



### **Science Arts & Métiers (SAM)**

is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers Institute of Technology researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <https://sam.ensam.eu>  
Handle ID: <http://hdl.handle.net/10985/9879>

#### **To cite this version :**

Maxence BIGERELLE, Mohamed EL MANSORI, Gildas GUILLEMOT, Benjamin HAGEGE, Oufae SABER, Alain IOST - Modélisation du Procédé de Superfinition par Abrasion - In: Caractérisation multi-échelle de la rugosité Analyse d'images de topographie, France, 2007-10-11 - Caractérisation multi-échelle de la rugosité Analyse d'images de topographie - 2007

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository

Administrator : [archiveouverte@ensam.eu](mailto:archiveouverte@ensam.eu)



# Modélisation du Procédé de Superfinition par Abrasion

Maxence BIGERELLE <sup>1</sup>, Mohamed EL MANSORI <sup>2</sup>, Gildas GUILLEMOT <sup>3</sup>,  
Benjamin HAGEGE <sup>1</sup>, Ouafae SABER <sup>1</sup>, et Alain IOST <sup>3</sup>

(1) Laboratoire Roberval, FRE 2833, UTC/CNRS, Centre de Recherches de Royallieu, BP20529, 60205 Compiègne, France.

(2) Laboratoire de Mécanique et Procédés de Fabrication (LMPF - JE2381), ENSAM - Rue Saint Dominique, BP 508, 51006, Châlons en Champagne, France.

(3) Laboratoire de Métallurgie Physique et Génie des Matériaux (LMPGM), UMR CNRS 8517, Equipe de Caractérisation et Propriétés des Pêrisurfaces, ENSAM, 8 Bd Louis XIV, 59046 Lille Cedex, France.

## Introduction

Le papier actuel présente une tentative de technologie pour modéliser rigoureusement une surface fonctionnelle (surface de cône de pignon intermédiaire) selon ses caractéristiques de finition. La surface virtuelle d'entrée est produite par une fonction originale fractale qui reproduit la « signature » extérieure due au processus de meulage. Pour modéliser l'opération de superfinition un algorithme simulant les conditions de polissage abrasives est développé et appliqué pour modifier la surface initiale fractale. L'idée fondamentale de ce modèle est que plus la taille d'une crête du profil est haute, moins est importante sa probabilité de résistance pendant un cycle d'abrasion. Le procédé de finissage de ceinture est par conséquent modélisé par cinq paramètres : deux paramètres qui caractérisent l'extérieur initial (dimension fractale et amplitude) et trois paramètres décrivant le processus de polissage d'abrasion (probabilité de résistance, volume d'usure et nombre des cycles d'abrasion). Afin de s'assurer que le composant sera fabriqué selon les caractéristiques exigées, les paramètres du modèle doivent être déterminés. À cet effet, une fonctionnelle avec une méthode d'optimisation est créée. Cette simulation fournit la morphologie de la surface initiale et comment régler le processus de superfinition pour obtenir la fonctionnalité de la surface. On exige une rugosité initiale élevée dont l'érosion soit lente pour conserver quelques vallées du profil initial (réservoirs de lubrifiant).

## 1- Processus d'abrasion et mesure des états de surfaces

En milieu industriel, des méthodes garantissant l'intégrité des surfaces, en imposant un ensemble de paramètres de rugosité, existent. Cet ensemble est censé garantir une fonctionnalité nécessaire de la surface (adhérence [2-4], éclat [5.6], coefficient de frottement [7.8],...). Pour suggérer une méthodologie pour répondre à cette problématique, cet article se concentrera sur des surfaces obtenues par superfinition (Bell Grinding Process) [9]. La problématique peut être résumée comme suit : un concepteur automobile impose au BGP de tenir des paramètres d'état de surface et le défi devient d'adapter les paramètres de BGP pour atteindre ces propriétés morphologiques [11.12]. Dans cette étude, les caractéristiques de rugosité sont particulièrement problématiques à réaliser car la topographie de surfaces doit être caractérisée par trois catégories de paramètres de rugosité : paramètres d'Abbott Firestone (Rpk, Rvk, Rk) [12], paramètres des motifs, divisés en deux sous-catégories : rugosité (R, Rmax, Ar) et caractère onduleux (WR, WAR) [13] et finalement un paramètre DIN standard (Rz) [14]. Le problème principal est que les paramètres de motif sont obtenus après une conversion algorithmique du profil initial et cette approche itérative interdit une expression analytique pour ces paramètres morphologique. Par conséquent, des expériences sont nécessaires pour trouver les paramètres produisant de telles surfaces. Deux problèmes principaux sont rencontrés : il n'y a pas d'assurance que l'outil permette d'obtenir de telles surfaces et, dans l'affirmative, le choix des paramètres de BGP permettant d'atteindre les paramètres exigés de rugosité de la surface usinée est laborieux. D'ailleurs, la morphologie

initiale de la surface avant BGP conditionne la rugosité finale après BGP et en particulier les paramètres d'ondulation. L'obtention de telles surfaces fonctionnelles, (si autorisées par le BGP) exige un nombre élevé d'expériences (nature des surfaces initiales, choix des paramètres process, temps d'érosion...) et consécutivement un nombre élevé de mesures de rugosité. Pour diminuer le nombre d'expériences et pour examiner les possibilités de BGP d'atteindre ces paramètres de rugosité, on se propose de le modéliser. Dans un premier temps, la surface initiale est modélisée par la fonction originale fractale décrivant un processus de meulage. Afin de modéliser le processus d'abrasion, un algorithme simulant les mécanismes abrasifs élémentaires sera spécifiquement développé et appliqué sur la surface initiale fractale. Une fonctionnelle est ensuite proposée, permettant la mesure de la différence entre les paramètres de rugosité donnés par la simulation et ceux nécessaires pour obtenir l'intégrité de la surface résolue par simplex (Tableau 1).

Paramètres	R	Rmax	Rz	Ar	Rw	Aw	Rpk	Rk	Rvk
Objectif	0.8-1.5	4	2.5	130	1.2	571	0.1-0.25	0.3-0.6	>0.5
ISO	12085	120851	4287	12085	12085	12085	13565	13565	13565

Table 1. Les 9 paramètres de rugosité demandés par le concepteur automobile

## 2- Simulation de la surface initiale

Nous simulons le processus d'abrasion avec la fonction fractale,

$$F_{MSCF}(x, p) = A \sum_{n=0}^{\infty} \Psi_n 2^{-\frac{nH}{p}} g(2^{\frac{n}{p}} x + \phi_n) \quad (1)$$

Avec  $p$  un entier supérieur à 1,  $H \in [0,1]$  l'exposant de Hölder relié à la dimension fractale par  $\Delta(G_f) = 2 - H$  et  $A$  un coefficient d'amplitude. La fonction  $g(x)$ , de période 1 sur l'intervalle  $[0,1]$ , est choisie pour représenter l'indentation sphérique des grains de la meule :

$$g(x) = -\sqrt{0.5^2 - (x - 0.5)^2} \quad x \in [0,1] \quad (2)$$

Les termes  $\Psi_n$  sont des nombres gaussiens positifs représentant la variation d'efforts. Les termes  $\phi_n$  caractérisent la désorientation des stries.

## 3- Simulation de l'usure

Un algorithme est développé pour caractériser le processus élémentaire d'érosion par le procédé de superfinition par abrasion. Un modèle a été élaboré pour tenir compte des dommages sévères provoqués par l'abrasion en incorporant le bourrelet contigu à la strie de déformation plastique formé lors de la cinétique de déformation [15]. Le principe élémentaire de ce modèle est basé sur la contrainte équivalente maximale exercée sur les pics de rugosité de la surface et qui sont, par ces sollicitations extrêmes, endommagés jusqu'à leur érosion. Cet endommagement, par nature stochastique, est supposé suivre une décroissance exponentielle que nous allons modéliser par un paramètre unidimensionnel caractérisant ainsi le processus d'abrasion. Après simplification, la probabilité d'éroder un pic situé à une hauteur fixée est obtenue en soustrayant sa probabilité de 1. Basé sur un processus de type Monte-Carlo, ce modèle privilégie un aspect phénoménologique, à peu de coefficients, plutôt que des modèles incluant de nombreux coefficients, peu robuste dans une détermination inverse. Soit l'amplitude de la surface  $R_t = z_{\max} - z_{\min}$  où  $z_{\max}$  et  $z_{\min}$  sont respectivement le maximum et minimum de l'amplitude de la rugosité. Puis nous définissons la probabilité

$R_\lambda(x,c)$  qu'un volume élémentaire de hauteur  $h$  centré sur la position  $x$  résiste pendant un cycle noté  $c$  comme suit :

$$R_\lambda(x,c) = k \int_0^{R_t(c)-z(x,c)} e^{-\lambda h} dh \quad (3)$$

où  $k$  et  $\lambda$  sont deux nombres réels et  $z$  est compris entre 0 to  $R_t(c)$  pour chaque cycle  $c$ . Plus élevé sera la valeur du paramètre d'érosion  $\lambda$ , plus conséquent sera le processus d'érosion. Cette fonctionnelle de résistance est alors normalisée pour obtenir une densité de probabilité à partir de laquelle  $k$  peut être déduit :

$$k = \left[ \frac{1 - e^{-\lambda(R_t(c)-z(x,c))}}{\lambda} \right]^{-1} \quad (4)$$

Finalement, la probabilité d'érosion d'un volume élémentaire situé à une position  $x$  et une hauteur  $z$  au cours d'un cycle d'usure  $c$  est donnée par :

$$W_\lambda(x,c) = 1 - \left( \frac{1 - e^{-\lambda(R_t(c)-z(x,c))}}{1 - e^{-\lambda R_t(c)}} \right) \quad (5)$$

#### 4- Fonctionnelle

Le problème numérique pour modéliser le phénomène du Belt Grinding Process consiste à déterminer les paramètres des deux modèles (A et H qui modélise le profil initial avant érosion et,  $\Delta h$ ,  $\lambda$  et le nombre de cycle d'usure qui modélise le BGP process. Finalement, 5 coefficients doivent être déterminés pour approcher les neuf paramètres de rugosité donnant la fonctionnalité maximale de la surface (Table 1). On cherche ainsi à minimiser la fonctionnelle :

$$\Phi(\mathbf{Q}, \hat{\mathbf{Q}}, \mathbf{P}) = \sum_{i=1}^p (G(q_i(\mathbf{P})))^2 \quad (6)$$

où  $\mathbf{Q} = (q_1, q_2, \dots, q_p)^T$  est le vecteur des  $p$  paramètres de rugosité estimés par notre modèle et  $\mathbf{P} = (p_1, p_2, \dots, p_k)^T$  les paramètres de notre modèle.  $\hat{\mathbf{Q}} = (\hat{\mathbf{q}}_1, \hat{\mathbf{q}}_2, \dots, \hat{\mathbf{q}}_p)^T$  est la matrice des spécifications des paramètres de rugosité dont les spécificités propres sont :  $\hat{\mathbf{q}}_i = (0, \hat{q}_i, 0)^T$ ,  $\hat{\mathbf{q}}_i = (\hat{q}_i^{\text{inf}}, 0, 0)^T$  soit  $\hat{\mathbf{q}}_i = (0, 0, \hat{q}_i^{\text{sup}})^T$  où  $\hat{\mathbf{q}}_i = (\hat{q}_i^{\text{inf}}, 0, \hat{q}_i^{\text{sup}})^T$ .

La fonctionnelle  $G(q_i, \mathbf{P})$  est alors définie comme par  $G(q_i, \mathbf{P}) = (q_i(\mathbf{P}) - \hat{q}_i) / \hat{q}_i$  si le paramètre est unique (sans intervalle). Dans le cas d'un intervalle de définition  $[\hat{q}_i^{\text{inf}}, \hat{q}_i^{\text{sup}}]$  ( $\hat{\mathbf{q}}_i = (\hat{q}_i^{\text{inf}}, 0, \hat{q}_i^{\text{sup}})^T$  i.e.  $q_i(\mathbf{P}) \in [\hat{q}_i^{\text{inf}}, \hat{q}_i^{\text{sup}}]$ ) alors :

$$G(q_i, \mathbf{P}) = 0 \quad \text{si } q_i(\mathbf{P}) \in [\hat{q}_i^{\text{inf}}, \hat{q}_i^{\text{sup}}] \quad (7a)$$

$$G(q_i, \mathbf{P}) = (q_i(\mathbf{P}) - \hat{q}_i^{\text{inf}}) / \hat{q}_i^{\text{inf}} \quad \text{si } q_i(\mathbf{P}) < \hat{q}_i^{\text{inf}} \quad (7b)$$

$$G(q_i, \mathbf{P}) = (q_i(\mathbf{P}) - \hat{q}_i^{\text{sup}}) / \hat{q}_i^{\text{sup}} \quad \text{si } q_i(\mathbf{P}) > \hat{q}_i^{\text{sup}} \quad (7c)$$

#### 5- Résultat

Après optimisation par la méthode du simplex, on trouve :  $A = 17 \mu\text{m}$ ,  $H = 0.2$ ,  $\Delta h = 0.13 \mu\text{m}$ ,

$\lambda=6$ ,  $c_{\text{end}}=250$  cycles. Ces paramètres conduisent à la valeur de la fonctionnelle  $\Phi(\mathbf{Q}, \hat{\mathbf{Q}}, \tilde{\mathbf{P}})=1.13$ . Les valeurs des paramètres de rugosité sont reportées dans le tableau 2.

Paramètre	R	Rmax	Rz	Ar	W	Aw	Rpk	Rk	Rvk
$\hat{\mathbf{Q}}$	0.8-1.5	4	2.5	130	1.2	571	0.1-0.25	0.3-0.6	>0.5
$\mathbf{Q}$	0.94	3.2	2.8	115	0.5	800	0.22	0.51	7

Tableau 2 : Valeur des paramètres de rugosité trouvés après optimisations

Le profil initial possède une dimension fractale de 1.8 avec un paramètre d'amplitude de 17  $\mu\text{m}$ . La figure 1 montre l'évolution du profil modélisé de la surface en fonction du nombre de cycle. La figure 2 représente l'évolution de la fonction coût  $\Phi(\mathbf{Q}, \hat{\mathbf{Q}}, \tilde{\mathbf{P}})$  en fonction du nombre de cycle d'érosion pour les valeurs fixés des paramètres ( $A=17 \mu\text{m}$ ,  $H=0.2$ ,  $\Delta h=0.13 \mu\text{m}$ ,  $\lambda=6$ ).

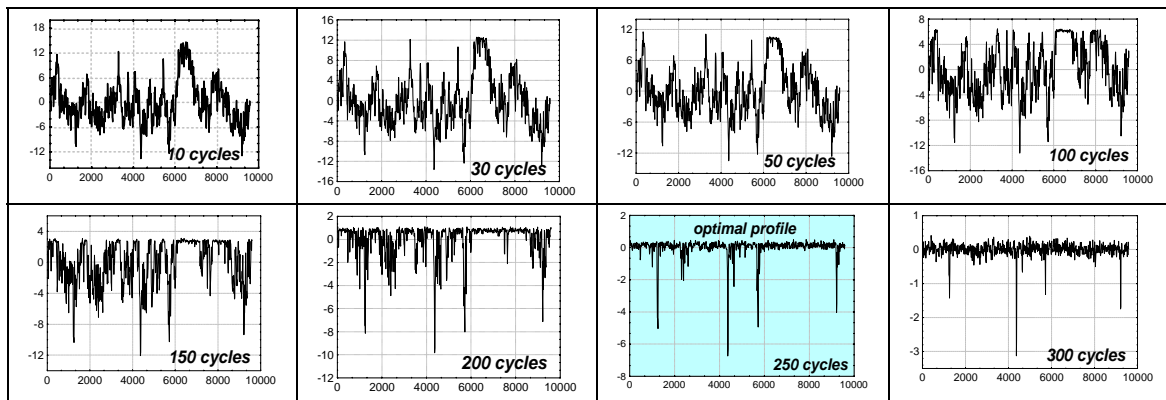


Figure 1 : Modélisation des profils en fonctions du nombre de cycles d'usure

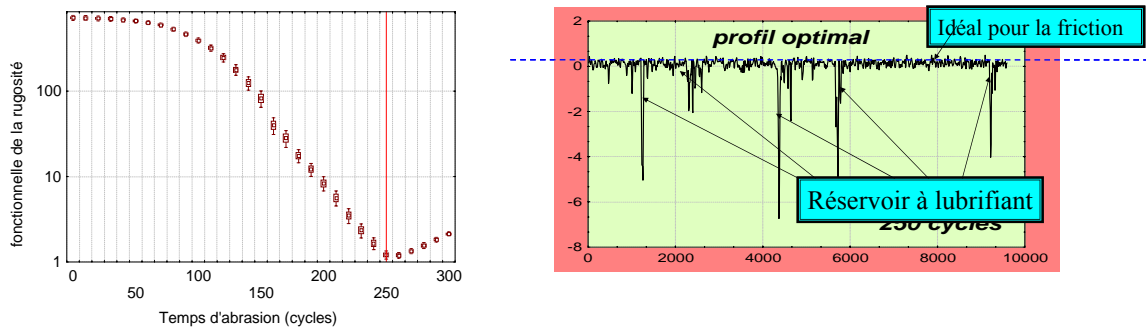


Figure 2 : Résultat de la valeur de la fonctionnelle de rugosité (gauche) en fonction du nombre de cycles et le profil optimal obtenu (droite) à 250 cycles.

Comme il peut être observé, la fonction coût  $\Phi(\mathbf{Q}, \hat{\mathbf{Q}}, \tilde{\mathbf{P}})$  décroît jusqu'à une valeur minimale pour un nombre de cycles de 250. Cette valeur augmente ensuite plus légèrement. Pour expliquer l'origine de cette décroissance, nous allons analyser l'évolution des  $\mathbf{Q}$  paramètres de rugosité en fonction du nombre de cycle d'usure (Fig. 3).

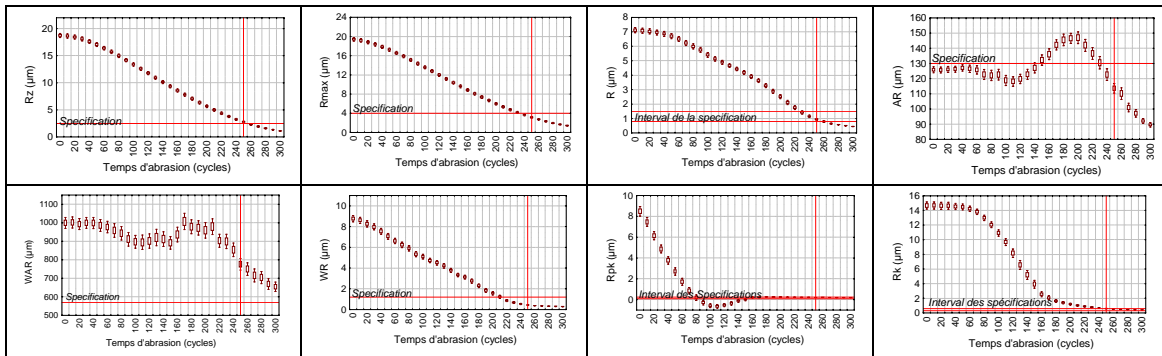


Figure 3 : Résultat des valeurs des paramètres de rugosité retenu en fonction du taux d'usure.

La décroissance de  $\Phi(Q, \hat{Q}, \hat{P})$  est principalement due au fait que le procédé d'érosion réduit l'amplitude du profil initial pour atteindre les spécifications. Cependant, après 250 cycles, l'érosion est plus uniforme et ne garanti plus les spécifications et ceci est principalement du au non respect des spécifications imposées aux paramètres d'Abbott (celle-ci redevient symétrique).

## Conclusion

L'utilisation d'une fonction fractale appropriée pour créer le profil initial combiné avec un modèle stochastique d'usure a permis de modéliser la conséquence du procédés de super-abrasion sur la morphologie de la surface. Cette simulation est basée seulement sur cinq paramètres : une dimension fractale et un paramètre d'amplitude pour simuler le profil initial puis 3 paramètres pour modéliser le procédé d'érosion : un paramètre de résistance à l'usure, un paramètre d'amplitude de l'usure et un temps d'érosion. Grâce à une optimisation, cette méthode permet d'obtenir les 9 valeurs des paramètres exigés par le constructeur automobile sur la rugosité. Cette simulation fournit la morphologie de la surface initiale et montre comment procéder pour obtenir la fonctionnalité morphologique de la surface. On exige une rugosité initiale conséquente ( $17\mu\text{m}$ ), une érosion lente pour éroder les crêtes et pour conserver quelques vallées du profil initial pour servir de réservoir à la lubrification. Cependant, cette méthodologie possède quelques limitations : caractériser une fonctionnalité des surfaces avec des paramètres de rugosité réduit irréversiblement l'information sur la surface et il est ambiguë de déclarer que si une surface est caractérisée par ces paramètres alors sa fonctionnalité est atteinte.

## Remerciements

Nous remercions le CETIM pour son support financier accordé dans le cadre de sa fondation sous le nom de projet « Nouvelles méthodes d'analyse des états de surfaces : de la caractérisation à la recherche de paramètres pertinents ».

## Références

- [1] Najjar, D., Bigerelle, M. and Iost, A. The computer based Bootstrap method as a tool to select a relevant surface roughness parameter. *Wear*, 2003, 254(5-6), 450-460.
- [2] Anselme, K., Bigerelle, M., Noel, B., Dufresnes, E., Judas, D., Iost, A. and Hardouin, P. Qualitative and quantitative study of human osteoblasts adhesion on materials with different surface roughness. *J. of Biomed. Materials Research*, 2000, 49( 2), 155-166.
- [3] Bigerelle, M., Anselme, K., Noel, B., Ruderman, Y., Hardouin, P. and Iost, A. Improvement in the morphology of Ti-based surfaces: a new process to increase in vitro human osteoblast response. *Biomaterials*, 2002, 23, 1563-1577.
- [4] Bigerelle, M., Anselme, K., Dufresne, E., Hardouin, P. and Iost, A. An unscaled parameter to measure the order of surfaces. A new surface elaboration to increase cells adhesion. *Biomolecular Engineering*, 2002, 19(2-6), 79-83.
- [5] Bigerelle, M., Najjar, D. and Iost, A. Description d'une nouvelle méthode de corrélation entre la rugosité et une propriété de surface, application à la brillance de tôles skin-passées. *Revue de Métallurgie*, 2002, 5, 467-479.
- [6] Bigerelle, M., Najjar, D. and Iost, A. Relevance of roughness parameters for description and modeling of machined surfaces. *J. Mater. Sci.*, 2003, 38(11), 2525-2536.
- [7] Bigerelle, M., Anselme, K. and Iost, A. Analyse fractale des surfaces : application au polissage d'alliages précieux et à la prolifération cellulaire. *Innovation et Technologie en Biologie et Médecine*, 1999, 20(4), 219-230.
- [8] Najjar, D., Bigerelle, M., Hennebelle, F. and Iost, A. Contribution of statistical methods to the study of worn paint coatings surface topography. *Surface and Coatings Technology*, 2006, 200(20-21), 6088-6100.
- [9] Shaw, M. C. *Principles of Abrasive Processing*, Oxford Science publications, 1996.
- [10] Varghese, B. and Malkin, S. Experimental investigation of methods to enhance stock removal for superfinishing. *Annals of the CIRP*, 1998, 47, 231-234.
- [11] Varghese, B. and Malkin, S. A selection of optimal superfinishing parameters. Technical Report n°MR99-249, SME, 1999.
- [12] ISO 13565-2:1996 Ed. 1 State courant 90.93 TC 213, Spécification géométrique des produits (GPS) État de surface: Méthode du profil; surfaces ayant des propriétés fonctionnelles différentes suivant les niveaux, Partie 2: Caractérisation des hauteurs par la courbe de taux de longueur portante ISO abbott.
- [13] AFNOR, « NF-EN-ISO-12085 : État de surface : Méthode du profil. Paramètres liés au profil », Norme AFNOR, 1998.
- [14] SO 4287:1997, Spécification géométrique des produits (GPS) État de surface: Méthode du profil - Termes, définitions et paramètres d'état de surface.
- [15] Najjar, D., Bigerelle, M. and Iost, A. Identification of the mechanism of scratch generation on retrieved femoral head. *Wear*, 2005, 258, 240-250.