



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/10985/10797>

To cite this version :

Sylvain GILJEAN, Denis NAJJAR, Maxence BIGERELLE, Alain IOST - Analyse multi-échelle de l'abrasion - Mécanique et Industries - Vol. 7, n°1, p.13-20 - 2006

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository

Administrator : scienceouverte@ensam.eu



Analyse multi-échelle de l'abrasion

SYLVAIN GILJEAN*, DENIS NAJJAR^a, MAXENCE BIGERELLE** ET ALAIN IOST

Laboratoire de Métallurgie Physique et Génie des Matériaux, UMR CNRS 8517, Équipe Surfaces et Interfaces, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 8 boulevard Louis XIV, 59046 Lille Cedex, France

Résumé – La topographie de surface est une caractéristique à prendre en considération au même titre que la composition chimique pour décrire la fonctionnalité d'une surface. Cette topographie peut être décrite par des paramètres de rugosité d'amplitude, de fréquence ou hybrides. L'évolution de deux paramètres d'amplitude Ra et Rt en fonction de la longueur d'évaluation est ici étudiée sur un acier inoxydable de type 316L dont la surface est obtenue par polissage pour différents grades de papier. Cette étude montre l'existence de trois régimes en fonction de l'échelle d'observation des valeurs de Ra et Rt . Un premier régime où l'endommagement des surfaces ne comporte pas de loi d'échelle entre les différents grades de papier. Un régime transitoire est aussi identifié et caractérisé par un paramètre d'évaluation appelé Cut-Off qui suit une loi logarithmique en fonction de la taille de grain du papier. Enfin un troisième régime où les paramètres de rugosité suivent une parfaite loi d'échelle prouve que pour ce régime les mécanismes d'endommagement sont identiques à des échelles différentes.

Mots clés : Analyse multi-échelle / abrasion / topographie / paramètres de rugosité / fractale / profilométrie tactile / MEB / acier inoxydable

Abstract – **Multiscale analysis of abrasion damage.** Topographical aspect is a characteristics of a surface that is as much important as its chemical composition with regards to its functional properties. Topography can be mainly described by three kinds of roughness parameters: amplitude, frequency and hybrid parameters. This study aims at performing a multiscale analysis of the abraded surfaces of a 316L stainless steel ground at different levels. It is shown that the values of the two commonly used roughness parameters Ra and Rt are dependent of the observation scale and that three regimes can be distinguished to describe their evolution. A first regime for which the abraded surfaces are not characterized by any scale law can be observed at small observation scales (less than approximately 5 micrometers). Then, a transient regime can be noticed and modelled by a parameter called Cut-Off which follows a logarithmic evolution with the grain size. Finally, a third regime in which the roughness parameters follow a scaling law proving that the damage mechanisms in this range of observation scales (more than approximately 60 micrometers).

Key words: Multiscale analysis / abrasion / topography / roughness parameters / fractal / tactile profilometry / SEM / stainless steel

1 Introduction

Les caractéristiques de surface des matériaux sont généralement décrites en terme de composition chimique, de morphologie et de topographie. Bien que ces trois

aspects soient importants pour décrire la fonctionnalité d'un matériau, l'influence de la topographie sur les propriétés de surface reste mal comprise. Elles sont pourtant fondamentales pour des applications telles que la tribologie, l'optique, la biocompatibilité et l'adhérence [1–5]. Dans l'industrie, les surfaces fonctionnelles des produits sont généralement élaborées par des procédés conventionnels tels que le polissage, le fraisage, la rectification, le tournage...

Les paramètres à deux dimensions (2D) utilisés pour décrire la rugosité sont souvent divisés en trois groupes selon la caractéristique de surface qu'ils évaluent [5–7].

^a Auteur correspondant : denis.najjar@lille.ensam.fr

* Actuellement à l'Institut de Chimie des surfaces et Interfaces (ICSI), UPR CNRS 9069, 15 rue Jean Starky, BP 2488, 68057 Mulhouse Cedex, France

** Actuellement au Laboratoire Roberval, FRE 2833, UTC/CNRS, Centre de Recherche de Royallieu, BP 20529, 60205 Compiègne, France

Nomenclature

a_1 :	pende de la droite modélisant le régime n° 1
a_2 :	pende de la droite modélisant le régime n° 2
b_1 :	ordonnée à l'origine de la droite modélisant le régime n° 1
b_2 :	ordonnée à l'origine de la droite modélisant le régime n° 2
Cut-Off :	abscisse d'intersection des droites modélisant les régimes n° 1 et n° 2
f :	fonction représentant un profil
l :	longueur d'évaluation
OSC_τ :	τ oscillation
p :	probabilité critique
Ra :	moyenne arithmétique des profils de rugosité 2D
Rt :	étendue des profils de rugosité 2D
t :	t de student
VAR_τ :	moyenne des τ oscillations
y_1 :	équation de la droite modélisant le régime n° 1
y_2 :	équation de la droite modélisant le régime n° 2
y_{\max} :	valeur maximale du profil de rugosité
y_{\min} :	valeur minimale du profil de rugosité
Φ :	diamètre du grain en micromètre
Δ :	dimension fractale

On trouve les paramètres d'amplitude : Ra , Rt ... ; les paramètres de fréquence : autocorrélation... ; et les paramètres hybrides : Sk ...

La fonctionnalité d'une surface est souvent influencée par sa topographie à une échelle donnée. La moyenne arithmétique d'un profil (Ra) et son étendue Rt sont très souvent utilisées pour caractériser la rugosité d'une surface sans pour autant qu'il ne soit donné de précision sur la longueur d'évaluation de ces paramètres. Ceci est d'autant plus regrettable que les valeurs de ces paramètres dépendent de l'échelle d'observation, mais peut être expliqué par le concept de dimension fractale, qui tente à quantifier les invariants d'échelle.

Depuis son introduction par Mandelbrot [8], il a été établi plusieurs méthodes mathématiques pour permettre la mesure de cette dimension fractale et divers méthodes pour caractériser la rugosité de surface indépendamment de l'échelle d'observation [9].

Cette étude a pour but de caractériser à différentes échelles la topographie d'un acier inoxydable austénitique de type 316L obtenue par polissage. Il s'agira dans un premier temps de s'intéresser à l'évolution des paramètres de rugosité Ra et Rt en fonction de la longueur d'évaluation et de tenter de caractériser les différents régimes qui se dégagent des observations. Une modélisation de ces régimes sera proposée dans un second temps pour déterminer si les mécanismes d'endommagement qui leurs sont associés suivent des lois d'échelle.

2 Matériel et dispositif expérimental

2.1 Présentation du matériau et des échantillons

Pour effectuer cette étude sur l'aspect multi-échelle de l'abrasion, un acier inoxydable austénitique de type 316L a été retenu pour plusieurs raisons. Tout d'abord, ce type d'acier inoxydable est couramment utilisé à l'état poli

pour son aspect esthétique maintenu dans le temps par sa résistance à la corrosion. Dans le cadre de nos essais, cette résistance à la corrosion permet de s'affranchir d'un éventuel phénomène d'oxydation de la surface susceptible de modifier sa topographie dans le temps. De plus, il présente une microstructure monophasée garantissant un niveau d'endommagement par abrasion équivalent d'un grain à un autre.

L'acier austénitique inoxydable de type 316L utilisé pour cette étude a été livré sous forme de barre. Cette barre, dont la composition chimique est fournie dans le tableau 1, a été tronçonnée pour obtenir des pastilles de diamètre 14 mm qui ont ensuite été enrobées.

2.2 Procédure expérimentale

L'abrasion des échantillons a été réalisée à l'aide d'une polisseuse automatique avec des papiers abrasifs en carbure de silicium. La polisseuse possède deux axes de rotation excentrés, celle du plateau porte papier et celle du plateau porte échantillons. Le polissage a été effectué à différents grades (80, 180, 220, 320, 500, 800, 1000, 1200) sous des conditions identiques de pression et de temps. Les papiers utilisés répondent à la norme FEPA qui décrit la correspondance avec la taille de grains. Ces tailles de grains sont reportées dans le tableau 2.

Après polissage, les échantillons présentent une topographie typique avec des stries aléatoirement réparties sur la surface. Visuellement, la topographie de ces échantillons peut être considérée comme isotrope. Pour savoir si ce caractère isotrope est conservé à une échelle plus fine, les échantillons ont été palpés à l'aide d'un rugosimètre tactile équipé d'un stylet de rayon de bec de 2 micromètres et une sensibilité verticale enregistrée de l'ordre du nanomètre. Le palpé d'une surface 3D est en réalité constitué de nombreux profils 2D palpés à intervalles réguliers ; la surface étant obtenue par extrapolation.

Tableau 1. Composition chimique de l'acier de type 316L.

Élément chimique	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	N	S	P
% massique	0,020	0,37	1,26	10,06	16,52	2,03	0,042	0,024	0,036

Tableau 2. Correspondance entre les grades de papier et les tailles de grains.

Grade	80	180	220	320	500	800	1000	1200	2400	4000
Taille de grain moyenne (μm)	200	76	68	46	30	22	18	14	10	5

Pour chaque échantillon, l'aire de la surface palpée était de $4 \times 4 \text{ mm}^2$. Chaque trace a été palpée sous une charge de 5 mg, à une vitesse de $400 \mu\text{m.s}^{-1}$ et une fréquence d'échantillonnage de 50 Hz de façon à obtenir 500 points par ligne. Les traces sont espacées de $8 \mu\text{m}$ soit un total de 500 traces. Au final, la surface des échantillons est donc représentée par 250 000 points. Les mesures ont ensuite été traitées par le logiciel de traitement d'images Mountain. Quel que soit le grade de papier, les images obtenues montrent que le caractère isotrope de la topographie est conservé à l'échelle de la surface palpée.

Des photos au microscope électronique à balayage ont aussi été prises pour observer la surface des échantillons à une échelle plus fine. Toutes les photos ont été réalisées au même grossissement (1500) pour permettre d'observer la diminution de la taille des stries avec l'augmentation du grade de papier. L'ensemble des résultats concernant la caractérisation des surfaces est donné en figure 1.

Le palpage des surfaces 3D ayant révélé un caractère isotrope sur une aire de $4 \times 4 \text{ mm}^2$, seule l'étude de profils 2D palpés sur une longueur de 5 mm a été considérée pour analyser plus finement la rugosité. En effet, ces profils ont pu être enregistrés avec une fréquence d'échantillonnage beaucoup plus importante que celle utilisée pour le palpage des surfaces 3D. 30 profils 2D ont ainsi été palpés aléatoirement en position et direction avec une vitesse d'avancée du stylet de $200 \mu\text{m.s}^{-1}$ et une fréquence d'échantillonnage de 1000 Hz de façon à obtenir environ 25 000 points ($0,2 \mu\text{m}$ entre chaque point) par profil sous une charge de 5 mg. Ces mesures ont permis d'effectuer une étude statistique des résultats grâce à un traitement numérique des données en utilisant le logiciel SASTM.

2.3 Traitement des données

Le premier traitement effectué sur les données brutes du rugosimètre a été un redressement (par un polynôme de degré 3) des profils pour supprimer d'une part la pente résiduelle due au posage de l'échantillon sur le plateau et d'autre part les écarts de profil d'ordre inférieur à la rugosité (ondulation et forme). Les autres traitements des données consistaient à calculer deux paramètres d'amplitude de rugosité, Ra et Rt .

Rappelons les définitions de ces paramètres :

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)|.dx \quad ; \quad Rt = y_{\max} - y_{\min}$$

La longueur d'évaluation l intervenant directement dans le calcul de Ra , on peut envisager une variation de paramètre d'amplitude en fonction de la longueur d'évaluation choisie. De même on peut s'attendre à ce que la probabilité d'obtenir un grand y_{\max} et un petit y_{\min} augmente avec la longueur d'évaluation. Dans cette hypothèse, un algorithme de calcul a été créé pour déterminer l'évolution de ces paramètres en fonction de la longueur d'évaluation. Rappelons que les profils sont discrétisés avec un intervalle $\delta x = 0,2 \mu\text{m}$ entre chaque point. Pour une longueur l d'évaluation donnée, on détermine le y_{\max} et le y_{\min} pour déterminer localement une valeur $Rt(0, l)$, puis on décale la fenêtre d'évaluation de δx pour obtenir une nouvelle valeur de $Rt(\delta x, l)$. On réitère cette opération jusqu'à la fin du profil puis on moyenne les $Rt(i.\delta x, l)$ pour obtenir au final le Rt correspondant à la longueur d'évaluation choisie pour le profil. Pour chaque longueur d'évaluation l , les résultats des Rt des 30 profils sont ensuite moyennés pour obtenir une valeur de Rt moyenne. La valeur du Ra est calculée sur le même principe, sauf que son calcul nécessite la détermination d'une ligne moyenne. Cette ligne moyenne est déterminée par régression linéaire aux moindres carrés du profil sur la fenêtre de longueur l .

3 Résultats

3.1 Observations

Les résultats des calculs des paramètres de rugosité en fonction de la longueur d'évaluation sont présentés figure 2.

La figure 2 montre clairement que les paramètres d'amplitudes considérés ne sont pas constants en fonction de la longueur d'évaluation. De plus, un changement de régime (appelé régime transitoire) est observé pour des valeurs de longueur d'évaluation variant de 5 à $20 \mu\text{m}$ (il est à noter que l'échelle des graphiques est de type logarithmique) de manière croissante avec la taille de grain. Deux régimes quasi-linéaires, notés régime No. 1 pour des valeurs de longueur d'évaluation inférieures au régime transitoire et régime No. 2 pour des valeurs supérieures, peuvent ainsi être distingués.

Le régime No. 1 est caractérisé pour les deux graphiques de Ra et Rt par des droites dont les pentes augmentent de manière croissante avec la taille de grain. Le régime No. 2 est caractérisé pour le graphique de Ra par des droites parallèles tendant vers des valeurs de

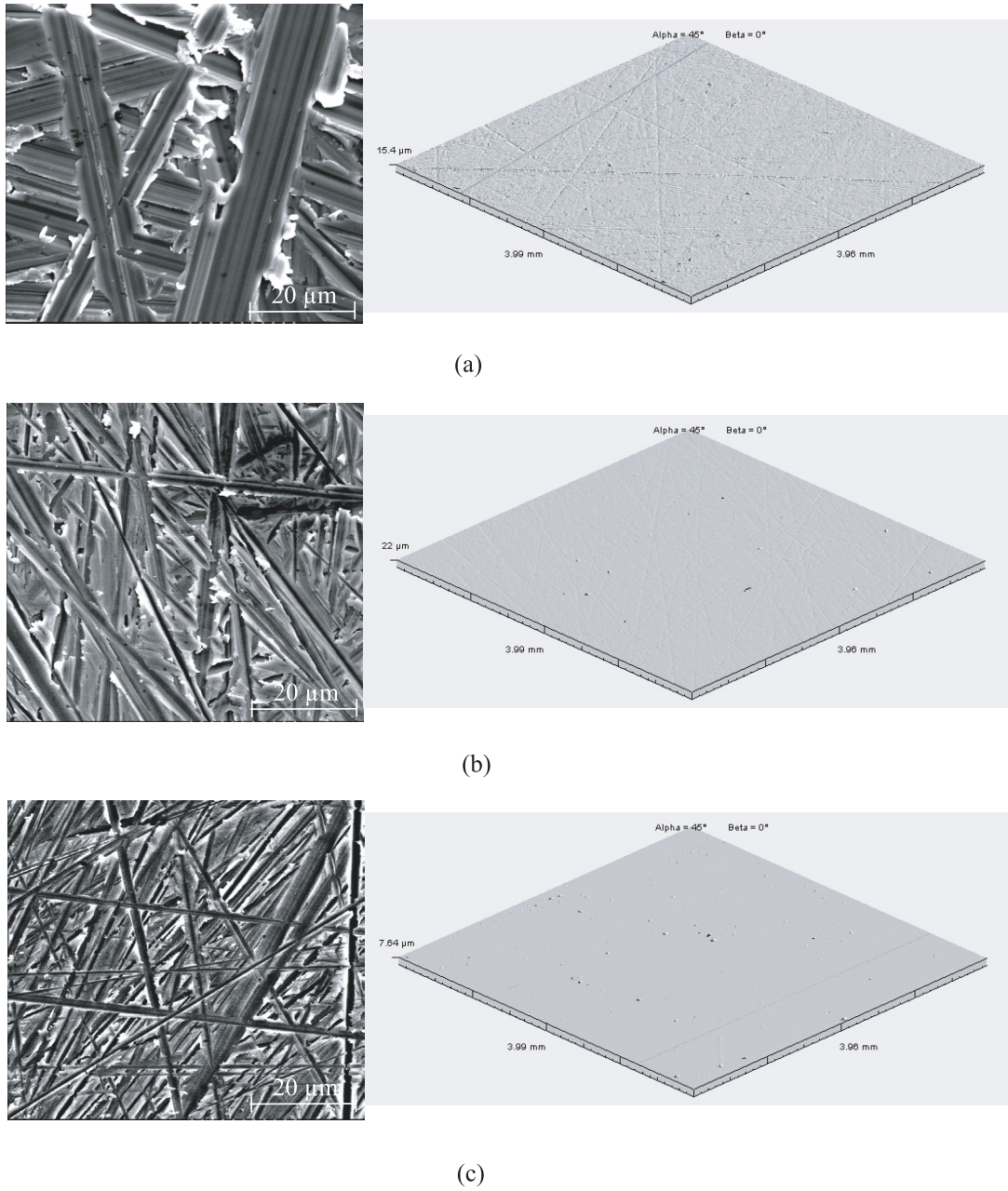


Fig. 1. Caractérisation des surfaces au microscope électronique à balayage et au rugosimètre tactile. (a) Grade 80 (b) grade 320 (c) grade 800.

Ra constantes que nous appellerons par la suite Ra infini. Pour le graphique de Rt , le régime No. 2 est caractérisé par des droites parallèles avec une légère pente positive.

3.2 Modélisation statistique

Étant donné l'allure des résultats de l'évaluation des paramètres d'amplitudes Ra et Rt en fonction de la longueur d'évaluation, différents paramètres vont être calculés à l'aide du logiciel SASTM pour modéliser ces régimes.

Pour chaque profil, une régression linéaire aux moindres carrés d'équation $y_1 = a_1.x + b_1$ a été calculée

pour des valeurs telles que $\log(l) < 0,7$ ainsi qu'une autre d'équation $y_2 = a_2.x + b_2$ pour des valeurs telles que $\log(l) > 1,8$. Ces deux droites modélisent respectivement les régimes No. 1 et No. 2. Le régime transitoire est, quant à lui, modélisé par l'abscisse du point d'intersection de ces deux droites appelé Cut-Off :

$$\text{Cut - Off} = \frac{b_2 - b_1}{a_1 - a_2}$$

À noter que a_1 représente la pente du régime No. 1 pour les 2 graphiques Ra et Rt et b_2 représente le Ra infini dans le graphique Ra .

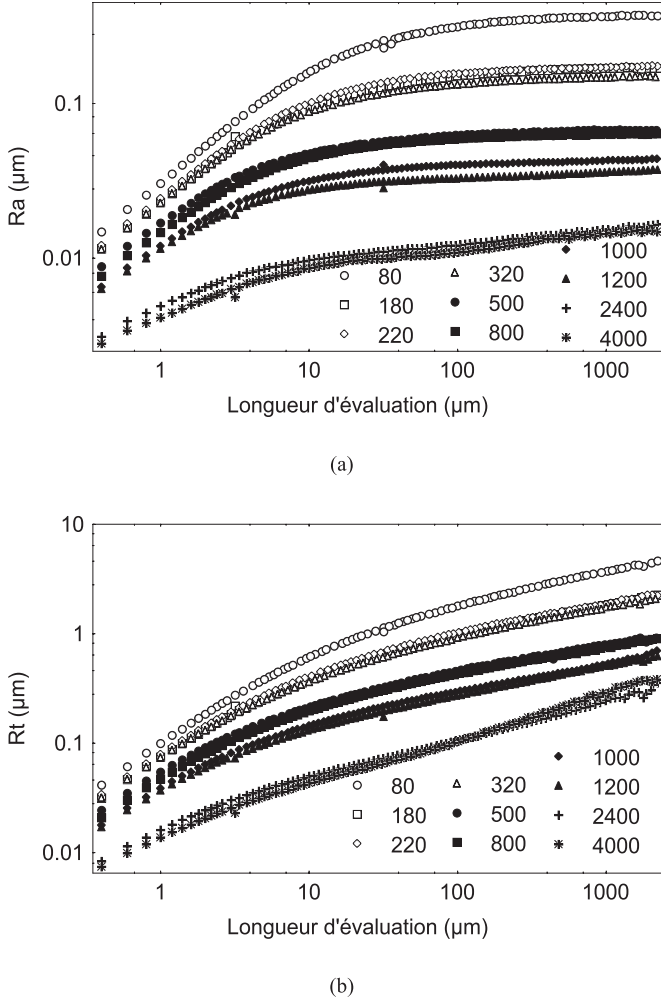


Fig. 2. Valeurs de (a) Ra et (b) Rt en fonction de la longueur d'évaluation dans une échelle log-log.

Pour définir les valeurs de ces paramètres pour une taille de grain fixée, les 30 valeurs de Cut-Off relatives aux 30 profils palpés sur un échantillon sont moyennées.

Les résultats sont donnés sur les figures 3 et 4.

4 Discussion

4.1 Relation pente-grade pour le régime No. 1

Pour les deux graphiques Ra , Rt , l'allure du régime No. 1 est visuellement linéaire en échelle log-log. Or il a été démontré par la méthode des oscillations que pour le graphique Rt , ce régime était bien une droite de pente a_1 et relié à la dimension fractale. Tricot [10] définit la τ oscillation comme suit pour un profil noté f de longueur l : Soit $f : [0, l] \rightarrow \mathbb{R}$

$$OSC_{\tau}(f, x) = \left| \frac{\max_{|x-t| < \tau} (f(t)) - \min_{|x-t| < \tau} (f(t))}{\tau} \right|$$

$OSC_{\tau}(f, x)$ représente une valeur de Rt locale qu'il faut donc moyenner :

$$VAR_{\tau}(f, 0, l) = \frac{1}{l} \int_0^l OSC_{\tau}(f, x) dx$$

Tricot définit alors la dimension fractale $\Delta(f, 0, l)$ comme suit :

$$\Delta(f, 0, l) = \lim_{\tau \rightarrow 0} \left(2 - \frac{\log(VAR_{\tau}(f, 0, l))}{\log(\tau)} \right)$$

Dans le graphique $\log(Rt) = f(\log(l))$, la dimension fractale du régime vérifie donc $\Delta = 2 - a_1$. De plus il a été montré que cette méthode est particulièrement adaptée pour le calcul de la dimension fractale de graphiques issus de fonction de type $y = f(x)$ [11].

Finalement, le régime No. 1 lié au graphique Rt est une droite dont la pente permet directement de déterminer la dimension fractale. Les résultats sont similaires pour le graphique Ra , mais la démonstration mathématique et ses conditions d'applications restent à établir.

Il est à noter que la dimension fractale augmente avec une décroissance de la taille de grain. Le même résultat avait déjà été établi pour d'autres matériaux : Al, Cu, Fe-0,05 % C, Sn-5 %Sb [12].

4.2 Relation pente-grade pour le régime No. 2

4.2.1 Analyse du Rt

La valeur de Rt est continuellement croissante quel que soit le grade de papier. Cette croissance est logique car l'augmentation de la longueur d'évaluation augmente la probabilité d'obtenir des extremums. Cette loi des extremums a été démontrée par Gumbel [13] et la probabilité d'obtenir des extremums $H(x)$ suit une loi du type :

$$H(x) = \exp \{ - \exp(-x) \}, \quad -\infty < x < +\infty$$

La croissance de Rt sur le régime No. 2 est donc bien justifiée.

4.2.2 Analyse du Ra

La valeur de Ra tend vers une constante notée Ra_{∞} pour les différents grades.

Le coefficient a_2 donne la pente de la modélisation du régime 2 (Fig. 4). Ce coefficient est constant et quasi nul sauf pour les faibles rugosités (grade 2400 et 4000) où il subsiste, malgré le redressement initial des profils, une oscillation basse fréquence qui est due aux défauts d'ordre inférieur (forme et ondulation) et qui fait artificiellement augmenter la valeur de Ra . Le fait que le coefficient a_2 soit constant et quasi-nul implique qu'il n'y a plus d'ordre à cette échelle. La longueur d'évaluation est

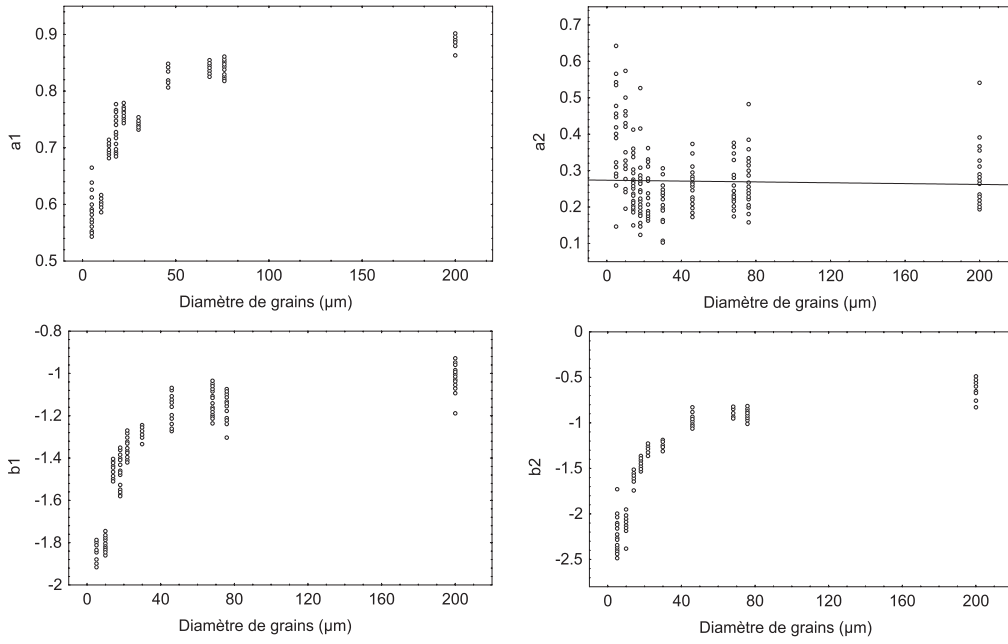


Fig. 3. Résultats de la modélisation des différents régimes pour les valeurs de R_t .

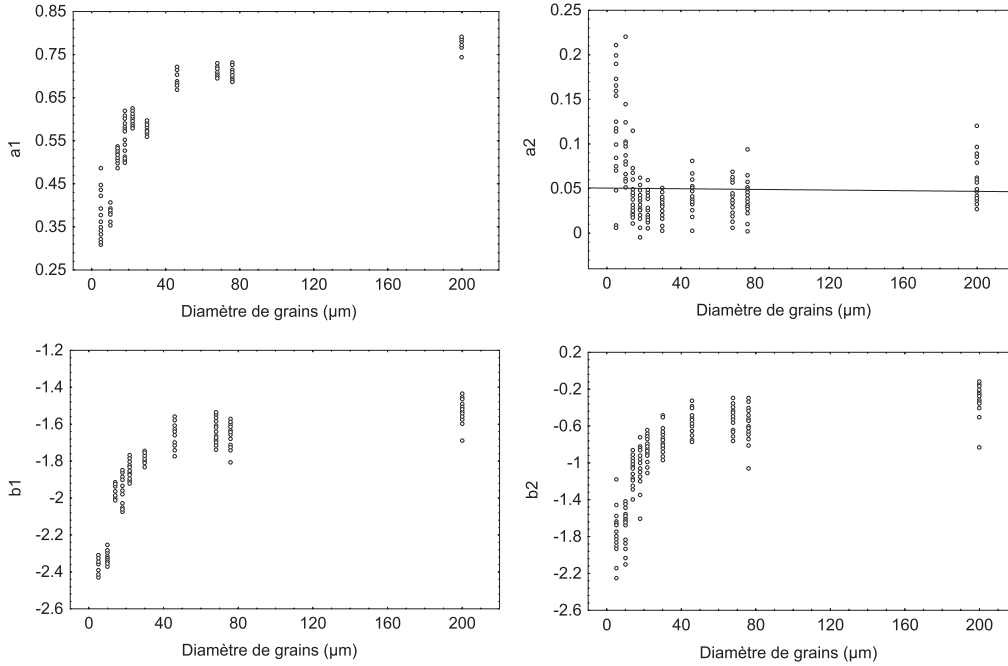


Fig. 4. Résultats de la modélisation des différents régimes pour les valeurs de R_a .

très largement supérieure à la largeur des stries de polissage observable sur la surface. De plus ces stries sont complètement désordonnées de part la double rotation (plateau et échantillon) liée au procédé de polissage. On peut donc admettre qu'à cette échelle, l'abrasion obtenue par polissage est un mécanisme d'endommagement purement aléatoire caractérisé par une dimension fractale $\Delta = 2$. On se trouve dans un régime de décorrélation spatiale.

En ce qui concerne la valeur de ce R_a infini, ce dernier a été calculé en considérant la moyenne des valeurs de R_a estimées sur chaque plateau du régime No. 2 associé

à chaque profil (30 profils par échantillon). Ce plateau a été défini pour des valeurs telles que $\log(l) > 2$. Les résultats présentés sur la figure 5 montrent une croissance du R_a infini à mesure que la taille de grain augmente. Ceci traduit simplement une pénétration plus importante dans le matériau pour des grains plus gros. Une taille de grain théoriquement nulle engendre une rugosité nulle ; une regression linéaire aux moindres carrés a donc été calculée en forçant son passage par l'origine. Une droite de pente 0,001811 est obtenue et la corrélation notée est hautement significative (le t de Student vérifie $t = 1143$ et la probabilité critique p vérifie $p < 0,0001$).

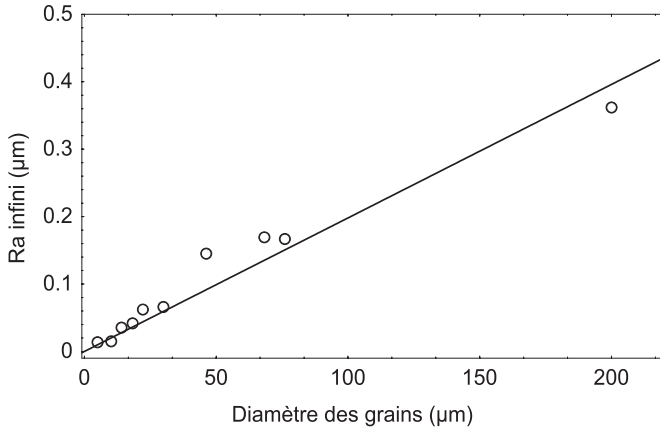


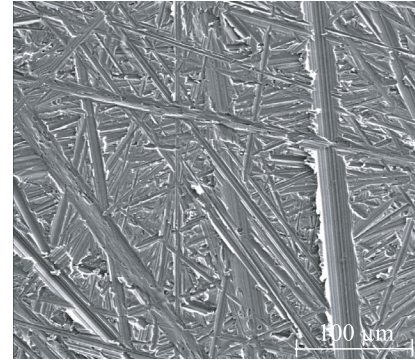
Fig. 5. Représentation des valeurs de Ra infini en fonction du diamètre des grains.

Le résultat précédent montre l'existence d'une parfaite loi d'échelle homothétique. Le grade de papier 80 sera pris comme référence pour illustrer cette loi d'échelle homothétique. Le rapport du Ra infini d'un échantillon et du Ra infini du papier de grade 80 définit le rapport d'homothétie. En prenant une photo de l'échantillon de référence à un grossissement donné, on observe le même endommagement que pour un échantillon dont le grossissement est multiplié par le rapport d'homothétie. La figure 6 présente des photos effectuées au microscope électronique à balayage pour les grades de papier 80, 320 et 800 pris respectivement aux grossissements 300, 600, 1500. Les rapports d'échelle sont obtenus par l'amplitude de la rugosité et cette figure montre trois photos quasi identiques. Elle montre également que la fréquence de la rugosité est la même avec un désordre et une taille identique de stries. On est donc en présence d'une parfaite loi d'échelle homothétique avec des mécanismes d'endommagement du matériau identiques à des échelles différentes.

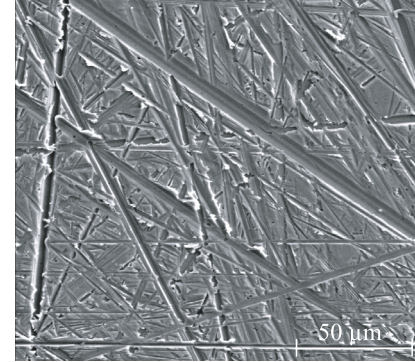
De plus, en faisant l'hypothèse d'une topographie de surface constituée de demi cercles adjacents obtenue par une indentation complète du grain dans le matériau, la rugosité suivrait la relation suivante : $Ra = 0,09.\Phi$ où Φ est le diamètre du grain en micromètres. Le rapport avec la pente identifiée expérimentalement est donc de l'ordre de 50. L'indentation réelle par un grain lors du polissage est donc très faible et ne s'effectue que par l'une de ses extrémités.

4.2.3 Analyse du régime transitoire

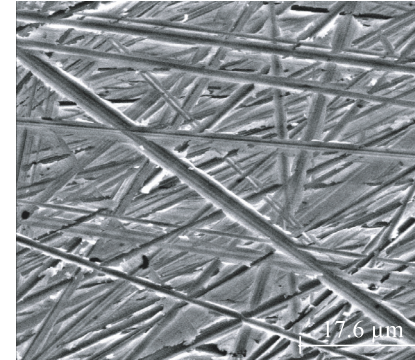
Le régime transitoire est modélisé dans cette étude par le Cut-Off (exprimé en micromètres) déterminé comme l'abscisse du point d'intersection des deux droites modélisant les régimes No. 1 et No. 2. Comme tous les autres paramètres de cette étude, le Cut-Off a été relié à la taille de grain. Contrairement au résultat précédent concernant le Ra infini, on n'observe pas de comportement linéaire mais une tendance logarithmique. Le Cut-Off est tracé en fonction du logarithme de la taille de grain sur la figure 7. Sachant que pour un grain de



(a)



(b)



(c)

Fig. 6. Photos, obtenues au microscope électronique à balayage, du même endommagement vu à des échelles différentes : (a) grade 80, (b) grade 320, (c) grade 800.

taille théoriquement nulle, le Cut-Off doit être nul ; une regression linéaire aux moindres carrés a été calculée en forçant son passage par l'origine. Une droite de pente 3,04 est obtenue et la corrélation notée est hautement significative (avec un t de Student qui vérifie $t = 68$ et une probabilité critique qui vérifie $p < 0,0001$). Le Cut-Off varie donc linéairement en fonction du logarithme de la taille de grain. Ceci laisse présager un comportement d'échelle lors de la transition. Plusieurs pistes sont envisagées et restent à explorer pour donner une explication. Une campagne d'analyse d'images va être prochainement lancée pour déterminer la taille des stries de polissage afin de

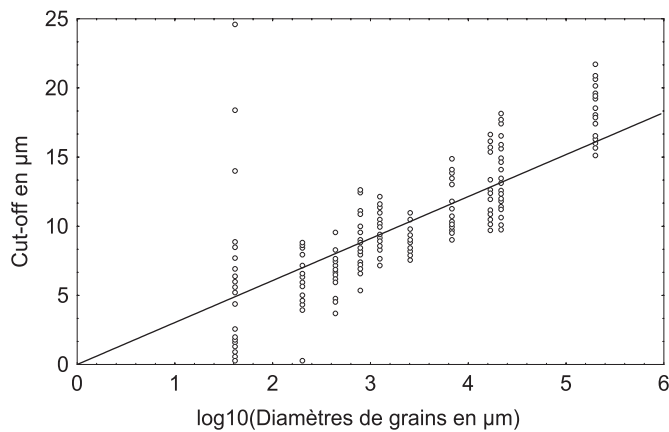


Fig. 7. Représentation des valeurs de Cut-Off en fonction du logarithme décimal de la taille de grains.

trouver un éventuel lien entre le Cutt-Off et cette taille de stries. D'un autre côté, des essais de scratch test sous différentes charges sont envisagés afin d'analyser le comportement du matériau sous indentation.

5 Conclusion

Dans cette étude portant sur la caractérisation de la topographie de surfaces polies d'un acier inoxydable austénitique de type 316L, une variation des paramètres Ra et Rt en fonction de la longueur d'évaluation a été identifiée ainsi que l'existence de deux régimes distincts séparés par un régime transitoire.

Le premier régime correspond à un endommagement des surfaces qui ne comporte pas de loi d'échelle entre les différents grades de papier ; la dimension fractale calculée est croissante avec le grade de papier de polissage. Le deuxième régime présente une dimension fractale de 2 quel que soit l'échantillon. L'étude du Ra infini permet de conclure que les mécanismes d'endommagement pour les

différents grades sont identiques à des échelles différentes. Le régime transitoire est linéairement relié au logarithme de la taille de grain.

Des études complémentaires vont être apportées pour tenter d'expliquer les phénomènes physiques qui sont à l'origine du changement de régime des paramètres de rugosité.

Références

- [1] B. Cheroudi, T.R.L. Gould, D.M. Brunette, J. Biomed. Mater. Res. 25 (1991) 387
- [2] C. Larsson, P. Thomsen, J. Lausma, M. Rohdal, B. Kasemo, L.E. Ericson, Biomaterials 15 (1994) 1062-1074
- [3] J.Y. Martin, Z. Schwartz, T.W. Hummer, D.M. Schaud, J. Simpson, J. Lankford, D.D. Dean, D.L. Cochran, B.D. Boyan, J. Biomed. Mater. Res. 29 (1995) 389
- [4] B.D. Boyan, T.W. Hummert, D.D. Dean, Z. Schwartz, Biomaterials 17 (1996) 137
- [5] T.R. Thomas, Rough Surfaces, Longman, London, 1982
- [6] A. Wennerberg, On Surface Roughness and Implant Incorporation, Dissertation, Gothenburg, 1996
- [7] D.J. Whitehouse, Handbook of Surface Metrology, Institute of Physics Publishing, Bristol, 1994, pp. 10-20
- [8] B.B. Mandelbrot, The Fractal Geometry of Nature, Freeman, San Francisco, CA, 1982
- [9] P. Pfeifer, Fractal dimension as working tool for surface-roughness problems, Appl. Surf. Sci. 18 (1984) 146-164
- [10] C. Tricot, Courbes et Dimension Fractale, Springer-Verlag, Paris, 1993
- [11] B. Dubuc, J.F. Quiniou, C. Roques-Carnes, C. Tricot, S.W. Zucker, Evaluating the fractal dimension of profiles, Phys. Rev. A. (1989) 1500-1512
- [12] M. Biggerelle, D. Najjar, A. Iost, Relevance of roughness parameters for describing and modelling machined surfaces, J. Mat. Sci. 38 (2003) 2525-2536
- [13] E.J. Gumbel, Statistics of extremes, Columbia University Press, New York, 1958