la pièce. En revanche, l'outil élastique se déforme en se conformant au profil de la surface. Donc le contact se fait entre les grains abrasifs portés par la bande en enlevant progressivement les crêtes des sommets du profil. Un outil abrasif élastique améliore donc la rugosité de la surface toute en gardant la forme nominale de la surface ce qui n'est pas le cas d'un outil rigide.

D'autre part, la surface de contact entre la pièce et l'outil dépend essentiellement de l'élasticité de ce dernier. (Fig.3) compare deux situations de contact, une correspond au toilage dont l'outil est élastique, l'autre au pierrage dont l'outil est rigide. Si la surface de contact est la même pour les deux procédés à une force appliquée F_1 , il ne l'est pas pour une force F_2 plus grande. En effet, quand la force appliquée augmente, Le galet de contact qui est très élastique s'écrase de plus en plus contre la pièce augmentant ainsi la surface de contact tandis que la pierre abrasive garde la même surface de contact quel que soit la force appliquée.

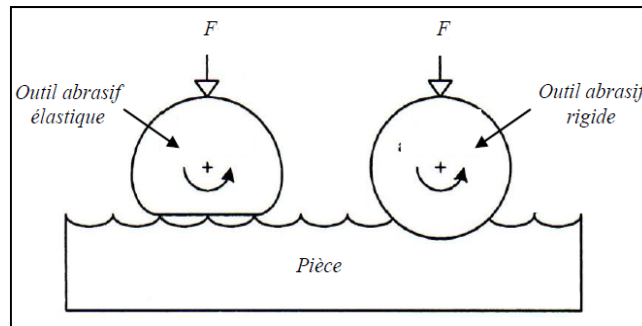


Fig.2 : le contact entre la pièce et un outil élastique et un autre rigide

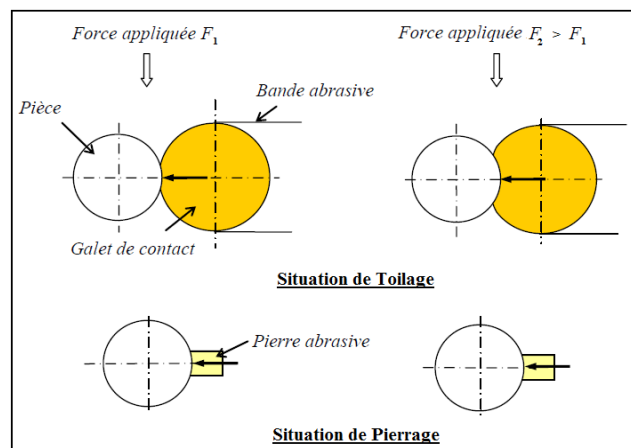


Fig.3 : Comparaison entre la situation de toilage et celle de pierrage

3. L'étude de la déformation élastique de la zone de contact :

Au cours du procédé de toilage, le galet de contact se déforme en se conformant à la surface de la pièce cylindrique (Fig.4). Le paramètre L est la longueur de la zone de contact entre la pièce et la bande. La largeur de cette zone ℓ dépend de la force appliquée F et du module de Young E du galet de contact qui est lié à la dureté Shore A du matériau.

Les relations entre la déformation du galet de contact (caractérisée par la largeur ℓ) et de la force appliquée F ont été quantifiées expérimentalement et numériquement pour deux différentes duretés de galet. Ces études ont été effectuées sans aucune rotation de la pièce.

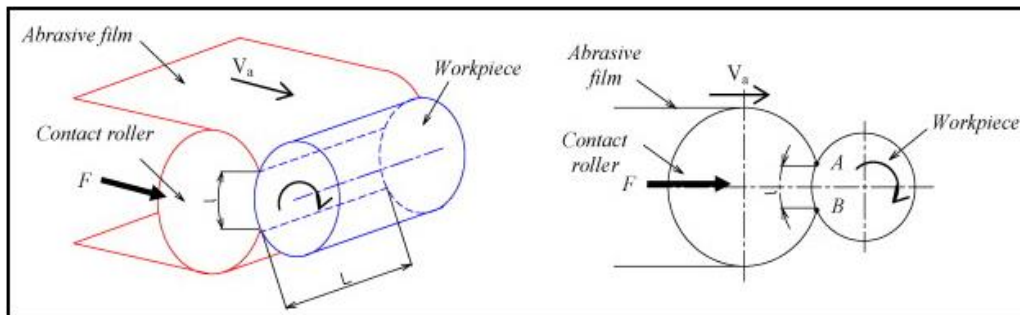


Fig.4 : le contact lors d'un procédé de toilage

1. Etude théorique :

L'étude théorique est effectuée en se basant sur le modèle de contact d'Hertz entre deux cylindres (Fig.5)

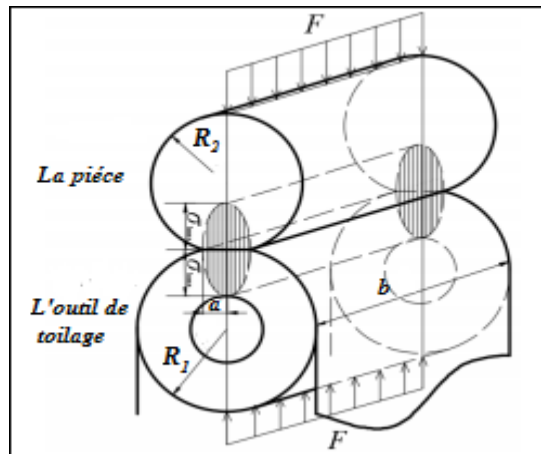


Fig.5 : Le contact d'Hertz entre deux cylindres

Lorsque deux corps de différents rayons de courbure sont mis en contact, ils se touchent en un point ou le long d'une ligne. Avec l'application d'une charge F sur le premier cylindre la déformation élastique élargit les zones des deux corps en contact à travers lesquels les charges sont réparties sous forme de pression. La première analyse de cette situation a été présentée par

Heinrich Hertz en 1881 [4]. La largeur de contact ℓ entre deux cylindres selon le modèle de contact d'Hertz est modélisée selon l'équation (1) :

$$\ell = 2 \sqrt{\frac{4F \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)}{\pi b \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)}} \quad (1)$$

Avec, E_1, ν_1 et E_2, ν_2 sont respectivement le module de Young et le coefficient du poisson du galet de contact et de la pièce. R_1 et R_2 sont respectivement les rayons du galet de contact et de la pièce.

Pour calculer le module de Young du galet de contact pour les deux différentes duretés 70, 90 Shore A, certains auteurs ont pu établir un lien entre le module de Young et la dureté [5] selon l'équation (2).

$$E = \frac{15,75 + 2.15 \text{ ShA}}{100 - \text{ShA}} \left(1 + 0.3 \frac{\text{ShA}}{100} \right) \quad (2)$$

En se basant sur les différents paramètres du tableau 1, on a obtenu les résultats exposés dans (Fig.8), pour deux valeurs du module de Young correspondant aux duretés de galet 70 et 90 Shore A.

| | |
|--|-------------------------|
| La force appliquée F (N) | De 155 jusqu'à 930 |
| La longueur de contact b (mm) | 35 |
| Le diamètre de la pièce (mm) | 29 |
| Le diamètre du galet de contact (mm) | 35 |
| Le module de Young de la pièce E_2 (GPa) | 210 |
| La dureté du galet de contact, Sh A | 70, 90 Shore A |
| Coefficient de poisson du galet de contact ν_1 | 0.47 |
| Coefficient du poisson de la pièce ν_2 | 0.3 |
| Le matériau de la pièce | Acier (100Cr6) |
| Le matériau de la bonde abrasif | Polymère (polyuréthane) |
| Le matériau du galet de contact | Polyester |

Tableau 1 : les paramètres utilisés lors de l'étude théorique

2. Etude expérimentale :

Les tests ont été effectués sur des pièces en acier dure 100Cr6 (AISI 52100) trempé à 62 HRC. Les pièces ont été préparées par tournage dur pour obtenir une bonne géométrie macroscopique. Cette opération a été menée sur une tour de haute précision. Pour effectuer cette opération, des plaquettes en c-BN (TNGA160408S01020) ont été utilisées avec les conditions de coupe

suivantes : Vitesse de coupe, $V_c = 120$ m/min ; Vitesse d'avance, $f = 0,1$ mm/tr ; Profondeur de coupe, $a_p = 0,3$ mm.

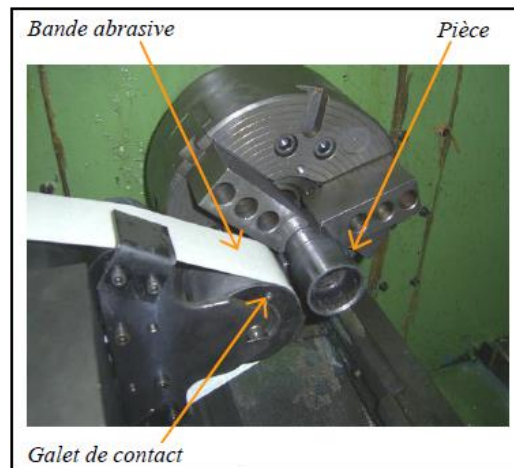


Fig.6 : Montage expérimentale

Le procédé de toilage a été effectué au moyen de l'appareil présenté dans (Fig.6). Les essais ont été effectués à l'arrêt.

(Fig.8), représente l'évolution de la largeur de contact ℓ mesurée en fonction de la force normale appliquée, F , pour deux galets de duretés différentes. Evidemment, la largeur de contact augmente avec la force appliquée F . Cette largeur est plus grande pour un galet de 70 Shore A que pour un galet de 90 Shore A.

3. Etude numérique par MEF :

L'étude numérique de la zone de contact lors d'un procédé de superfinition par toilage est effectuée par le logiciel ABAQUS.

Un modèle statique 2D, (Fig.7) qui se compose de la pièce en Acier 100Cr6, le galet de contact et la bande abrasive. Le maillage est effectué par des éléments de type C3D8R et de taille 0.1mm pour une révolution de 75 μ m, les paramètres des différents composants sont indiqués dans le tableau 1.

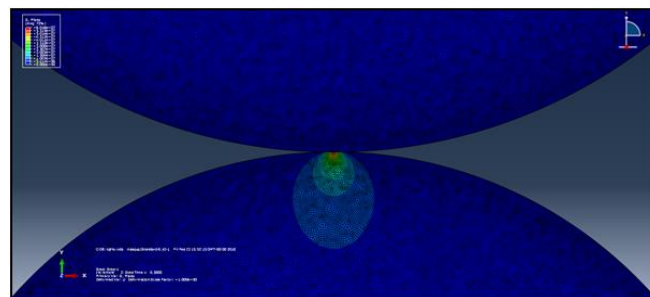


Fig.7 : La simulation numérique 2D de contact lors d'un procédé de toilage

(Fig.8), représente les résultats numériques obtenus après la simulation de l'état de contact lors du procédé de toilage pour deux différentes duretés du galet de contact 70 et 90 Shore A. D'après cette figure, il est clair que la largeur de contact ℓ augmente avec la force appliquée F et comme on l'a déjà indiqué dans l'étude expérimentale cette largeur est plus grande pour un galet de contact dont l'élasticité est plus grande.

4. Comparaison des résultats :

(Fig.8) montre d'une part que les résultats obtenus par la théorie de hertz est très proche de ceux du modèle numérique par MEF. L'erreur moyenne entre les deux approches est respectivement de 3.15% et 2.50 % pour un galet de contact de dureté 90 Shore A et 70 Shore A. D'autre part la différence entre le modèle théorique et expérimental est assez importante dont l'erreur moyenne pour les duretés 90 Shore A et 70 Shore A est respectivement 10.54% et 13,83%. Cette erreur est dû aux fautes que le module de Young E du galet de contact lors de l'étude expérimentale ne correspond pas exactement à celui utilisé lors des approches numériques et théoriques.

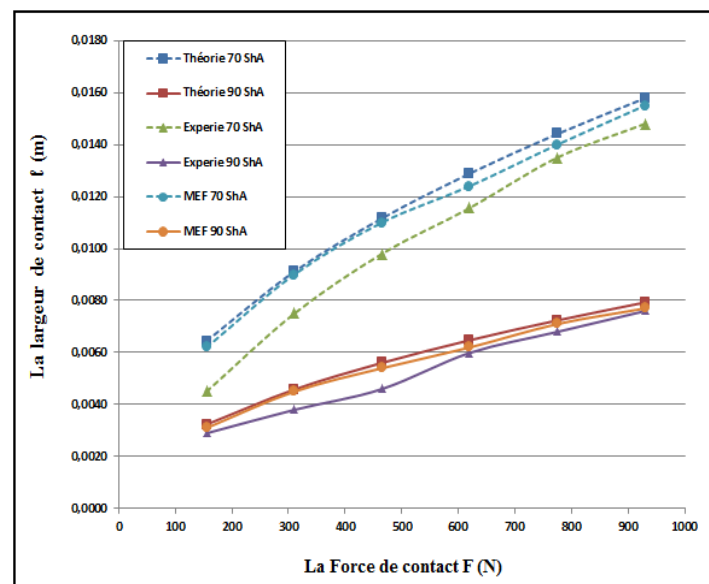


Fig.8 : La force de contact en fonction de la largeur de contact pour les différentes approches.

5. Conclusion :

Cet article porte sur l'étude de la largeur de contact ℓ lors d'un procédé de toilage. Dans un premier temps, nous avons pu introduire une relation entre la dureté et le module de Young du galet de contact pour prouver l'exactitude du modèle théorique, et son efficacité a été confirmée.

par un écart moins de 5% par rapport au modèle numérique. Nous avons ensuite comparé les différents résultats obtenus pour interpréter les conséquences induites par la variation des différents paramètres. Notamment nous avons observé que :

- L'augmentation de la force de contact implique l'augmentation de la largeur de contact ℓ .
- La largeur de contact atteint des valeurs plus élevées pour des galets de contact de petite dureté.
- L'erreur entre le modèle théorique et expérimentale implique l'importance ainsi que la difficulté de la définition d'un module de Young du galet de contact pour avoir des résultats plus précis

Référence :

- [1] J. Rech, A. Khellouki, G. Kermouche, W. Grzesik, et al. Characterization and modelling of the residual stresses induced by belt finishing on a AISI52100 hardened steel. Journal of materials processing technology 208 (2008) 187–195.
- [2] A Khellouki, J Rech, H Zahouani. The effect of abrasive grain's wear and contact conditions on surface texture in belt finishing. Wear, 2007, vol. 263, p. 81-87.
- [3] Wang W, Liu F, Liu Z, et al. Prediction of depth of cut for robotic belt grinding. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016:1-10.
- [4] PALADE, Adrian-Ciprian. Caractérisation du comportement mécanique de la sous surface d'un polymère percé, sous une sollicitation de type hertzienne. 2013. Thèse de doctorat. Université de Bourgogne.
- [5] <http://www.chevalier-cleret.com/event/young-modulus-for-rubber.html>